

文章编号:1671-4229(2023)06-0040-09

珠江口近岸水域实测光谱与 Sentinel-2 卫星影像光谱的对比分析

李海桃¹, 解学通^{2*}, 杨现坤², 夏雪宁², 张 秦²

(1. 交通运输部南海航海保障中心 广州海事测绘中心, 广东 广州 510320;

2. 广州大学 地理科学与遥感学院, 广东 广州 510006)

摘要: 地面实测的水体高光谱数据与卫星影像上的多光谱数据都是水质反演与监测中的重要数据来源,二者之间存在光谱分辨率等差异,其关联性在一定程度上影响了水质反演的精度。为探究实测光谱与影像光谱之间的相关关系,文章以珠江口近岸水域为研究区,基于2020年与2021年间共计4轮同步实测的水体高光谱与哨兵2号影像数据,分别从光谱形态、反射率的角度对比分析不同大气校正算法的影像结果与实测数据之间的关系与差异。分别将等效反射率与 Sen2cor (Sentinel-2 atmospheric correction)、C2RCC (Case-2 Regional/ Coast Color) 大气校正算法影像结果进行两两对比,得出以下结论:①Sen2cor 大气校正算法在浑浊水体中表现更好,其影像光谱形态与实测光谱契合程度更高;②C2RCC 大气校正算法在一般水体或非浑浊水体中的效果更好,其影像上的绝对反射率可以更好地还原水体的地面反射率。

关键词: 高光谱; 等效反射率; 哨兵2号; Sen2cor; C2RCC

中图分类号: P237

文献标志码: A

Comparison of in-situ measured spectrum and satellite image spectrum of the Pearl River Estuary

LI Hai-tao¹, XIE Xue-tong^{2*}, YANG Xian-kun², XIA Xue-ning², ZHANG Qin²

(1. Guangzhou Maritime Hydrographic Center, Southern Navigation Service Center, Ministry of Transport, Guangzhou 510320, China;

2. School of Geography and Remote Sensing, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Hyperspectral data of in-situ measurement of water surface and spectral data of satellite images are both important data sources in water quality monitoring. There are differences between them in spectral resolution, and their correlation affects the accuracy of water quality retrieval to a certain extent. In order to explore the correlation between the two data sources, this paper takes the coastal waters of the Pearl River Estuary as the research area, and is based on the hyperspectral data of water from four rounds of synchronous measurements in 2020 and 2021 and Sentinel-2 images. In addition, the relationships and differences between the image results of different atmospheric correction algorithms and the data of in-situ measurements were compared from the perspectives of spectral morphology and reflectance. By comparing equivalent reflectance with Sen2cor and C2RCC (Case-2 Regional/ Coast color) atmospheric correction algorithms, the following conclusions are drawn: Sen2cor algorithm performs better in turbid water, and the spectral morphology of the image accords with the in-situ spectrum better. The performance of C2RCC algorithm is better in general water or non-turbid water, and the absolute reflectance on the image is closer to the reflectance of in-situ measurement.

Key words: hyperspectral data; equivalent reflectance; Sentinel 2; Sen2cor; C2RCC

收稿日期: 2022-04-07; 修回日期: 2022-09-07

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(41876204); 广东省海洋专项资助项目(粤自然资合[2020]013)

作者简介: 李海桃(1996—), 女, 硕士. E-mail: 2111901047@e.gzhu.edu.cn

* 通信作者. E-mail: xiexuetong@gzhu.edu.cn

引文格式: 李海桃, 解学通, 杨现坤, 等. 珠江口近岸水域实测光谱与 Sentinel-2 卫星影像光谱的对比分析[J]. 广州大学学报(自然科学版), 2023, 22(6): 40-48.

在水质反演研究中,地面实测高光谱数据与卫星影像上的光谱数据都是重要的建模数据源,其中有许多学者选择使用地面实测高光谱数据进行建模,并将其应用于遥感影像上,以获取大范围的水质参数分布结果,便于水质监测与分析。但由于光谱分辨率、观测距离、空间分辨率和大气影响等因素的影响,使得野外实验中所获取的地面实测高光谱数据与卫星影像中的光谱数据之间存在一定的差异。

对于实测光谱,想要将其波段与参与研究的卫星对应的波段关联起来^[1],可以通过光谱重采样方法,如孔祥生等^[2]以 TM 传感器与 ASD 高光谱仪为例,给出了计算方法并解释了二者之间的联系。而不同卫星传感器具有不同的光谱响应函数,其波段位置和带宽略有差异,使得等效反射率出现偏差^[3]。对于卫星影像光谱,可以通过大气校正尽量降低大气影响,从而得到接近真实的地物光谱信息。但由于存在大气校正不彻底的情况,使得影像反射率与实际反射率不能完全匹配,影响了水质反演精度。如哨兵 2 号的 L2A 影像产品的影像中所显示的水体绝对反射率值高于地面实测的水体反射率^[4],MODIS 反射率产品也出现了相似的情况^[5]。李海翠等^[6]对比了不同的大气校正方法在哨兵 2 号影像上的精度,表明 Sen2cor 大气校正算法能得到较好的大气校正效果。Gao 等^[7]利用短波红外波段遥感反射率可忽略的假设对哨兵 2 号图像进行再校正,该方法最先是针对 MODIS 影像提出的^[8],可以减少大气校正带来的不确定性,即将影像的每个像素减去短波红外的最小正反射率,并除以 π ,获得重新校正的反射率。也有学者通过间接的方式计算大气校正的误差,Feng 等^[9]尝试基于辐射传输理论计算 MERIS 影像数据的瑞利校正反射率 R_{rc} ,以代替通过完整大气校正的 R_{rs} ,对比实测光谱与 R_{rc} 在叶绿素 a 反演结果之间的差值,视为大气校正的误差。关于卫星传感器所得的反射率与地面实测反射率之间的相关性,很大可能影响定量反演的可靠性和准确性。Brockmann 等^[10]对比了实测光谱、Sen2cor 算法产品、C2RCC 算法产品的光谱,证明了 C2RCC 算法的可靠性;Tilstone 等^[11]对比 MODIS 的影像反射率和地面实测反射率,根据它们的散点图,选择接近 1:1 的波段作为研究基础。现有的研究主要讨论了土壤、植被等地物的大气校正效果^[12],较少涉及水体实测光谱与卫星光谱的比较^[13],特别

