

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2023.06.007

Sentinel-2-MSI 和 Sentinel-3-OLCI 离水反射率产品在黄河口的适用性评估

罗亚飞^{1,2}, 钟小瑾¹, 付东洋¹, 严立文^{2*}, 张翼^{3*}, 刘一霖⁴,
黄海军², 张泽华², 祁雅莉¹, 王倩⁴

(1 广东海洋大学电子与信息工程学院, 广东省高等学校陆架及深远海气候、资源与环境重点实验室,

广东 湛江 524088;

2 中国科学院海洋研究所海洋地质与环境重点实验室, 中国科学院大学海洋学院, 山东 青岛 266071;

3 山东科技大学海洋科学与工程学院, 山东 青岛 266590;

4 山东科技大学地球科学与工程学院, 山东 青岛 266590)

摘要: 近岸高浊度二类水体具有复杂的海洋光学特性, 不同影像源反射率产品在该类水体的适用性尚待充分论证。以黄河口水体为典型研究对象, 以适用于黄河口的ACOLITE DSF算法校正的Landsat离水反射率产品为参考, 通过星星匹配, 对基于不同大气校正算法的Sentinel-2-MSI (S2-MSI) 和 Sentinel-3-OLCI (S3-OLCI) 离水反射率产品在黄河口的适用性进行了评估。结果表明, 在黄河口高浑浊-极度浑浊水体, iCOR算法校正的S2-MSI和S3-OLCI的离水反射率产品与参考产品的一致性高于其他算法, 其次为FLAASH和Sen2Cor算法, C2RCC算法表现相对较差。iCOR、FLAASH和Sen2Cor算法除在高浑浊水体的近红外波段平均百分比相对误差 E_{MARD} 超过34%外, 在绿、红波段的 E_{MARD} 均小于24%, Sen2Cor算法结果整体上与FLAASH的相似。iCOR、FLAASH和Sen2Cor算法随着水体浑浊程度增加, 误差越小; 而C2RCC算法则随着水体浑浊程度的增加, 误差越大, 且整体存在低估。研究结果可为高浊度二类水体大气校正的选择提供有效借鉴, 并为黄河口悬沙高分辨率动态监测打下基础。

关键词: 大气校正; 黄河口; Sentinel-2-MSI; Sentinel-3-OLCI; 离水反射率

中图分类号: P733.3

文献标识码: A

文章编号: 1673-6141(2023)06-585-017

Evaluation of applicability of Sentinel-2-MSI and Sentinel-3-OLCI water-leaving reflectance products in Yellow River Estuary

LUO Yafei^{1,2}, ZHONG Xiaojin¹, FU Dongyang¹, YAN Liwen^{2*}, ZHANG Yi^{3*}, LIU Yilin⁴,
HUANG Haijun², ZHANG Zehua², Qi Yali¹, WANG Qian⁴

(1 Key Laboratory of Climate, Resources and Environment in Continental Shelf Sea and Deep Sea of Department of Education of Guangdong Province, College of Electronic and Information Engineering, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China;

2 Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, College of Oceanography, University of Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China;

3 College of Ocean Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

4 College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

基金项目: 国家自然科学基金(42006148, 42206187, 41976166), 中国科学院海洋地质与环境重点实验室开放基金项目(MGE2020KG12)

作者简介: 罗亚飞(1990-), 女, 湖南浏阳人, 博士, 讲师, 硕士生导师, 主要从事水色遥感和海洋光学方面的研究。E-mail: luoyafei@gdou.edu.cn

收稿日期: 2022-05-17; **修改日期:** 2022-07-05

***通信作者.** E-mail: yanliwen@qdio.ac.cn; yizhang@sdust.edu.cn

Abstract: The optical properties of highly turbid coastal water bodies are complicated, so the application of reflectance products based on different satellites in such kinds of water bodies is desperately needed to be fully evaluated. Taking the water body of the Yellow River Estuary (YRE) as a typical research object, the applicability of the water-leaving reflectance products corrected by different atmospheric correction algorithms for Sentinel-2-MSI (S2-MSI) and Sentinel-3-OLCI (S3-OLCI) image is evaluated based on the reference of Landsat reflectance products corrected by ACOLITE DSF atmospheric correction algorithm suitable for YRE. The results show that S2-MSI and S3-OLCI data corrected by the image correction for atmospheric effects (iCOR) are in good agreement with Landsat reflectance products for highly-extremely turbid water bodies in YRE, followed by FLAASH (Fast line-of-sight atmospheric analysis of spectral hypercubes) and Sen2Cor (Sentinel-2 correction) corrected products, while C2RCC (Case-2 regional coast colour) performs poorly. iCOR, FLAASH and Sen2Cor corrected S2-MSI and S3-OLCI reflectance products show good results in the green and red bands with the mean absolute relative difference E_{MARD} lower than 24%, except that in the near-infrared band the E_{MARD} is higher than 34% in highly turbid waters. Among them, the FLAASH and Sen2Cor algorithms have similar results. Compared with that in highly turbid waters, the E_{MARD} is even lower for iCOR, FLAASH and Sen2Cor algorithms in extremely turbid waters. On the contrary, C2RCC algorithm performs relatively poor in highly turbid waters and even worse in extremely turbid waters, with overall underestimation of water-leaving reflectance. This research is significant for it can provide useful reference for choosing atmospheric correction methods in highly turbid waters and lay the foundation for dynamic monitoring suspended sediment in YRE with high resolution.

Key words: atmospheric correction; Yellow River Estuary; Sentinel-2-MSI; Sentinel-3-OLCI; water-leaving reflectance

0 引言

水色遥感卫星传感器探测得到的总辐射能量中有 80% 以上的辐射能量来自大气的干扰^[1], 大气干扰降低了影像的质量, 增加了影像解译的困难, 因此大气校正是遥感研究的重要环节^[2-4]。目前常用的大气校正方法可分为两类^[5-7], 一类是基于物理的方法, 即在辐射传输模型中使用气溶胶属性、水蒸气和臭氧等物理参数, 通过计算大气的散射和吸收来进行大气去除, 如 FLAASH (Fast line-of-sight atmospheric analysis of spectral hypercubes)、iCOR (Image correction for atmospheric effects) 和 6S (Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum) 等算法^[8-10]; 另一类是基于影像的方法, 该方法不使用物理参数, 而是通过影像本身获取大气影响信号来进行大气去除, 如 ACOLITE (Atmospheric correction for OLI 'lite') 和 Sen2Cor (Sentinel-2 correction) 等^[11,12]。

随着新型卫星传感器的成功发射, 针对其开发的大气校正方法也应运而生, 如针对 Sentinel-2-MSI (S2-MSI) 和 Sentinel-3-OLCI (S3-OLCI) 等传感器开发的大气校正算法的出现^[7,13-16], 扩展了水色遥感的研究领域。各算法在不同水体环境下的适用性存在差异, 如在不同营养程度的西班牙内陆水体中, Polymer (Polynomial-based algorithm applied to MERIS) 和 C2RCC (Case-2 regional coast colour) 大气校正算法表现最

佳,在中等和极度富营养水体中ACOLITE、iCOR和Sen2Cor性能更好^[13]。ACOLITE、C2RCC、iCOR、I2gen、Polymer和Sen2Cor在处理S2-MSI时均表现为在红波段尤其是近红外波段有较高的不确定性(>100%),而在蓝、绿波段,Polymer和C2RCC在波罗的海、西英吉利海峡和欧洲五个国家的内陆水体中有较小的误差(约40%~60%)^[14]。De Keukelaere等^[17]研究了iCOR大气校正方法处理的Landsat-8 OLI(L8-OLI)和S2-MSI影像在沿海和内陆水体的效果,发现除在865 nm波段外,其他所有可见光波段的误差均较小。Pahlevan等^[18]进行了L8-OLI和S2-MSI(ACIX-Aqua)大气校正方法的全球评估,建议对富含泥沙的水体使用ACOLITE DSF算法。Vanhellemont和Ruddick^[19]改进了ACOLITE DSF大气校正算法,使之适用于S3-OLCI影像,该算法在比利时近海取得了较好的效果并反演得到了该区的叶绿素和浊度等参数。ACOLITE是由Vanhellemont等^[11]开发的大气校正处理器,在吉伦特河口^[20-22]、杭州湾^[23]、长江口^[24]以及黄河口^[25-27]等复杂的沿岸及河口水域得到了很好的应用。