是浑浊水体与非浑浊水体的对比研究。

在精度要求较高的水质反演研究中,有必要探讨实测光谱与卫星影像光谱的对应关系,对比它们的误差所在。本文以哨兵 2 号的 Sen2cor 和 C2RCC 大气校正算法产品为例,对比其上的光谱与地面同步实测光谱的差异,以此为基础,探究它们在珠江口近岸水体中的大气校正效果,为水质反演的影像产品数据源选择提供对比参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本文研究区位于广东珠江口附近海域,属于珠江口与南海衔接的近岸海域,北至淇澳岛,南至万山镇。研究区内涵盖了港珠澳大桥万山群岛、内外伶仃洋等标志性区域。

图 1 展示了研究区区位、4 次外业实验采样点所在位置及其分布情况。由于珠江口水域处于中国经济发达地区之一的珠三角地区,频繁的人类活动和复杂的自然条件导致该区域表层海水的化学成分复杂,其光谱不仅包含了叶绿素 a 的信息,而且受到了较强烈的悬浮物散射的影响。

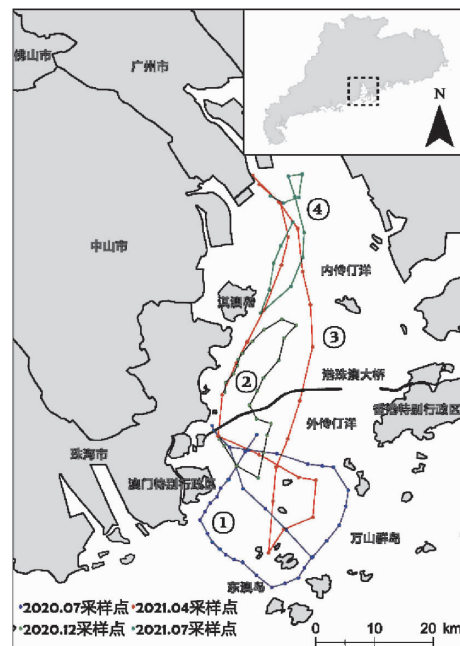


图 1 研究区区位及采样点分布

Fig. 1 The location of study area and spatial distribution of the sampling sites

注:底图来源于广东省标准地图服务子系统 <http://nr.gd.gov.cn/map/bzdt/> (审图号:粤 S(2019)030 号)。

1.2 数据来源

1.2.1 光谱数据与水质参数数据的获取

本研究分别于 2020 年 7 月 22 日—23 日、12 月 20 日和 2021 年 4 月 30 日—5 月 1 日、7 月 3 日在珠江口近岸海域,根据上述采样点的位置进行 4 次外业数据采集,数据采集当天均有哨兵 2 号卫星同步过境。水体高光谱数据的采集使用由美国分析光谱仪器公司制造的 ASD 高分辨率野外光谱辐射仪 ASD FieldSpec 4,通过水面以上测量法^[14]获得。同时,在每个采样点处用海水采集器采集两瓶 500 mL 的水样,用于叶绿素 a 浓度与悬浮物浓度测定分析。叶绿素 a 浓度依照国家环境保护标准 HJ 897—2017 的分光光度法进行测定^[15]。悬浮物浓度使用国家标准^[16]进行测定。

图 2 为叶绿素 a 浓度与悬浮物浓度统计描述箱型图,图中表达了各月份叶绿素 a 与悬浮物的浓度范围、均值和四分位数等信息。水质参数测定结果显示,夏季叶绿素 a 浓度较高,总体变化趋势为夏季 > 春季 > 冬季,而冬季的悬浮物浓度较高。

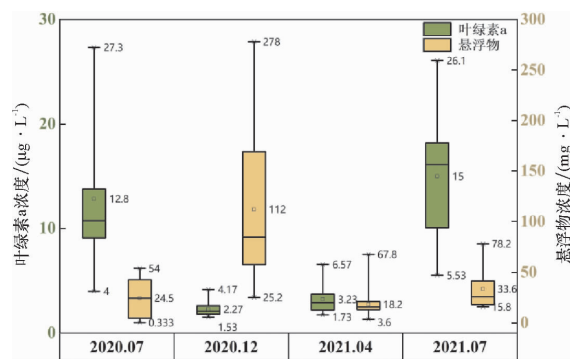


图 2 叶绿素 a 浓度与悬浮物浓度统计描述箱型图

Fig. 2 Box diagram of chlorophyll-a and suspended matter concentration

1.2.2 卫星影像数据的获取

哨兵 2 号卫星多光谱成像仪数据是由欧洲航天局(ESA)面向大众免费获取的卫星影像数据之一,由哨兵 2 号 A 星与哨兵 2 号 B 星组网,达到

回访周期为 5 天的地面监测频率。它以较高的空间分辨率及其数据易得性在众多卫星中优胜,最精细可达到 10 m,拥有较齐全的水色遥感波段,在海洋监测中占据了重要的部分,已有相关研究成果证实其在水色反演上的精度^[17-18]。

欧空局哨兵 2 号搜索引擎(<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>)中,供用户选择的产品类型有 L1C 和 L2A。L1C 产品已经过几何校正和辐射校正,而 L2A 是在 L1C 的基础上经过 Sen2cor 算法进行了大气校正的产品,可以直接用于水质反演研究。由于云量等影响,在时间误差允许范围内,分别选择日期为 2020 年 7 月 18 日、2020 年 12 月 30 日和 2021 年 4 月 24 日和 2021 年 7 月 8 日的遥感影像。

1.3 模型与方法

1.3.1 哨兵 2 号产品预处理方法

哨兵 2 号的影像产品都需要进行一定的预处理才能在 ENVI 5.3 中进行常规的读取和处理。欧空局为其提供的数据开发了一个专门的处理软件 SNAP(Sentinel Application Platform),是所有哨兵工具箱的基础平台,支持处理哨兵 1/2/3 号的所有产品。

在大气校正算法上,Sen2cor 是哨兵 2 号最常用的大气校正算法,用于生产 L2A 产品。后来,开发了针对海洋水色的 C2RCC 算法,这是更适用于水域的大气校正方法,已集成于 SNAP 软件中。C2RCC 是基于生物光学模型的“二类水体区域性近岸海域水色”反演算法^[19],基于人工神经网络技术,可反演提取叶绿素 a、总悬浮物等水色参数信息,适用于哨兵 2/3 号、MERIS、VIIRS、SeaWiFS、Landsat-8/OLI 和 MODIS 等遥感数据。其研究成果在被研发出来后陆续产出^[20]。

具体的影像预处理流程如图 3 所示:主要包括读取文件、重采样、波段合成和影像拼接等步骤。

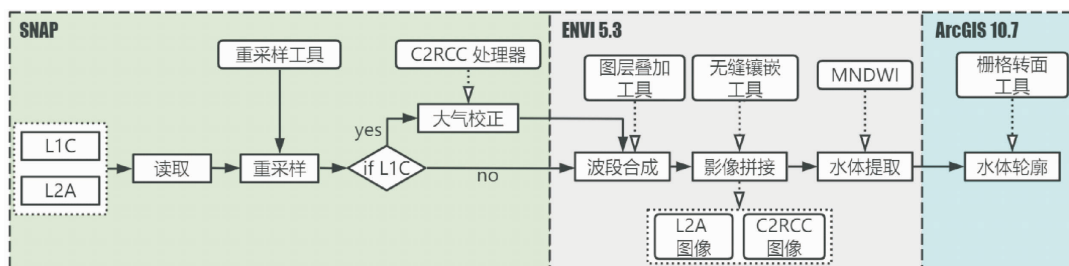


图 3 遥感影像预处理流程

Fig. 3 Image preprocessing process

由图3可见,L1C和L2A均需要做以上同样的预处理步骤。而L1C则需要在重采样后增加大气校正步骤,使用C2RCC工具进行大气校正得到C2RCC大气校正结果,并根据需求进行水体提取。而且该大气校正算法提供了与不同水体状况对应的不同神经网络运行方式,见表1。

表1 不同的神经网络所对应的适用的水体状况
Table 1 Different neural networks and their applicable water condition

神经网络	描述	对应的影像
C2RCC-Nets	标准神经网络,最好用于富营养化到中等营养化水体类型	2020.07.18、 2021.04.24、 2021.07.08
C2X-Nets	针对高悬浮物和叶绿素浓度的特殊神经网络	2020.12.20
C2X-COMPLES-Nets	特殊的神经网络,用于光学复杂的水类型,最好用于内陆水域	-

结合以上表格,针对各月份影像数据选择了适当的神经网络类型。在C2RCC处理器的参数设置中,Valid-pixel expression 可视为掩膜操作,可以根据默认的B8波段在影像中的值来确认取值范围,判断水体与陆地或云之间的像素阈值,一般不会超过0.2,该值会影响算法的处理范围和处理时长;Salinity 为盐度,可根据各月份采样数据所测得的盐度平均值来确定;同理可得 Temperature 为测得的水温均值;Elevation 为所在区域的平均海拔,大约设定为15~20 m;Set of neuronal nets 是针对不同的水体状况来选择不同的神经网络。一幅影像的处理时长随栅格大小、参数设置等各有不同,一般是40 min~6 h不等。

1.3.2 实测光谱与卫星影像光谱之间的关联方法

不同卫星搭载的传感器有其独特的光谱响应函数,可以理解为传感器在某一中心波长特定波段范围内接收到的信号所占比例的函数。不同的卫星所搭载的传感器具有独特的光谱响应函数,一般由卫星官网提供,也有由专门汇总光谱响应函数文件的网站(<https://www.nwpsaf.eu/site/software/rttov/download/coefficients/spectral-response-functions/>)提供。利用该函数对地面频谱进行重采样,相当于在地面上直接用卫星上的传