对于典型的高浑浊水体-黄河口,许多传感器产品的应用在此受到限制,比如MODIS产品,会在黄河口近岸饱和^[25],因此对于黄河口的悬沙反演一直是一个挑战和难点。已开展的黄河口高精度悬沙遥感反演主要还是利用Landsat卫星产品进行的。如Qiu等^[25]、阿如汗等^[28]验证了基于L8-OLI卫星数据的短波红外大气校正算法(ACOLITE SWIR)^[29]在黄河口水体的适用性,结果表明该算法能较好地消除大气对黄河口水体的影响。Li等^[26,27]利用2019年黄河口实测离水反射率数据验证了ACOLITE DSF算法对于校正Landsat-7 ETM+(L7-ETM+)和L8-OLI影像的效果,结果显示,实测和影像离水反射率的平均百分比误差在近红外波段为31%,而在蓝、绿、红波段均不超过11%,两者整体误差较小,表明ACOLITE DSF校正效果好,其校正后的Landsat影像可用于黄河口的悬沙浓度反演。ACOLITE SWIR和ACOLITE DSF均为ACOLITE中提供的算法,可供用户任意选择,两者一致性高^[22,30]。综上表明,ACOLITE能够有效地对黄河口地区的Landsat影像进行大气校正。

虽然经ACOLITE校正的Landsat影像已经被成功应用到黄河口的水色反演,但其低时间分辨率(16天)限制了其连续观测能力,尤其是在观察如调水、调沙等人类活动对黄河口悬沙分布影响的时候,其时间分辨率远不能满足要求,特别是在悬沙浓度变化大的黄河口,更高的时间分辨率和空间分辨率对悬沙浓度反演至关重要。而哨兵系列卫星,如S2-MSI,其空间分辨率高达10 m,时间分辨率则达到5天,S3-OLCI甚至达到每日重返,这两个卫星的发射应用对于黄河口的高精度监测提供了新的契机,而相关产品的应用精度评估则成为亟待开展的研究课题。

本研究以黄河口水体为例,使用经前人验证适用于黄河口水体的ACOLITE DSF算法校正的Landsat离水反射率作为参考,评价基于不同大气校正算法的S2-MSI和S3-OLCI的离水反射率产品在黄河口水体的适用性,为类似水体大气校正的选择提供有效借鉴,同时为黄河口悬沙浓度的高精度遥感反演和高时空动态监测打下基础。

1 研究区及数据

1.1 研究区

研究区域为黄河口(图1)。黄河口位于渤海湾与莱州湾交汇处,由河流进口段、三角洲及滨海区组成。由于大量的泥沙输送,黄河口地区水体高度浑浊甚至极度浑浊,水体光学特性复杂多变^[25,31,32]。黄河口海域

属于典型的高浑浊水体,随着悬浮物浓度的升高,水体光谱反射也会相应增强^[33,34]。当悬浮物浓度小于 40 mg/L, 800 nm 附近的遥感反射比 R_{rs} 基本都小于 0.01 sr^{-1} ; 当悬浮物浓度在 40~150 mg/L 时, 570~700 nm 波段区间的 R_{rs} 明显升高, 且 800 nm 附近 R_{rs} 的峰值均大于 0.01 sr^{-1} ^[32]。

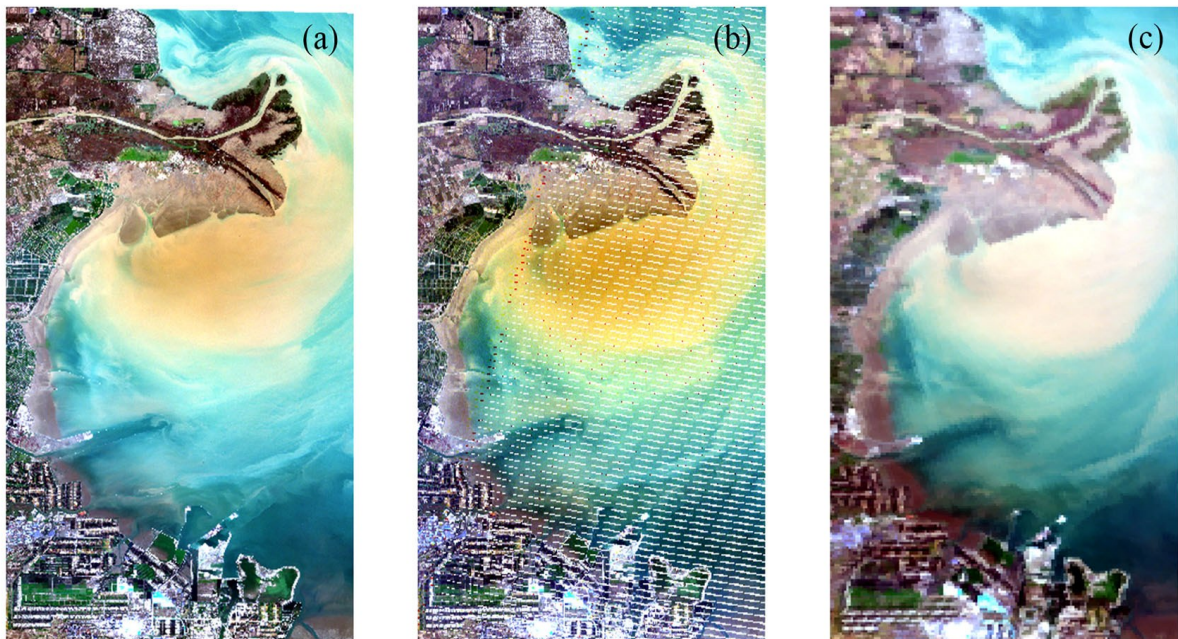


图 1 2017年10月24日黄河口的RGB卫星影像。(a) S2-MSI; (b) L7-ETM+; (c) S3-OLCI

Fig. 1 Quasi-true color satellite images of Yellow River Estuary on October 24, 2017. (a) S2-MSI; (b) L7-ETM+; (c) S3-OLCI

1.2 不同水体类型定义

IOCCG 报告^[35]中定义了不同浑浊程度水体类型,同时定义了对应水体类型在近红外波段 (NIR) 的离水反射率 ($\rho_w = \pi R_{rs}$, 无量纲) 的范围值, 如表 1 所示。因此, 当参考数据 Landsat 影像在近红外波段的离水反射率 $\rho_{w, NIR}$ 介于 0.008~0.060 范围时, 定义为高浑浊水体; 当 $\rho_{w, NIR}$ 在 0.060~0.200 范围时, 定义为极度浑浊水体, 以识别和确定黄河口不同浑浊程度的水体类型。

表 1 水体浑浊程度分类

Table 1 Classification of turbidity degree of water

| Type of water | Total Suspended Matter/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) | $\rho_{w, NIR}$ |
|------------------------|--|-----------------|
| Highly turbid water | 10~100 | 0.008~0.060 |
| Extremely turbid water | 100~1000+ | 0.060~0.200 |

1.3 数据

本研究所用卫星遥感数据包括 L7-ETM+、L8-OLI、S2-MSI 和 S3-OLCI 影像, 具体参数详见表 2。其中 ETM+ 和 OLI 数据从美国地质调查局 (USGS) 地球资源探测器获取, MSI 和 OLCI 数据则从欧洲航天局哥白尼开放中心获取。

L7-ETM+ 和 L8-OLI 影像的空间分辨率为 30 m, 分别包含 7 个和 9 个波段; S2-MSI 的空间分辨率分为

10、20、60 m三种,共有13个波段,涵盖可见光到短波红外波段;S3-OLCI的空间分辨率为300 m,波段范围覆盖从可见光到近红外,共有21个波段。总体上,S2-MSI和S3-OLCI的光谱分辨率高于L8-OLI和L7-ETM+,且波段宽度较窄。所有影像在550 nm处的气溶胶光学厚度 τ_{550} 总体小于0.6。气溶胶数据来自MODIS的MCD19A2产品。

采用已被验证在黄河口水体有很好适用性的ACOLITE DSF算法校正的Landsat产品作为参考^[26,27],通过对S2-MSI和S3-OLCI与L7-ETM+/L8-OLI进行星星匹配来验证S2-MSI和S3-OLCI的大气校正算法产品在黄河口水体的适用性。

表2 各影像的获取时间、空间分辨率、气溶胶光学厚度 τ_{550} 及传感器类型

Table 2 The acquisition time, spatial resolution, aerosol optical thickness τ_{550} and sensor types of each image

| Image date | Acquisition time | Spatial resolution /m | τ_{550} | Sensor |
|------------|------------------|-----------------------|--------------|--------|
| 2017-10-24 | 10:44 | 30 | 0.42 | ETM+ |
| 2018-04-02 | 10:42 | 30 | 0.60 | ETM+ |
| 2018-09-09 | 10:40 | 30 | < 0.1 | ETM+ |
| 2019-02-16 | 10:35 | 30 | 0.09 | ETM+ |
| 2019-01-23 | 10:41 | 30 | 0.13 | OLI |
| 2019-03-12 | 10:41 | 30 | 0.10 | OLI |
| 2017-10-24 | 10:47 | 10、20、60 | 0.42 | MSI |
| 2018-04-02 | 10:45 | 10、20、60 | 0.60 | MSI |
| 2018-09-09 | 10:45 | 10、20、60 | < 0.1 | MSI |
| 2019-02-16 | 10:48 | 10、20、60 | 0.09 | MSI |
| 2017-10-24 | 10:02 | 300 | 0.42 | OLCI |
| 2018-09-09 | 10:05 | 300 | < 0.1 | OLCI |
| 2019-01-23 | 10:41 | 300 | 0.13 | OLCI |
| 2019-02-16 | 10:18 | 300 | 0.09 | OLCI |
| 2019-03-12 | 10:35 | 300 | 0.10 | OLCI |