感器进行测量。基于光谱响应函数,对ASD光谱现场数据应用卷积法计算卫星传感器^[2]波段对应的等效水体反射率。公式如下:

$$R_i = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_i(\lambda) R(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_i(\lambda) d\lambda}, \quad (1)$$

式中, R_i 为哨兵2号第*i*波段的等效反射率; $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 为哨兵2号第*i*波段的光谱波长范围; $R(\lambda)$ 为对应的波长反射率; λ 和 $S_i(\lambda)$ 为哨兵2号第*i*波段的光谱响应函数对应的波长和响应值。这个计算可以通过ENVI 5.3工具箱中的光谱重采样工具来完成。

2 结果与分析

等效反射率的计算可以解决光谱分辨率的问题,使得高光谱数据在损失较少的情况下降低到多光谱尺度。但是在空间分辨率上的差异依然较大,地面实测的物体光谱通常包含被测物体近距离的某个面的光谱,分辨率可达到厘米级,而卫星传感器所采集的物体光谱通常是混合光谱,在影像上显示的数值包含了许多除被测物以外的信息,分辨率在米级。哨兵2号分辨率最高为10 m,即一个水体像元包含的信息是该点10 m以内的所有水体信息,加上大气影响,这个10 m的像元还包含了许多大气散射因素,因此,影像上的光谱值会高于地面光谱,并且形状无法与地面光谱完全一致,但在尽可能的大气校正后,保留了地物的基本特征。Sen2cor和C2RCC是可用于哨兵2号的两种不同的大气校正算法,它们所得出的影像产品具有不同的光谱曲线。

2.1 光谱总体对比

大气校正是否成功,最基本的判别方法是观察影像上的光谱曲线,在本研究中,观察水体光谱曲线是否符合预期,若影像光谱曲线与一般水体的光谱曲线形态相符,则大气校正基本完成。另外,也可区分浑浊水与非浑浊水之间的光谱形态差异。

根据采样点位置,取其半径50 m范围的圆形缓冲区的平均像素值。并在去除云遮挡、云阴影遮挡部分的异常曲线后,以每月的平均光谱为代表,进行不同数据源的光谱曲线对比,如图4所示。

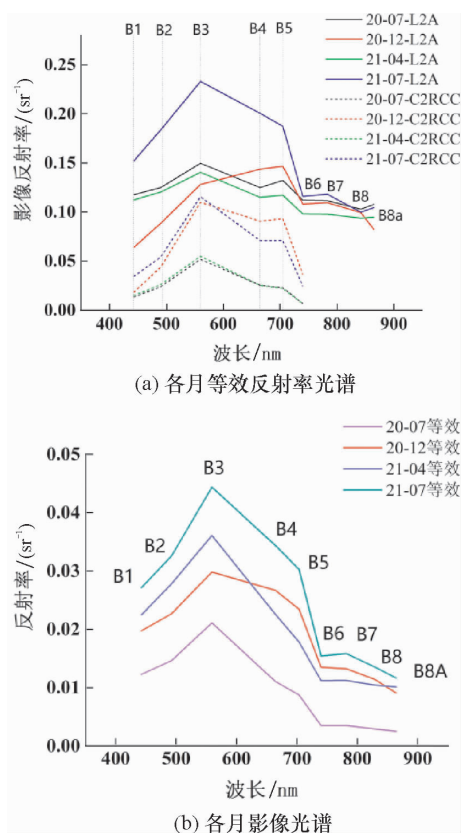


图 4 影像光谱与地面实测光谱比较

Fig. 4 Comparison of spectrum between image and in-situ measurement

图 4 显示,影像上的反射率与地面实测的反射率之间表现出一定的差异,特别是 L2A 产品的反射率在一定程度上高于地面实测;而 C2RCC 大气校正结果的反射率总体上比 L2A 产品的低。L2A 产品在 2020 年 7 月与 2021 年 4 月的光谱曲线形态基本相同,B4 拐点处显示凹型特征,B5 处出现第二个反射峰。2020 年 12 月的最大反射峰处于 B5 而非与前面几个相同的 B3,这可能是因为 12 月悬浮物浓度极高导致的反射峰红移现象,但 B3 同样也有一个较小的反射峰,B4 形态呈现凸型。而 C2RCC 大气校正结果的光谱形态区别不大,在 B4 处均为凹型,在这种情况下无法通过光谱形态来判断水体的浑浊情况,与水体的真实光谱形态符合程度较低,即使是在 12 月悬浮物如此高的情况下。这表明该算法在 12 月的大气校正结果可靠性上还需进一步验证,C2RCC 的大气校正算法在极度浑浊的水体中适用性还需提高。

总的来说,C2RCC 大气校正的结果在一般水体的校正效果较好,但在极度浑浊的情况下表现一般。而 L2A 产品在浑浊情况下所表现的水体细

节更多,可以从光谱形态上直观判断水体的浑浊程度^[6]。除了从光谱形态上判断影像的质量,还可以从反射率值的相关性角度进行分析。图 5 (a)和图 5 (b)分别显示了 L2A 产品、C2RCC 大气校正的结果和地面实测反射率 R_{rs} 之间的两两相关关系。