2 研究方法

2.1 大气校正算法

针对S2-MSI和S3-OLCI影像所测试的大气校正算法以及版本信息如表3所示。

表3 S2-MSI和S3-OLCI测试的大气校正算法列表

Table 3 List of atmospheric correction algorithms tested for S2-MSI and S3-OLCI

| Atmospheric correction processor | Version/Software | Sentinel satellite and sensor | |
|----------------------------------|------------------|-------------------------------|---------|
| | | S2-MSI | S3-OLCI |
| ACOLITE | 20210802/ACOLITE | √ | √ |
| iCOR | 3.0.0/SNAP 8.0 | √ | √ |
| C2RCC | 2.1/SNAP 8.0 | √ | √ |
| FLAASH | - /ENVI 5.6 | √ | √ |
| Sen2Cor | 2.9.0/Sen2Cor | √ | |

注: √表示可对该卫星传感器进行大气校正

ACOLITE是由RBINS (Royal Belgian Institute of Natural Sciences) 开发的用于沿海和内陆水体的大气校正通用处理器。ACOLITE DSF通过6SV模型获得的查找表进行瑞利散射校正并基于暗目标进行气溶胶的校正^[36,37]。ACOLITE DSF在Landsat-5/7/8和Sentinel-2的应用上均有很好的效果^[38]。在2021年8月份的版本(v20210802.0)中新增了S3-OLCI传感器的大气校正^[19]。本研究均采用ACOLITE(v20210802.0)版本中的DSF算法进行L7-ETM+、L8-OLI、S2-MSI和S3-OLCI的大气校正。

iCOR是基于MODTRAN-5模型的大气校正工具^[17],可实现陆地、内陆水体和沿岸水体的大气校正。也可实现临近像元的校正,从而改善影像在水陆边界处的质量^[39]。iCOR能较准确地估计气溶胶光学厚度,进而得到水体离水反射率和地表反射信息^[40]。本研究应用2021年5月10日新发布的iCOR VERSION 3.0版本进行大气校正。新版本针对耀斑校正、OLCI地理位置信息、农村或沙漠气溶胶模型选择等进行了算法改进。

C2RCC算法是基于神经网络技术的“二类水体区域性近岸海洋水色”大气校正算法^[41],最初由Doerffer等^[42]为校正MERIS传感器而开发的,欧空局对其进行了改进,使其覆盖大范围的水体散射和吸收系数,适用于S3-OLCI和S2-MSI等在轨运行的卫星数据。本研究使用SNAP工具箱v.8.0中的C2RCC S3-OLCI或C2RCC S2-MSI处理器对哨兵数据进行大气校正。

FLAASH大气校正是基于MODTRAN-5.2辐射传输模型的大气校正,同时也是基于像元的校正^[8]。进行FLAASH大气校正前需要进行辐射定标,将像元值转换为对应像元的辐射值,最后经过FLAASH大气校正可以输出表面反射率。本研究采用ENVI 5.6中的FLAASH模块进行黄河口的大气校正,由于黄河口易受到大陆气溶胶的影响,因此,将气溶胶模型设置为Rural^[43]。

Sen2Cor是欧空局(ESA)专门为Sentinel-2数据开发的用于大气校正的处理器^[12,44],是一种半经验算法,结合了从影像本身获得的参数和基于预先计算的libRadtran辐射传输模型查找表来进行大气校正^[45],该算法的优点是可以广泛应用于不同的场合,且无需复杂的参数输入,便于用户使用。本研究使用Sen2Cor v2.9对S2-MSI数据进行处理。

2.2 星星匹配

对S2-MSI和S3-OLCI与已被验证在黄河口水体有很好适用性的ACOLITE校正的L7-ETM+/L8-OLI影像进行匹配。已获得3景与L7-ETM+匹配的S2-MSI影像,影像日期分别为2018年4月2日、2018年9月9日和2019年2月16日;同时获得4景与L7-ETM+和L8-OLI匹配的S3-OLCI影像,影像日期分别为2018年9月9日、2019年1月23日、2019年2月16日和2019年3月12日(参见表2)。另外,使用2017年10月24日的影像进行不同传感器的ACOLITE DSF算法对比。

所有影像匹配的时间窗口均不超过42 min。在空间匹配上,使用最邻近重采样方法将高空间分辨率的影像重采样到低空间分辨率的影像,S2-MSI(10 m)重采样到与L7-ETM+影像同样的空间分辨率(30 m),L7-ETM+/L8-OLI影像(30 m)重采样到与S3-OLCI同样的空间分辨率(300 m)。在波段匹配上,Renosh等^[22]利用实测的高光谱反射率数据和光谱响应函数计算得到等效OLI、MSI和OLCI的绿、红和近红外波段的反射率值,通过两两对比发现各波段之间一致性很高,基本分布在1:1线上,这表明可以在不考虑光谱响应函数的情况下进行不同传感器之间的对应波段比较。因此,选取与L7-ETM+或L8-OLI参考波段匹配的S2-MSI和S3-OLCI对应波段,其中,L7-ETM+的中心波长分别为561、661、835 nm;L8-OLI的中心波长分别为561、655、865 nm;S2-MSI对应波段的中心波长分别为559、665、833 nm;S3-OLCI对应波段的中心波长分别

为560、665、865 nm。上述匹配的绿、红和近红外波段常用于黄河口悬沙浓度反演。

2.3 对比验证

根据表1中水体浑浊程度分类,在Landsat影像中选取高浑浊水体和极度浑浊水体,分别获得S2-MSI和S3-OLCI与Landsat传感器匹配的不同浑浊水体像元,像元数如表4所示。

表4 S2-MSI/S3-OLCI与Landsat传感器的匹配像元数

Table 4 Total match-up pixel numbers of S2-MSI/S3-OLCI with Landsat sensors

| Type of water | Sensor | Total number of pixels |
|------------------------|--------|------------------------|
| Highly turbid water | MSI | 674303 |
| | OLCI | 6699 |
| Extremely turbid water | MSI | 382878 |
| | OLCI | 1897 |

采用不同的大气校正算法对S2-MSI和S3-OLCI影像进行校正,获得各自的离水反射率产品。分别在高浑浊和极度浑浊水体条件下,采用已被验证在黄河口水体有很好适用性的ACOLITE DSF算法处理的L7-ETM+/L8-OLI绿、红、近红外波段的离水反射率产品作为参考,分别进行S2-MSI和S3-OLCI各波段的离水反射率产品与Landsat参考产品在黄河口水体的一致性评估。此外,对ETM+、MSI、OLCI不同传感器的ACOLITE DSF算法校正的离水反射率产品进行比较。

2.4 统计指标

利用决定系数 R^2 、均方根误差 E_{RMS} 、平均百分比相对误差 E_{MARD} 和偏差 S_{Bia} 评估不同大气校正算法获得的S2-MSI和S3-OLCI离水反射率产品与参考离水反射率产品之间的差异。其中, R^2 用于反映算法结果与参考数据的回归拟合程度; E_{RMS} 用于衡量各算法校正结果与参考数据的偏差; E_{MARD} 通过计算相对误差的均值来表示各算法结果的相对精度; S_{Bia} 用于判断各算法校正结果相对参考数据整体偏高或偏低的程度,正值表示偏高,负值表示偏低。 E_{RMS} 、 E_{MARD} 和 S_{Bia} 的计算公式分别为

$$E_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}, \quad (1)$$

$$E_{\text{MARD}} = \sum_{i=1}^N \frac{|y_i - x_i|}{0.5(y_i + x_i)N} \times 100\%, \quad (2)$$

$$S_{\text{Bia}} = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - x_i)}{\sum_{i=1}^N x_i} \times 100\%, \quad (3)$$

式中 N 为数据总量, x_i 和 y_i 分别表示第 i 个点的参考离水反射率和不同大气校正算法的离水反射率值。

3 结果

3.1 不同浑浊程度水体条件下的大气校正算法对比

S2-MSI在不同浑浊程度水体条件下的大气校正算法对比结果如图2所示。由图可知,对于极度浑浊水

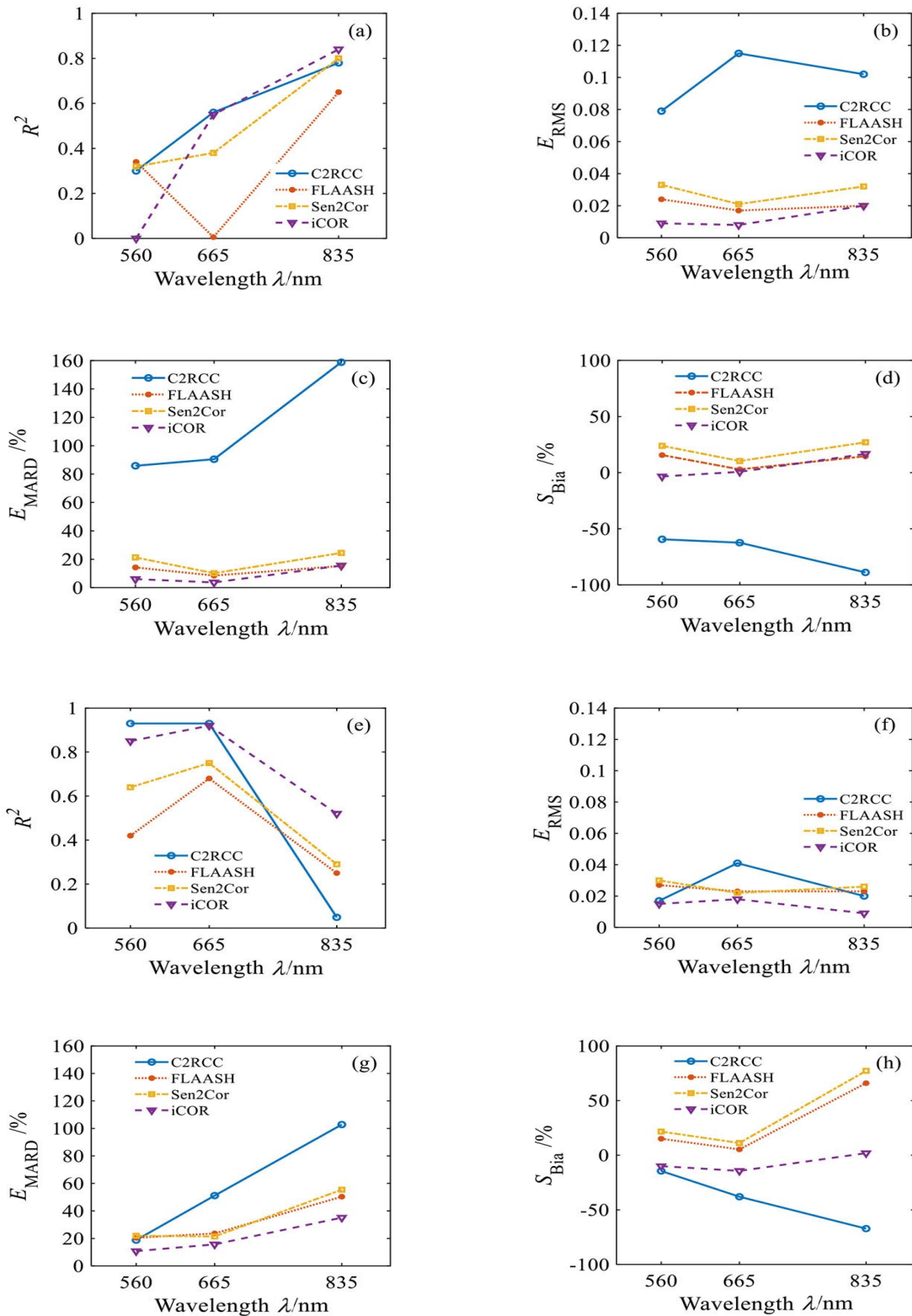


图2 S2-MSI不同大气校正算法在黄河口水体的精度评价。(a)–(d) 极度浑浊水体; (e)–(h) 高浑浊水体
 Fig. 2 Accuracy evaluation of different atmospheric correction algorithms for S2-MSI in YRE. (a)–(d) Extremely turbid water;
 (e)–(h) highly turbid water

体, iCOR 算法校正结果与 ACOLITE DSF 算法较一致, E_{RMS} 、 E_{MARD} 、 S_{Bia} 均较小; FLAASH 与 Sen2Cor 算法效果仅次于 iCOR, 且两者较相似; C2RCC 存在较高的不确定性, E_{RMS} 、 E_{MARD} 、 S_{Bia} 误差在绿、红和近红外波段均较大。对于高浑浊水体, iCOR 算法表现较好, 但在近红外波段误差较极度浑浊水体增大。FLAASH、Sen2Cor 算法则整体误差增大, 尤其在近红外波段, E_{MARD} 大于 50%, S_{Bia} 大于 60%, 存在高估现象。C2RCC 算法效果相较于在极度浑浊水体中有所提高, E_{RMS} 、 E_{MARD} 和 S_{Bia} 误差在绿、红和近红外波段均减小, 但依旧低估离水反射率 ($S_{Bia} < 0$)。

如表 5 所示, iCOR、FLAASH、Sen2Cor 算法校正的 S2-MSI 离水反射率产品在黄河口水体随着浑浊程度的增加, 误差减小, 其中 iCOR 误差最小, 尤其是对于极度浑浊水体 ($E_{MARD} < 16\%$), 其中 FLAASH 和 Sen2Cor 算法误差较为一致。C2RCC 算法结果整体偏低, 尤其是在极度浑浊水体中误差最大 ($E_{MARD} > 85\%$)。

表 5 S2-MSI 不同大气校正算法在不同浑浊程度水体的精度评价

Table 5 Accuracy evaluation of different atmospheric correction algorithms for S2-MSI data in water with different turbidity

| Algorithm | Band | Extremely turbid water | | | | Highly turbid water | | | |
|-----------|---------------|------------------------|-----------|---------------|--------------|---------------------|-----------|---------------|--------------|
| | | R^2 | E_{RMS} | $E_{MARD}/\%$ | $S_{Bia}/\%$ | R^2 | E_{RMS} | $E_{MARD}/\%$ | $S_{Bia}/\%$ |
| C2RCC | Green | 0.30 | 0.079 | 85.87 | -59.37 | 0.93 | 0.017 | 18.77 | -14.44 |
| | Red | 0.56 | 0.115 | 90.49 | -62.39 | 0.93 | 0.041 | 51.16 | -37.99 |
| | NIR | 0.78 | 0.102 | 158.82 | -88.88 | 0.05 | 0.020 | 102.81 | -67.18 |
| | Green+Red+NIR | 0.31 | 0.099 | 112.89 | -68.89 | 0.90 | 0.029 | 56.21 | -30.01 |
| FLAASH | Green | 0.34 | 0.024 | 14.22 | 15.65 | 0.42 | 0.027 | 20.44 | 15.08 |
| | Red | 0.006 | 0.017 | 8.49 | 2.93 | 0.68 | 0.023 | 23.64 | 5.32 |
| | NIR | 0.65 | 0.020 | 15.28 | 14.63 | 0.25 | 0.023 | 50.36 | 65.93 |
| | Green+Red+NIR | 0.81 | 0.020 | 12.60 | 9.77 | 0.73 | 0.025 | 31.16 | 16.21 |
| Sen2Cor | Green | 0.32 | 0.033 | 21.28 | 23.90 | 0.64 | 0.030 | 21.92 | 21.62 |
| | Red | 0.38 | 0.021 | 10.14 | 10.38 | 0.75 | 0.022 | 21.44 | 11.17 |
| | NIR | 0.80 | 0.032 | 24.46 | 27.04 | 0.29 | 0.026 | 55.45 | 77.21 |
| | Green+Red+NIR | 0.88 | 0.025 | 15.15 | 15.88 | 0.79 | 0.026 | 32.72 | 23.04 |
| iCOR | Green | 0.0007 | 0.009 | 6.03 | -3.40 | 0.85 | 0.015 | 10.76 | -10.01 |
| | Red | 0.55 | 0.008 | 3.65 | 0.76 | 0.92 | 0.018 | 15.68 | -14.35 |
| | NIR | 0.84 | 0.020 | 15.53 | 16.73 | 0.52 | 0.009 | 35.11 | 1.88 |
| | Green+Red+NIR | 0.84 | 0.014 | 8.42 | 3.74 | 0.93 | 0.014 | 20.12 | -10.65 |

对于 S3-OLCI (图 3), 在极度浑浊水体中, iCOR 和 FLAASH 算法整体上表现出较好的效果, 各误差相较于 C2RCC 算法更小, 其中 iCOR 算法效果要略优于 FLAASH 算法。C2RCC 算法在绿波段较好, 在红、近红外波段的误差较大, 表现较差, 且总体存在低估现象。在高浑浊水体中, iCOR 和 FLAASH 算法校正结果在近红外波段误差增大, E_{MARD} 大于 30%。而 C2RCC 算法在高浑浊水体的误差 E_{RMS} 、 E_{MARD} 和 S_{Bia} 相较于极度浑浊水体的均有所减小。