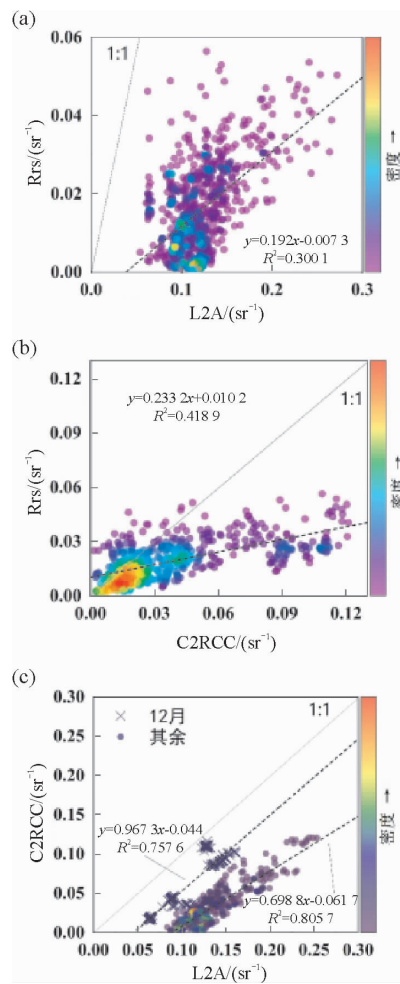


图 5 不同数据源的反射率值关系散点图

Fig. 5 Scatter plot of reflectance values of different data sources

图 5 (b) 显示 C2RCC 大气校正结果与实测 R_{rs} 的相关性比较明显,大部分的散点都处于趋势拟合线的两旁,整体趋势性较好。经测试,主要影响趋势线线性相关系数 (R^2) 的数据是 12 月的数据,它处于趋势线右下方。红色为点密集处的散点接近 1:1 线,说明 C2RCC 大气校正后有部分波段的反射率与地面实测反射率相似度较好。

而 L2A 产品的反射率与实测 R_{rs} 的相关关系较弱,散点图比较分散,反射率绝对值之间的关系比较难明确。从图 5 (a) 和图 5 (b) 的比较中发现,

在反射率绝对值上,L2A产品的反射率质量不如C2RCC大气校正的结果。在L2A产品与C2RCC大气校正结果影像反射率的关系中,除12月的数据外,其余数据之间显示较高的相关性。而将12月的影像反射率单独考虑时,发现12月的C2RCC大气校正结果与L2A的影像反射率之间相关性也较明显,表明L2A影像与C2RCC大气校正结果之间的反射率绝对值相关关系较强。但数据处于1:1线下方,双方不能完全等值地表达彼此,仅相关性较好,具有较明确的倍数关系。

总的来说,L2A数据在表述地物的光谱形态上,具有较好的优势,特别是在浑浊水体中,但C2RCC大气校正结果在还原地物实测反射率的绝对值上表现更好。另外,12月水体的浑浊程度极

高,拉开了其影像与其他影像的差异,使得该月数据的规律性独立于数据群,如图5(c)所示。

2.2 各波段相互对比

除了从总体光谱形态及所有波段绝对值相关性的角度分析,若将各波段分别进行比较,可以探究不同大气校正算法对各波段的校正效果,以选择较好的波段数据作为水质反演研究数据源。

图6显示了Sen2cor大气校正方法所得到的哨兵2号L2A级影像产品的图像导出反射率与地面实测等效反射率之间的相关关系,分别为B1~B8a 9个波段。总体上拟合 R^2 都不高,只有个别数据集表现出二者间较好的统一性,如图6(c)~图6(e)所代表的B3~B5波段,表现出它们之间较为明显的统一性。