由表 6 可知, 对于 S3-OLCI, iCOR 和 FLAASH 算法在极度浑浊水体的应用效果好于高浑浊水体, 其中 iCOR 算法效果略优于 FLAASH 算法; C2RCC 算法则相反, 在高浑浊水体的应用效果比在极度浑浊水体中

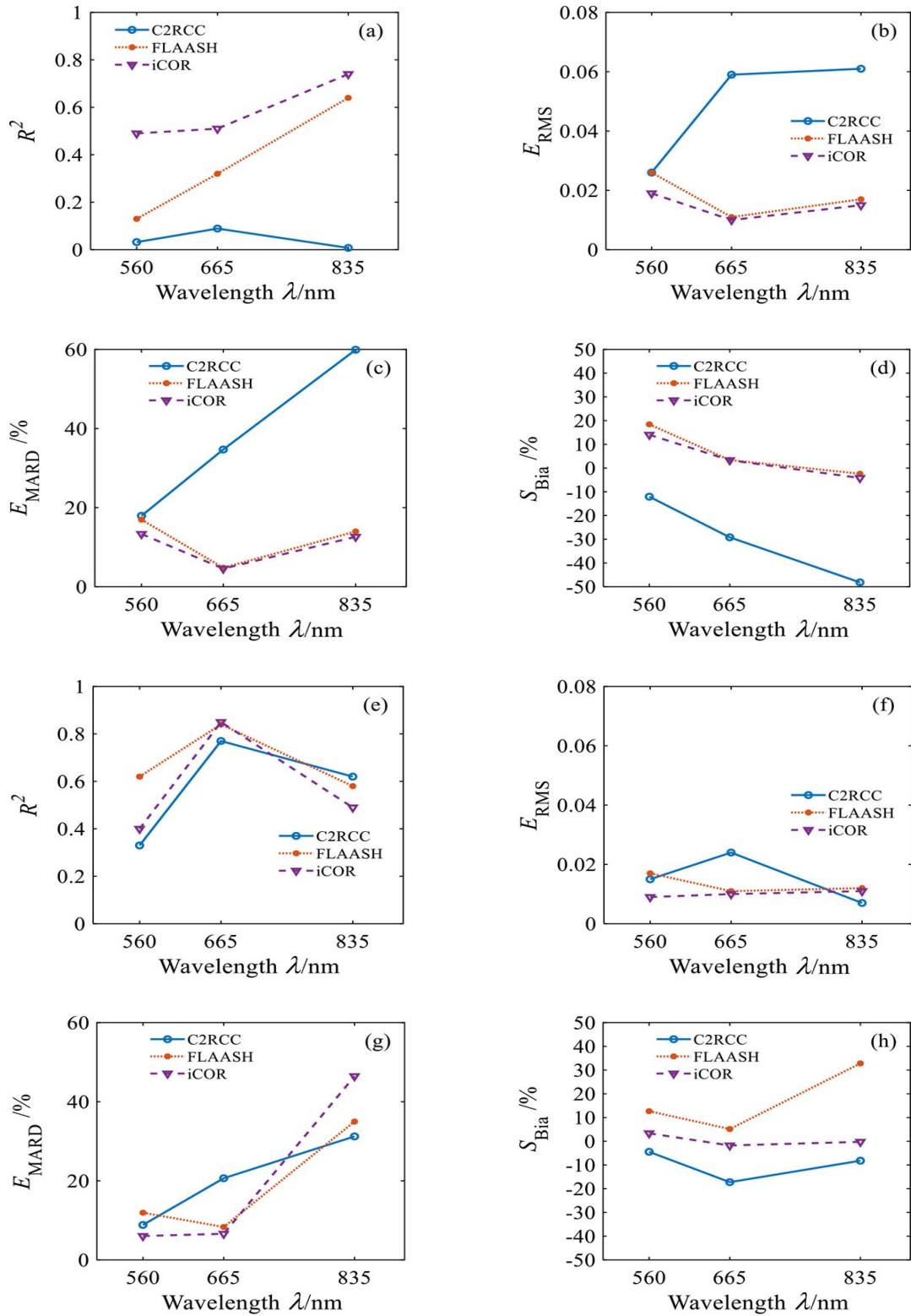


图3 S3-OLCI不同大气校正算法在黄河口水体的精度评价。(a)–(d) 极度浑浊水体；(e)–(h) 高浑浊水体

Fig. 3 Accuracy evaluation of different atmospheric correction algorithms for S3-OLCI in YRE. (a)–(d) Extremely turbid water; (e)–(h) highly turbid water

要好,误差更小。

表6 S3-OLCI不同大气校正算法在不同浑浊程度水体的精度评价

Table 6 Accuracy evaluation of different atmospheric correction algorithms for S3-OLCI data in water with different turbidity

| Algorithm | Band | Extremely turbid water | | | | Highly turbid water | | | |
|-----------|-------------------|------------------------|-----------|---------------|--------------|---------------------|-----------|---------------|--------------|
| | | R^2 | E_{RMS} | $E_{MARD}/\%$ | $S_{Bia}/\%$ | R^2 | E_{RMS} | $E_{MARD}/\%$ | $S_{Bia}/\%$ |
| C2RCC | Green | 0.03 | 0.026 | 17.93 | -12.06 | 0.33 | 0.015 | 8.85 | -4.44 |
| | Red | 0.09 | 0.059 | 34.69 | -29.18 | 0.77 | 0.024 | 20.65 | -17.23 |
| | NIR | 0.008 | 0.061 | 59.92 | -48.18 | 0.62 | 0.007 | 31.23 | -8.19 |
| | Green + Red + NIR | 0.42 | 0.052 | 38.07 | -29.51 | 0.91 | 0.017 | 20.17 | -10.62 |
| FLAASH | Green | 0.13 | 0.026 | 16.96 | 18.42 | 0.62 | 0.017 | 11.94 | 12.69 |
| | Red | 0.32 | 0.011 | 4.79 | 3.39 | 0.84 | 0.011 | 8.33 | 5.15 |
| | NIR | 0.64 | 0.017 | 13.97 | -2.39 | 0.58 | 0.012 | 34.98 | 32.82 |
| | Green + Red + NIR | 0.81 | 0.019 | 11.89 | 6.20 | 0.96 | 0.014 | 18.38 | 11.06 |
| iCOR | Green | 0.49 | 0.019 | 13.33 | 14.04 | 0.40 | 0.009 | 6.04 | 3.35 |
| | Red | 0.51 | 0.010 | 4.57 | 3.32 | 0.85 | 0.010 | 6.61 | -1.76 |
| | NIR | 0.74 | 0.015 | 12.62 | -4.18 | 0.49 | 0.011 | 46.45 | -0.24 |
| | Green + Red + NIR | 0.87 | 0.015 | 10.12 | 4.37 | 0.96 | 0.010 | 19.62 | 0.58 |

总体而言,针对黄河口高浑浊-极度浑浊水体,校正S2-MSI和S3-OLCI的各算法中,iCOR算法的离水反射率产品与参考产品的一致性最高,其次为FLAASH和Sen2Cor算法,C2RCC算法表现相对较差。整体上,iCOR、FLAASH和Sen2Cor算法除在高浑浊水体的近红外波段平均百分比相对误差 E_{MARD} 超过34%外,在绿、红波段的 E_{MARD} 均小于24%,其中Sen2Cor算法结果整体上与FLAASH的相似。iCOR、FLAASH和Sen2Cor算法随着水体浑浊程度增加,误差越小;而C2RCC算法则随着水体浑浊程度的增加,误差越大,且整体存在低估离水反射率的现象。

3.2 不同传感器的ACOLITE DSF算法产品对比

从ETM+、MSI、OLCI影像在绿、红和近红外波段的离水反射率空间分布图(图4)可以看出,S2-MSI与L7-ETM+的空间分布较相似,而S3-OLCI与L7-ETM+的空间分布存在一定偏差。在绿波段和红波段,ACOLITE DSF算法校正的S3-OLCI影像在沿岸呈现比S2-MSI和L7-ETM+更高的离水反射率。在近红外波段,S3-OLCI在离岸区域的 ρ_w 偏低,且存在少量负值。

由图5可知,ACOLITE DSF算法校正的S2-MSI与L7-ETM+的离水反射率较为一致,在绿波段和红波段, E_{MARD} 均低于6%,在近红外波段误差有所增加, E_{MARD} 约为25%。S3-OLCI的离水反射率在红波段与L7-ETM+的较一致, E_{MARD} 约为13%,在绿波段和近红外波段误差较大, E_{MARD} 分别约为26%和51%。