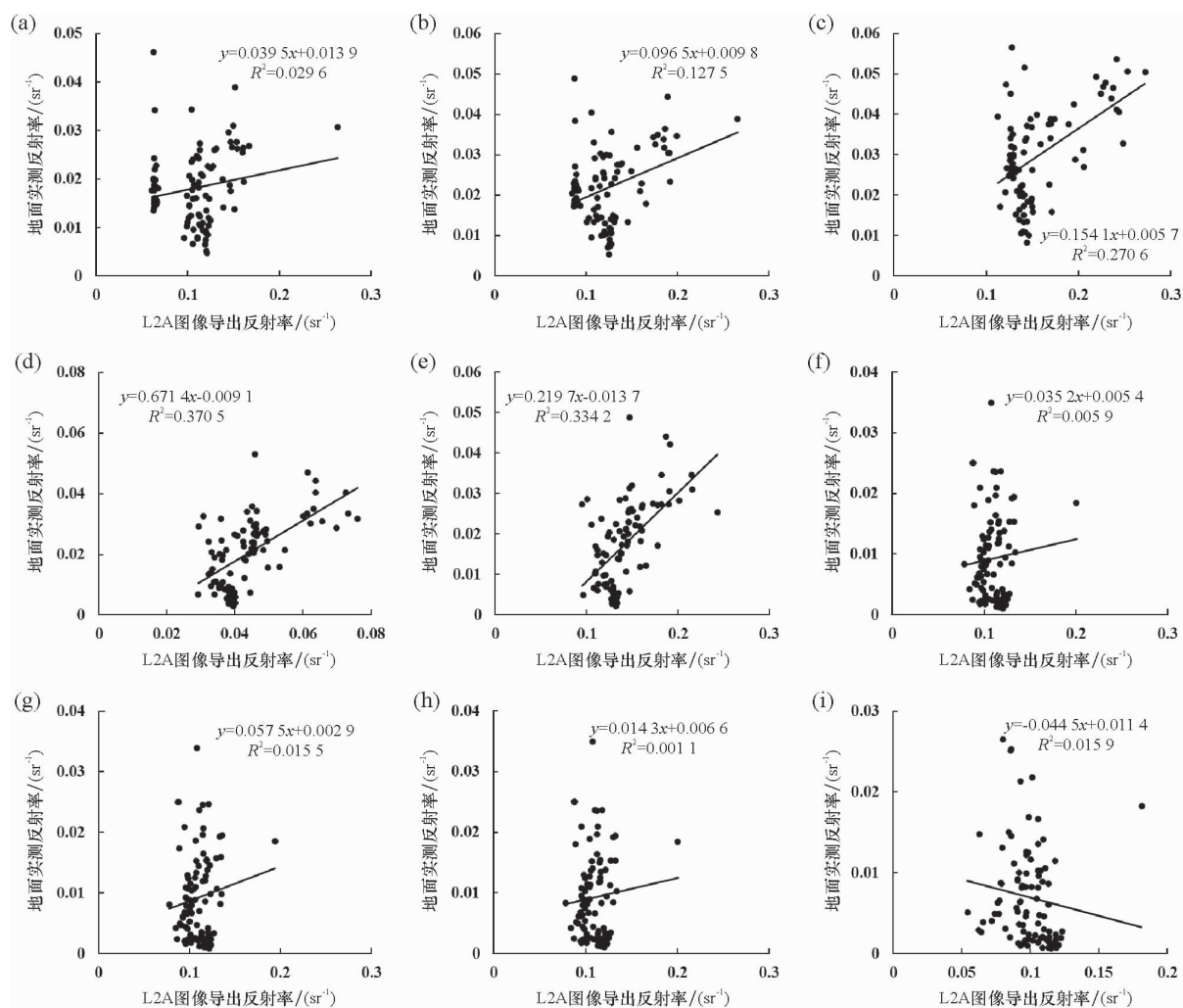


图6 L2A产品与地面实测反射率在各波段的对比

Fig. 6 Comparison of reflectance between L2A products and in-situ measurement at different bands

注:图中(a)~(i)依次为B1~B8a。

经过尝试和检验,发现处于散点图下方堆积的散点是日期为 2020 年 7 月 18 日的 L2A 影像所导出的图像反射率,而且这堆积散点的趋势大致与其他数据相反。正常情况下应呈现单调递增趋势,这说明了该影像的质量一般,后续可能会出现该影像反演效果较差的情况。同时,该影像可以代表清澈水体,也说明了 Sen2cor 算法有可能在清澈水体中的大气校正效果欠佳。而其余波段的相关性都较差,因此,在使用 L2A 图像进行反演时,应优先选择使用 B3 ~ B5 波段,也有学者建议使用

除 B1、B2、B9 波段外的 Sen2cor 表面反射率进行定量研究^[4]。在反射率差异较大时,虽然单波段的差异很大,但一些波段组合的所计算的指数可能效果较好,如 NDVI。

C2RCC 大气校正算法的研发时间在 Sen2cor 算法之后,输入了许多训练案例来训练算法,是专门用于水域的大气校正方法,对近岸水域的大气校正效果有所提升。以下对不同波段的 C2RCC 大气校正结果导出的反射率与实测反射率进行对比(图 7)。