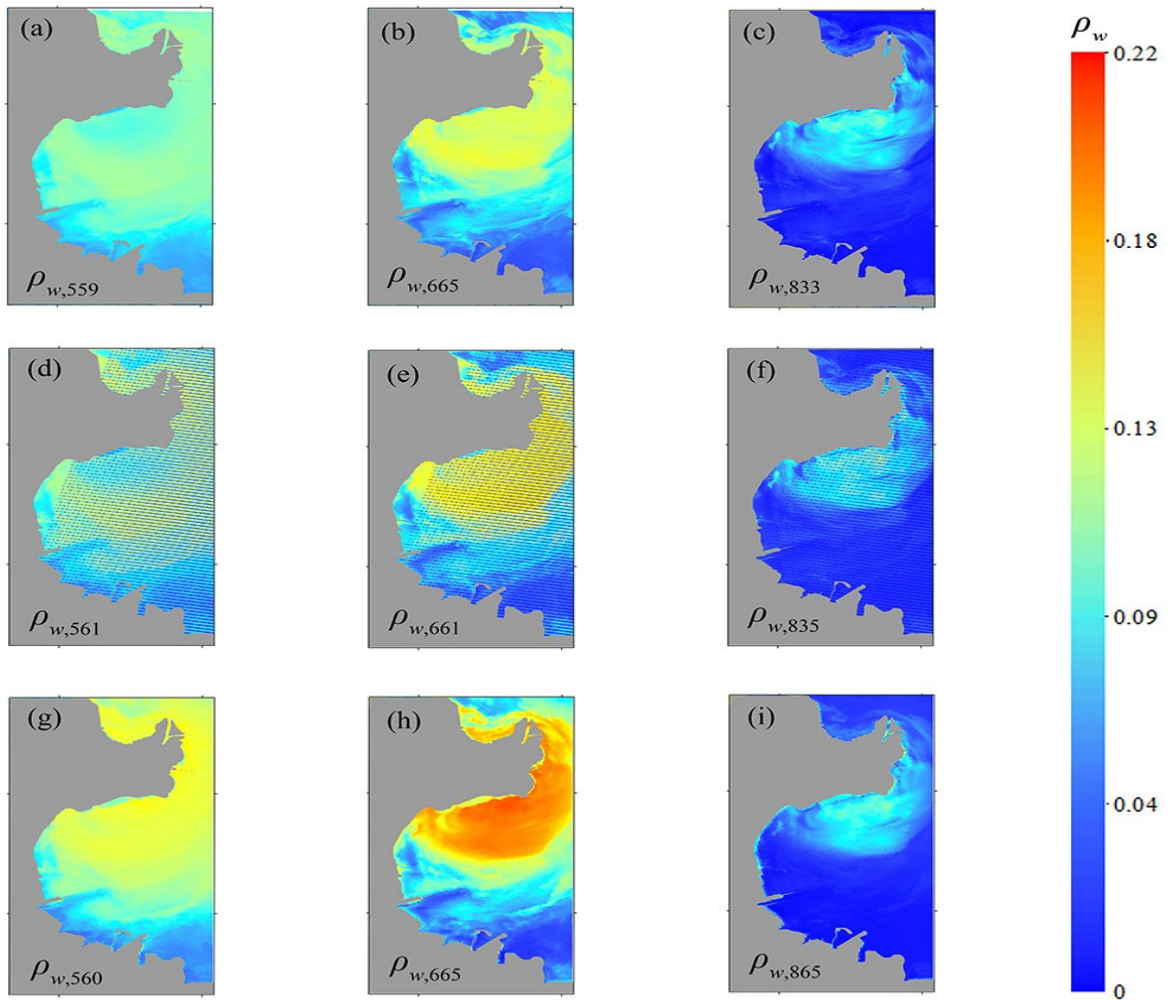


图4 ACOLITE DSF算法校正的S2-MSI、L7-ETM+和S3-OLCI影像在绿、红和近红外波段的离水反射率的空间分布。

(a)–(c) S2-MSI; (d)–(f) L7-ETM+; (g)–(i) S3-OLCI

Fig. 4 The spatial distribution of water-leaving reflectance ρ_w derived by ACOLITE DSF algorithm for S2-MSI, L7-ETM+ and S3-OLCI in green, red and near-infrared bands. (a)–(c) S2-MSI; (d)–(f) L7-ETM+; (g)–(i) S3-OLCI

4 讨论

4.1 高浑浊水体条件下各算法的不一致性

C2RCC算法在黄河口大气校正中存在明显低估现象,尤其是在极度浑浊水体条件下低估现象更为明显。究其原因可以发现,C2RCC是基于大型数据库利用神经网络进行模拟训练的算法,数据主要采集于欧洲大洋水体^[41],水体较为清洁,校正结果很大程度上受训练数据影响^[18,46],导致在高浑浊水体中并不适用^[47]。虽然C2RCC算法在处理S2-MSI影像时结果较差,尤其在红波段和近红外波段存在低估现象,但在处理S3-OLCI影像时效果较好。原因可能在于C2RCC最初是由Doerffer等^[42]为校正MERIS传感器而开发的,而S3-OLCI是MERIS的后继星,所以C2RCC在处理S3-OLCI数据上较S2-MSI更具有适用性。

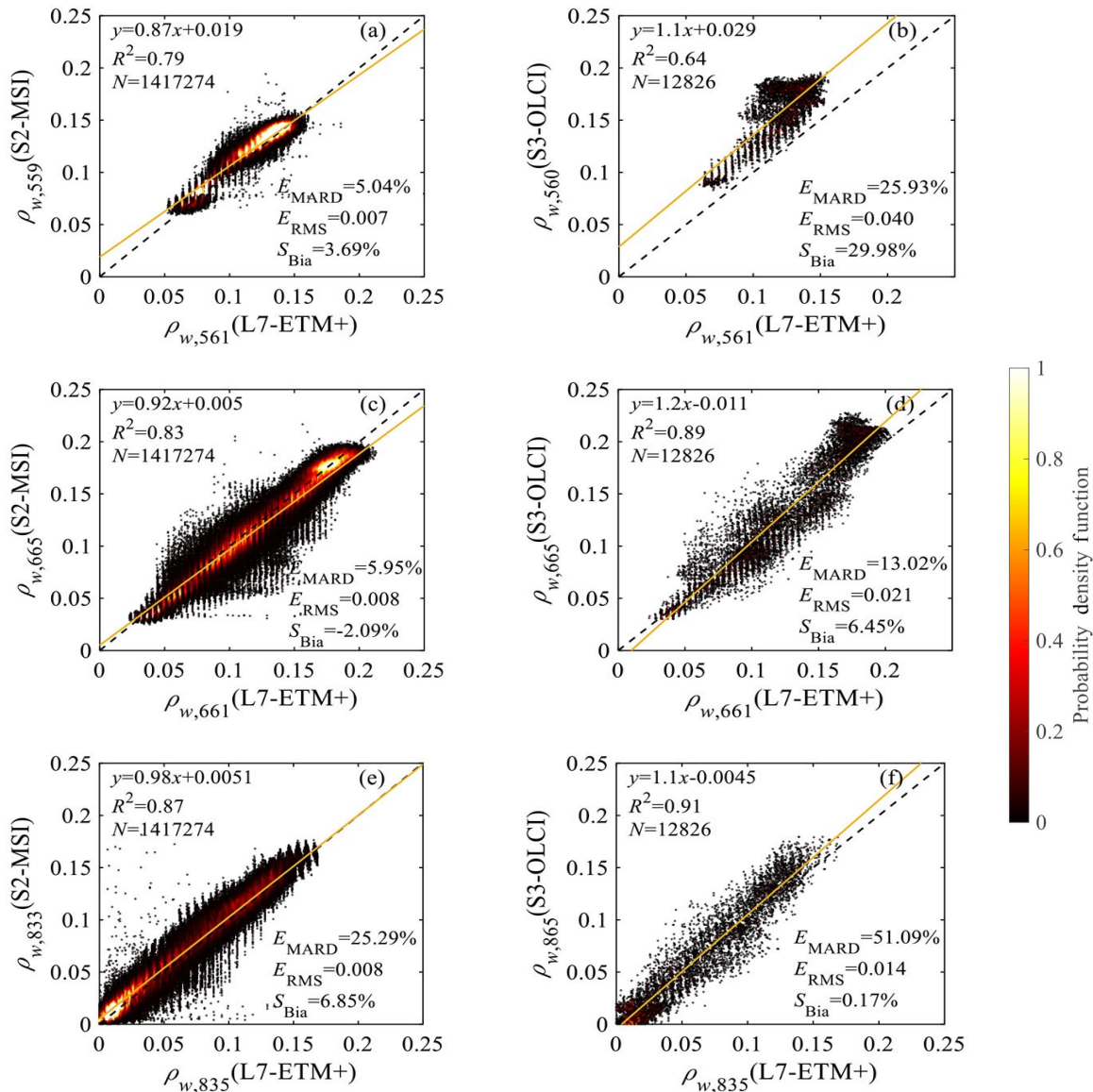


图 5 ACOLITE DSF 算法校正的不同传感器间离水反射率对比散点图。(a)、(b) 绿波段; (c)、(d) 红波段; (e)、(f) 近红外波段

Fig. 5 Scatterplots of the comparison of ρ_w between different sensors corrected by ACOLITE DSF algorithm. (a), (b) Green band;

(c), (d) red band; (e), (f) near-infrared band

Sen2Cor 和 FLAASH 算法存在一定程度的偏高, 尤其是在绿波段和近红外波段。FLAASH 和 Sen2Cor 算法最初是为校正陆地而设计^[48,49], 在陆地较少的河口地区, 可能会低估气溶胶而导致校正不足, 从而存在高估离水反射率的现象。虽然 FLAASH 和 Sen2Cor 算法可用于沿岸和内陆水体的大气校正, 但主要还是应用于土地监测等方面。

iCOR 算法除在近红外波段误差较大外, 整体表现较好。但当使用旧版本 iCOR 2.9 处理 S2-MSI 卫星数据时, 在近红外波段误差明显, 且存在大范围的负值, 与 De Keukelaere 等^[17]得出的结论相同。最新版本 iCOR 3.0 针对耀斑校正等对算法进行了改进, 本研究采用新版 iCOR 3.0 对影像进行了处理, 虽然在近红外波段仍存在一定误差, 但结果有了很大改善。此外, iCOR 算法可进行邻近像元校正^[50], 这对于校正像黄河口这样的沿岸水体有一定优势。

4.2 传感器的差异对结果的影响

ACOLITE DSF 在 V20210802 版本中新增了 S3-OLCI 的大气校正, 在比利时沿海有较好的校正效果^[19], 然而应用于黄河口高浑浊水体时, 在 S3-OLCI 的绿波段存在高估现象, 尤其在极度浑浊水体。ACOLITE DSF 算法在处理 S2-MSI 时效果更好, L7-ETM+ 和 S2-MSI 的一致性比 L7-ETM+ 和 S3-OLCI 的一致性更高。ACOLITE 最初是为校正高空间分辨率甚至米级分辨率卫星影像而设计, S3-OLCI 空间分辨率低于 S2-MSI 和 L7-ETM+, 因此, 可能导致应用于 S3-OLCI 时效果不如空间分辨率高的 S2-MSI 和 L7-ETM+。

另外, OLCI、MSI 卫星过境时间与 ETM 或 OLI 的过境时间相差最大为 42 min, 由此也会给对比结果带来一定误差。究其原因, 黄河口是具有高动态变化特征的水域, 即使是在短时间内, 也会导致水体的光学特性发生改变, 尤其是在河口的河流羽边界处易发生明显的浊-清水体分界线的位移变化。由于潮汐等随着时间差异的变化使得水体发生一定改变从而带来误差。此外, 不同的观测几何, 如太阳、传感器和陆地的相互位置, 以及它们的信噪比, 都会影响实际结果^[50,51]。因此, 即使是同样的算法, 在应用于不同传感器时仍会因为传感器的差异和水文条件的高动态变化导致算法结果存在系统误差。

5 结 论

针对黄河口高浑浊和极度浑浊水体, 以在黄河口水体有很好适用性的 ACOLITE DSF 算法校正后的 Landsat 离水反射率产品为参考, 开展了基于典型且开源的 4 种大气校正算法的 Sentinel-2-MSI (S2-MSI) 和 Sentinel-3-OLCI (S3-OLCI) 的离水反射率产品与参考产品的一致性评估, 结果如下:

对于 S2-MSI 和 S3-OLCI, 各算法产品在绿、红和近红外波段的评价结果显示, iCOR、FLAASH 和 Sen2Cor 算法除在黄河口高浑浊水体的近红外波段平均百分比相对误差超过 34% 外, 在绿、红波段的平均百分比相对误差均小于 24%, iCOR、FLAASH 和 Sen2Cor 算法随着水体浑浊程度增加, 误差越小, C2RCC 算法则与之相反, 且整体存在低估现象。其中 iCOR 算法可以实现邻近像元校正和耀斑校正, 总体上误差较小; 而 FLAASH 和 Sen2Cor 算法存在一定高估现象, 可能与它们最初是为校正陆地而设计的有关; C2RCC 算法受训练数据影响导致校正结果低估, 在极度浑浊水体尤为明显。总体上, iCOR 算法校正的 S2-MSI 和 S3-OLCI 离水反射率产品与参考产品一致性最高, 误差最小, 可用于黄河口高浑浊-极度浑浊水体的大气校正。

此外, S2-MSI 和 L7-ETM+ 的 ACOLITE DSF 算法校正结果一致, 而 S3-OLCI 的 ACOLITE DSF 算法校正结果与前两者有一定差异。除传感器差异外, 在水体光学性质高动态变化的黄河口, 卫星过境时间差异也会影响对比结果。

该研究结果可为利用 Sentinel 系列产品在近岸高浊度二类水体中开展大气校正提供参考, 并为黄河口悬沙的高精度反演及高时空动态监测打下基础, 具有一定的理论和现实意义。未来有望在黄河口地区增加自动观测站来采集水色要素和光谱数据等, 以便进行严格的星地匹配, 并针对不同的水体情况进行更多的验证。值得一提的是各算法仍保持积极更新和改进中, 这将为利用高分辨率卫星进一步实现高精度水色遥感反演提供有力支撑。

参考文献:

- [1] Gordon H R. Removal of atmospheric effects from satellite imagery of the oceans [J]. *Applied Optics*, 1978, 17(10): 1631-1636.
- [2] Ruddick K G, Ovidio F, Rijkeboer M. Atmospheric correction of SeaWiFS imagery for turbid coastal and inland waters [J]. *Applied Optics*, 2000, 39(6): 897-912.
- [3] Liu D Z, Fu D Y. Atmospheric correction of Hyperion imagery over estuarine waters: A case study of the Pearl River Estuary in southern China [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2017, 38(1): 199-210.
- [4] Groom S, Sathyendranath S, Ban Y, et al. Satellite Ocean colour: Current status and future perspective [J]. *Frontiers in Marine Science*, 2019, 6: 485.
- [5] Hadjimitsis D G, Clayton C R I, Hope V S. An assessment of the effectiveness of atmospheric correction algorithms through the remote sensing of some reservoirs [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(18): 3651-3674.
- [6] Bilal M, Qiu Z F, Wang Y, et al. Comparison between SREM and 6SV atmospheric correction methods [C]. *2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS*. July 11-16, 2021, Brussels, Belgium. IEEE, 2021: 1434-1436.
- [7] Martins V S, Barbosa C C F, de Carvalho L A S, et al. Assessment of atmospheric correction methods for Sentinel-2 MSI images applied to Amazon floodplain lakes [J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(4): 322.
- [8] Matthew M W, Adler-Golden S M, Berk A, et al. Status of atmospheric correction using a MODTRAN4-based algorithm [C]. *Algorithms for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery VI, SPIE Proceedings*. Orlando, FL. SPIE, 2000, 4049: 199-207.
- [9] Berk A, Anderson G P, Acharya P K, et al. MODTRAN5: 2006 update [C]. *Proceedings of SPIE 6233, Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery XII*, 2006, 62331F: 1-8.
- [10] Sterckx S, Knaeps E, Adriaensen S, et al. Opera: An atmospheric correction for land and water [C]. *Proceedings of the Sentinel-3 for Science Workshop*, June 2-5, 2015, Venice, Italy. 2015, 1: 3-6.
- [11] Vanhellemont Q, Ruddick K. Acolite for Sentinel-2: Aquatic applications of MSI imagery [C]. *Proceedings of the 2016 ESA Living Planet Symposium*, May 9-13, 2016, Prague, Czech Republic. 2016: 9-13.
- [12] Müller-Wilm U, Louis J, Richter R, et al. Sentinel-2 level 2A prototype processor: Architecture, algorithms and first results [C]. *Proceedings of the ESA Living Planet Symposium*, Edinburgh, UK. 2013: 9-13.
- [13] Pereira-Sandoval M, Ruescas A, Urrego P, et al. Evaluation of atmospheric correction algorithms over Spanish inland waters for Sentinel-2 multi spectral imagery data [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(12): 1469.
- [14] Warren M A, Simis S G H, Martinez-Vicente V, et al. Assessment of atmospheric correction algorithms for the Sentinel-2A MultiSpectral Imager over coastal and inland waters [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 225: 267-289.
- [15] König M, Hieronymi M, Oppelt N. Application of Sentinel-2 MSI in Arctic research: Evaluating the performance of atmospheric correction approaches over Arctic Sea ice [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2019, 7: 22.
- [16] Giannini F, Hunt B P V, Jacoby D, et al. Performance of OLCI Sentinel-3A satellite in the Northeast Pacific coastal waters [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 256: 112317.
- [17] De Keukelaere L, Sterckx S, Adriaensen S, et al. Atmospheric correction of Landsat-8/OLI and Sentinel-2/MSI data using iCOR algorithm: Validation for coastal and inland waters [J]. *European Journal of Remote Sensing*, 2018, 51(1): 525-542.
- [18] Pahlevan N, Mangin A, Balasubramanian S V, et al. ACIX-Aqua: A global assessment of atmospheric correction methods for Landsat-8 and Sentinel-2 over lakes, rivers, and coastal waters [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 258: 112366.
- [19] Vanhellemont Q, Ruddick K. Atmospheric correction of Sentinel-3/OLCI data for mapping of suspended particulate matter and chlorophyll-a concentration in Belgian turbid coastal waters [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 256: 112284.
- [20] Novoa S, Doxaran D, Ody A, et al. Atmospheric corrections and multi-conditional algorithm for multi-sensor remote sensing