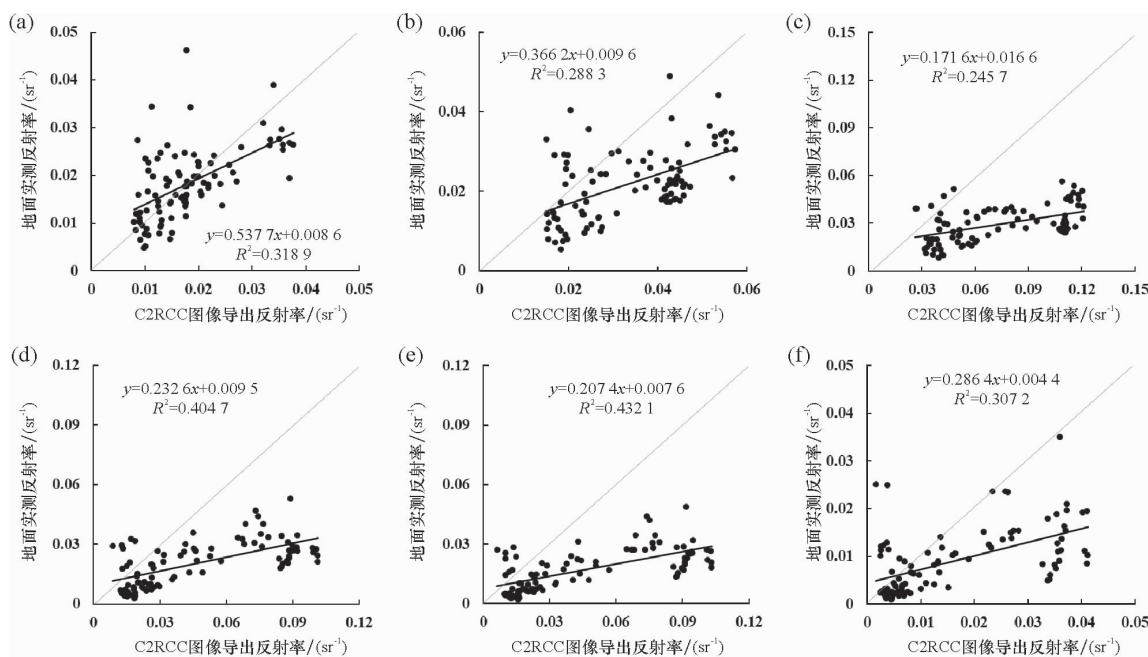


图 7 各波段的 C2RCC 与地面实测反射率对比

Fig. 7 Comparison of reflectance between C2RCC and in-situ measurement at different bands

注:图中(a)~(f)依次为 B1~B6。

图 7 中,C2RCC 算法结果只提供 6 个波段,结果显示,B1、B2 散点图的趋势基本随着 1:1 线变化,其余波段总体上也优于 L2A 产品所得的反射率的表现。

通过试验,发现散点图中较离散的散点,特别是形成一条明显直线的散点,如图 7(c)~图 7(f)最右方的条状散点,它们是日期为 2020 年 12 月 30 日的 C2RCC 大气校正结果所导出的图像反射率,不过这些离散散点的趋势呈大致单调递增趋势,经单独检验也发现相关关系良好,或其规律性与其他数据不相符。总体上,B1~B5 波段所表现的 C2RCC 大气校正结果导出的反射率与实测反射率之间的整体相关性较好,在进行图像反演

时可以优先考虑这些波段。

从这几个对比中发现,从整体光谱曲线形态的方面考虑,L2A 产品及其所代表的 Sen2cor 大气校正算法对极度浑浊水体具有较好的特征还原效果,其影像上所得到的曲线与地面实测光谱曲线具有比较相似的形态。Toming 等^[21]通过对比地面实测光谱与卫星影像光谱的信号及其建模效果,发现 Sen2cor 在浑浊湖水中的大气校正效果更好。而 C2RCC 大气校正算法所得到的影像中,其光谱曲线对水体的真实曲线的特征表现能力较差,无论是浑浊还是非浑浊水中都呈现同样的光谱曲线形态,无法直观地区分水体的浑浊程度。

而从反射率绝对值的方面考虑,L2A 影像的

反射率整体上与地面实测数据的相关关系较差,对反射率的还原度较低,进行反演时,应优先选择使用 B3 ~ B5 波段。同时也说明 Sen2cor 算法有可能在清澈水体中的校正效果欠佳。而 C2RCC 大气校正结果导出的反射率与实测反射率绝对值之间的相关关系优于 L2A 产品,即大气校正效果得到的反射率效果较好,特别是 B2 ~ B5 波段,在反演时可以优先考虑。

2.3 讨论

在水质反演中,C2RCC 的大气校正算法结果,适用于使用影像绝对反射率作为建模数据源的反演研究,如水中的悬浮物浓度反演,其与光谱的建模关系较明显,经验算法建模精度较高^[22]。在使用实测光谱数据为建模数据源并应用于影像时^[23],也能得到较为合理的结果。另外,也适用于基于波段的叶绿素 a 经验反演模型^[19]。

而 L2A 产品的大气校正算法结果具有更合理的水体光谱曲线,适用于考虑光谱曲线形态的研究。如根据水体光谱曲线进行的水体光学分类^[24-25],需要由光谱中的峰值高度等特征来判定水体类型,并根据水体类型建立水质参数反演模型;或根据光谱形态进行水体和水下植被的判定^[26]。以上研究都需要大气校正后的产品中的光谱尽可能地与实测光谱的曲线形态接近,从而保留较完整的光谱形态,以确保达到更好的判断效果,并且对反射率绝对值的精度要求较低。

参考文献:

- [1] Nadal J L V, Franch B, Roger J C, et al. GARSS 2018 - 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, July 22-27, 2018 [C]. Piscaway: IEEE, 2018.
- [2] 孔祥生, 张安定, 钱永刚, 等. 地物光谱反射率测量与行星反射率计算联合教学设计与实践[J]. 测绘科学, 2011, 36(5): 234-236.
- [3] 韩秀珍, 郑伟, 刘翔. 基于实测光谱的太湖水体表面离水反射率研究[J]. 国土资源遥感, 2010(3): 54-57.
- [4] Li Y J, Chen J, Ma Q M, et al. Evaluation of sentinel-2A surface reflectance derived using Sen2cor in North America[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2018, 11(6): 1997-2021.
- [5] Sun L, Guo M H, Wang X M. Ocean color products retrieval and validation around China coast with MODIS[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2010, 29(4): 21-27.
- [6] 李海翠, 况润元, 宋子豪. 基于 Sentinel-2 影像的鄱阳湖大气校正方法适用性评价[J]. 航天返回与遥感, 2021, 42(4): 108-119.
- [7] Gao Z Y, Shen Q A, Wang X L, et al. Spatiotemporal distribution of total suspended matter concentration in Changdang Lake based on *in situ* hyperspectral data and sentinel-2 images[J]. Remote Sensing, 2021, 13(21): 4230.
- [8] Wang S L, Li J S, Zhang B, et al. A simple correction method for the MODIS surface reflectance product over typical inland waters in China[J]. International Journal of Remote Sensing, 2016, 37(24): 6076-6096.
- [9] Feng L A, Hu C M, Han X X, et al. Long-term distribution patterns of chlorophyll-a concentration in China's largest fresh-

3 结 语

遥感影像光谱与地面实测光谱的关联性在很大程度上影响了水质监测研究的精度。本文以同步实测的水体高光谱数据为基础,主要从光谱形态、绝对反射率值两个方面,对比了哨兵 2 号 Sen2cor 与 C2RCC 大气校正算法所得到的影像与实测数据之间的差异,以便为水质遥感监测提供影像源的选择参考。得到的结论如下:

(1) 基于 Sen2cor 大气校正算法的哨兵 2 号 L2A 影像产品,在浑浊水体中的大气校正效果较好,其影像光谱形态接近于实测光谱,保留了悬浮物的光谱特征细节,可从影像光谱中反映水体的浑浊程度,适合用于从光谱形态角度出发的研究。但是 L2A 影像的绝对反射率与实测光谱的相关关系不如 C2RCC 算法明显,且可能在清澈水体中的校正效果欠佳。

(2) 而基于 C2RCC 大气校正算法得到的结果,在一般水体或非浑浊水体中的大气校正效果较好,其影像中的绝对反射率对地面实测反射率的还原度较好,适用于对绝对反射率精度要求较高的研究方向。但在浑浊水体下,大气校正效果不如一般水体,其影像光谱形态与实测光谱相差较远,关于悬浮物浓度的特征细节不足,难以判断水体的浑浊程度。

- water lake: MERIS full-resolution observations with a practical approach[J]. *Remote Sensing*, 2015,7(1):275-299.
- [10] Brockmann C, Doerffer R, Peters M, et al. Proceedings of Living Plant Symposium, May 9-13, 2016[C]. Prague: The European Space Agency,2016.
- [11] Tilstone G H, Lotliker A A, Miller P I, et al. Assessment of MODIS-Aqua chlorophyll-a algorithms in coastal and shelf waters of the eastern Arabian Sea[J]. *Continental Shelf Research*, 2013,65:14-26.
- [12] Fan L Y, Berger F H, Liu H Z, et al. Validating MODIS land surface reflectance products using ground-measured reflectance spectra – A case study in semi-arid grassland in Inner Mongolia, China[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2014, 35(5):1715-1728.
- [13] 张戈, 夏建新, 杜蕾, 等. Landsat8 和 Sentinel-2A 的水体指数比较与协同应用——以黑河流域典型区为例[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2020,28(6):1361-1368.
- [14] 唐军武, 田国良, 汪小勇, 等. 水体光谱测量与分析 I:水面以上测量法[J]. *遥感学报*, 2004(1):37-44.
- [15] 中华人民共和国环境保护部. 水质 叶绿素 a 的测定 分光光度法:HJ 897—2017[S]. 北京:中国环境科学出版社, 2017.
- [16] 国家环境保护局. 水质 悬浮物的测定 重量法:GB 11901—1989[S]. 北京:中国标准出版社,1989.
- [17] 潘翠红, 夏丽华, 吴志峰, 等. 柘林湾近岸水产养殖区水域叶绿素 a 浓度反演[J]. *热带海洋学报*, 2021,40(1):142-153.
- [18] Yadav S, Yamashiki Y, Susaki J, et al. Chlorophyll estimation of lake water and coastal water using landsat-8 and sentinel-2A satellite[J]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-3/W, 2019:77-82.
- [19] 李亭亭, 田礼乔, 李建, 等. 基于 Sentinel 卫星的浑浊水体叶绿素反演对比研究——以鄱阳湖为例[J]. *华中师范大学学报(自然科学版)*, 2017,51(6):858-864.
- [20] Pompêo M, Moschini-Carlos V, Bitencourt M D, et al. Water quality assessment using sentinel-2 imagery with estimates of chlorophyll a, Secchi disk depth, and Cyanobacteria cell number: The Cantareira system reservoirs (São Paulo, Brazil) [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021,28(26):34990-35011.
- [21] Toming K, Kutser T, Laas A, et al. First experiences in Mapping Lake water quality parameters with sentinel-2 MSI imagery[J]. *Remote Sensing*, 2016,8(8):640.
- [22] 李旭文, 魏爱泓, 姜晟, 等. 基于“哨兵 3 号”卫星 OLCI 影像和 C2RCC 算法的南黄海叶绿素 a 及总悬浮物反演效果分析[J]. *环境监控与预警*, 2020,12(2):6-12.
- [23] 高晨. 鄱阳湖悬浮物与叶绿素 a 浓度的季节性遥感信息反演[D]. 南昌:江西师范大学, 2018.
- [24] 况润元, 罗卫, 张萌. 基于实测数据与遥感影像的鄱阳湖水体光学分类[J]. *长江流域资源与环境*, 2015,24(5):773-780.
- [25] Cui T W, Zhang J, Wang K, et al. Remote sensing of chlorophyll a concentration in turbid coastal waters based on a global optical water classification system[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2020,163:187-201.
- [26] Chen Q, Yu R H, Hao Y L, et al. A new method for mapping aquatic vegetation especially underwater vegetation in Lake Ulansuhai using GF-1 satellite data[J]. *Remote Sensing*, 2018,10(8):1279.

【责任编辑:孙向荣】