- of suspended particulate matter in low-to-high turbidity levels coastal waters [J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(1): 61.
- [21] Normandin C, Lubac B, Sottolichio A, *et al.* Analysis of suspended sediment variability in a large highly turbid estuary using a 5-year-long remotely sensed data archive at high resolution [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2019, 124(11): 7661-7682.
- [22] Renosh P R, Doxaran D, De Keukelaere L, *et al.* Evaluation of atmospheric correction algorithms for Sentinel-2-MSI and Sentinel-3-OLCI in highly turbid estuarine waters [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(8): 1285.
- [23] Du Y F, Lin H Y, He S Y, *et al.* Tide-induced variability and mechanisms of surface suspended sediment in the Zhoushan Archipelago along the southeastern coast of China based on GOCI data [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(5): 929.
- [24] Luo W, Shen F, He Q, *et al.* Changes in suspended sediments in the Yangtze River Estuary from 1984 to 2020: Responses to basin and estuarine engineering constructions [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 805: 150381.
- [25] Qiu Z F, Xiao C, Perrie W, *et al.* Using Landsat 8 data to estimate suspended particulate matter in the Yellow River Estuary [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2017, 122(1): 276-290.
- [26] 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.
- [27] Li P, Chen S L, Ji H Y, *et al.* Combining Landsat-8 and Sentinel-2 to investigate seasonal changes of suspended particulate matter off the abandoned distributary mouths of Yellow River Delta [J]. *Marine Geology*, 2021, 441: 106622.
- [28] A R H, Qing S, Bao Y H. The inspection and application of atmospheric correction algorithm in Landsat-8 OLI data [J]. *Marine Sciences*, 2018, 42(6): 107-115.
阿如汗, 青松, 包玉海. Landsat-8 OLI 卫星数据的大气校正检验及其应用 [J]. *海洋科学*, 2018, 42(6): 107-115.
- [29] Vanhellemont Q, Ruddick K. Advantages of high quality SWIR bands for ocean colour processing: Examples from Landsat-8 [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 161: 89-106.
- [30] Luo Y F, Doxaran D, Vanhellemont Q. Retrieval and validation of water turbidity at metre-scale using Pléiades satellite data: A case study in the Gironde Estuary [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(6): 946.
- [31] Liu Z Y, Cui T W, Zhang S H, *et al.* Piecewise linear retrieval suspended particulate matter for the Yellow River Estuary based on Landsat8 OLI [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2018, 38(8): 2536-2541.
刘振宇, 崔廷伟, 张胜花, 等. 黄河口海域悬浮物浓度 Landsat8 OLI 分段线性反演 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2018, 38(8): 2536-2541.
- [32] Chen L, Yang L S, Hao Y L, *et al.* Optical characteristics of Yellow River Estuary waters and suspended matters concentration retrieval model [J]. *Journal of Inner Mongolia Normal University (Natural Science Edition)*, 2012, 41(3): 258-261, 268.
陈磊, 杨立森, 郝艳玲, 等. 黄河口海域水体光学特征与悬浮物浓度反演模型研究 [J]. *内蒙古师范大学学报 (自然科学汉文版)*, 2012, 41(3): 258-261, 268.
- [33] Han Z, Yun C X, Jiang X Z. Experimental study on reflected spectrum of suspended sediment [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2003, 34(12): 118-122.
韩震, 恽才兴, 蒋雪中. 悬浮泥沙反射光谱特性实验研究 [J]. *水利学报*, 2003, 34(12): 118-122.
- [34] Luo Y F, Doxaran D, Ruddick K, *et al.* Saturation of water reflectance in extremely turbid media based on field measurements, satellite data and bio-optical modelling [J]. *Optics Express*, 2018, 26(8): 10435.
- [35] Ruddick K. Ocean colour remote sensing in turbid coastal waters [R]. Villefranche, France: The second IOCCG Summer Lecture Series, 2014.
- [36] Kotchenova S Y, Vermote E F. Validation of a vector version of the 6S radiative transfer code for atmospheric correction of satellite data. Part II. Homogeneous Lambertian and anisotropic surfaces [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(20): 4455-4464.
- [37] Vermote E F, Tanre D, Deuze J L, *et al.* Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: An overview [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, 35(3): 675-686.

- [38] Vanhellemont Q. Adaptation of the dark spectrum fitting atmospheric correction for aquatic applications of the Landsat and Sentinel-2 archives [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 225: 175-192.
- [39] Sterckx S, Knaeps E, Kratzer S, et al. SIMilarity Environment Correction (SIMEC) applied to MERIS data over inland and coastal waters [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 157: 96-110.
- [40] Wolters E, Toté C, Sterckx S, et al. iCOR atmospheric correction on Sentinel-3/OLCI over land: Intercomparison with AERONET, RadCalNet, and SYN level-2 [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(4): 654.
- [41] Brockmann C, Doerffer R, Peters M, et al. Evolution of the C2RCC neural network for Sentinel 2 and 3 for the retrieval of ocean colour products in normal and extreme optically complex waters [C]. *Proceedings of the Living Planet Symposium, Prague*, 2016, 740: 54.
- [42] Doerffer R, Schiller H. The MERIS Case 2 water algorithm [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2007, 28(3/4): 517-535.
- [43] Shen X J, Zhang H L, Cheng R, et al. Classification of aerosols types over the Yellow and Bohai Sea [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, 41(5): 1649-1655.
沈晓晶, 张海龙, 程锐, 等. 黄渤海上空气溶胶类型判别及其成因分析 [J]. *环境科学学报*, 2021, 41(5): 1649-1655.
- [44] Main-Knorn M, Pflug B, Debaecker V, et al. Calibration and validation plan for the L2A processor and products of the Sentinel-2 mission [J]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2015, XL-7/W3: 1249-1255.
- [45] Mayer B, Kylling A. Technical note: The libRadtran software package for radiative transfer calculations—description and examples of use [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2005, 5(7): 1855-1877.
- [46] Toming K, Kutser T, Uiboupin R, et al. Mapping water quality parameters with Sentinel-3 ocean and land colour instrument imagery in the Baltic Sea [J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(10): 1070.
- [47] Li Y, Guo Y L, Cheng C M, et al. Remote estimation of total suspended matter concentration in the Hangzhou Bay based on OLCI and its water color product applicability analysis [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2019, 41(9): 156-169.
李渊, 郭宇龙, 程春梅, 等. 基于OLCI数据的杭州湾悬浮物浓度估算及其产品适用性分析 [J]. *海洋学报*, 2019, 41(9): 156-169.
- [48] Cooley T, Anderson G P, Felde G W, et al. FLAASH, a MODTRAN4-based atmospheric correction algorithm, its application and validation [C]. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. June 24-28, 2002, Toronto, ON, Canada. IEEE, 2002: 1414-1418.
- [49] Main-Knorn M, Pflug B, Louis J, et al. Sen2Cor for Sentinel-2 [C]. *Proceedings SPIE 10427, Image and Signal Processing for Remote Sensing XXIII*. September 11-14, 2017. Warsaw, Poland. SPIE, 2017: 1042704.
- [50] Bulgarelli B, Zibordi G. On the detectability of adjacency effects in ocean color remote sensing of mid-latitude coastal environments by SeaWiFS, MODIS-A, MERIS, OLCI, OLI and MSI [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 209: 423-438.
- [51] Zhang J W, Qiu Z F. Evaluation of data quality of FY-3D satellite sensor MERSI II over marine waters [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(12): 1201002.
张靖玮, 丘仲锋. 针对海洋水域的FY-3D MERSI II 数据质量评估 [J]. *光学学报*, 2021, 41(12): 1201002.