

李勇, 李思佳, 宋开山, 等. 基于 Sentinel-2 影像东北秋季典型湖泊大气校正方法适用性评价 [J]. 地理科学, 2024, 44(1): 149-158. [Li Yong, Li Sijia, Song Kaishan et al. Evaluation of atmospheric correction processors for Sentinel-2 imagery for typical lakes in Northeast China in autumn. Scientia Geographica Sinica, 2024, 44(1): 149-158.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.20220807

基于 Sentinel-2 影像东北秋季典型湖泊 大气校正方法适用性评价

李勇^{1,2}, 李思佳², 宋开山², 徐茂林¹, 刘阁²

(1. 辽宁科技大学土木工程学院, 辽宁 鞍山 114000; 2. 中国科学院东北地理与
农业生态研究所, 吉林 长春 130102)

摘要: 本文利用 6S (Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum)、Acolite DSF (Dark spectrum fitting)、C2RCC (Case 2 Regional Coast Color)、SeaDas (SeaWiFS Data Analysis System)、Sen2Cor (Sentinel 2 Correction)、Polymer (Polynomial based algorithm applied to MERIS) 和 iCOR (Image correction for atmospheric effects) 7 种大气校正算法, 结合松花湖、月亮泡、小兴凯湖实测遥感反射率数据对“哨兵-2 号”(Sentinel-2) 数据进行大气校正研究, 验证算法性能。整体校正结果显示, 相较于实测遥感反射率, 上述 7 种大气校正算法均在可见光波段 (400~800 nm) 呈现不同程度的低估。除 C2RCC 算法外, 其余 6 种算法校正后的遥感反射率与实测光谱曲线变化趋势基本吻合, 其中 Sen2Cor 算法与 iCOR 算法性能最佳, Polymer 算法性能最差; 在单波段校正精度对比中, Sen2Cor 和 iCOR 算法几乎所有波段的均方根误差和平均绝对百分比误差都低于其余 5 种算法。Sen2Cor 算法在 560 nm、665 nm 和 705 nm 处校正精度优于其余 6 种算法, iCOR 算法在 443 nm 和 740 nm 处有良好的表现, 在 490 nm 处 6S 算法校正精度最高, 拥有最低的均方根误差 (0.0059 sr^{-1}) 和平均绝对百分比误差 (21.40%)。结果表明, 这 7 种大气校正算法均可以在一定程度上去除大气影响, 增加影像的可用性, Sen2Cor 算法和 iCOR 算法更适用于本文所研究水体或相似水体。

关键词: 大气校正; Sentinel-2 卫星; 内陆湖泊水体; 遥感反射率

中图分类号: P237 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2024)01-0149-10

水色卫星传感器接收到的信号的总辐射量中的 80% 以上来自大气, 来自水体的辐射只有 3%~15%^[1]。大气辐射作用使得卫星遥感信号不能正确表现水体的光学特性, 消除大气辐射干扰获得有效的离水辐射信号对准确反演叶绿素 a 和总悬浮物质量浓度等水质参数具有重要意义。根据光学性质的不同 Morel 和 Prieur^[2] 将水体分为 I 类水体和 II 类水体: I 类水体的光学特性主要由浮游植物及其伴生物决定, 大洋水体是典型的 I 类水体; II 类

水体的光学特性主要由悬浮物、黄色物质(又称有色可溶性有机物)决定, 这类水体主要包括内陆及近岸水体。目前大气校正算法在 I 类水体上的研究已经较为成熟^[3], 但是 II 类水体的组分复杂, 光学特性多变, 目前还没有适用性较高、较为成熟的大气校正算法^[4]。

哨兵-2 号(Sentinel-2)卫星系统由 A、B 两颗卫星组成, 重访周期为 5 d。该卫星搭载了推扫式成像的多光谱成像仪(MultiSpectral Instrument, MSI),

收稿日期: 2022-09-27; **修订日期:** 2023-02-14

基金项目: 国家自然科学基金(U23A2008, 42201414, 42171374)、市院科技创新合作专项(21SH10)、国家民用空间基础设施陆地观测卫星共性应用支撑平台(2017-000052-73-01-001735)、吉林省与中国科学院科技合作高技术产业化专项资金项目(2021SYHZ0002)资助。[Foundation: National Natural Science Foundation of China (U23A2008, 42201414, 42171374), Municipal Academy of Science and Technology Innovation Cooperation Project (21SH10), Common Application Support Platform for National Civil Space Infrastructure Land Observation Satellites (2017-000052-73-01-001735), Jilin Province and the Chinese Academy of Sciences Science and Technology Cooperation High-tech Industrialization Special Fund Project (2021SYHZ0002).]

作者简介: 李勇(1996—), 男, 河南驻马店人, 硕士研究生, 主要从事大气校正与水色遥感研究。E-mail: lw208016@163.com

通信作者: 李思佳。E-mail: lisijia@iga.ac.cn

且包含一个光瞳直径为 150 mm 的望远镜,该望远镜的结构利用碳化硅材料制成,可减少光学系统的热变形^[5]。Sentinel-2 MSI 影像共覆盖 13 个光谱波段,幅宽达 290 km,空间分辨率最高可以达到 10 m,具有丰富的空间细节信息,可以观测面积较小的湖泊;同时,它还拥有较高的时间分辨率和信噪比,因此能够更好、更及时的反映水质参数的空间变化规律^[6-7]。

目前,国外许多学者对 Sentinel-2 MSI 影像进行了大气校正算法的研究。如 Doxaran 等^[8]基于 Sentinel-2 MSI 影像在浊度较高的吉伦特河口水域分析评估了 Acolite、iCOR、Polymer、C2RCC 这 4 种大气校正算法对高浊度水体的适用性。Vitor 等^[9]在亚马逊河漫滩湖泊基于 Sentinel-2 MSI 数据分析评估了 6S、Acolite、Sen2Cor3 种大气校正算法的校正精度。在国内,许多学者基于 Sentinel-2 MSI 影像在水质参数反演、目标识别等方面进行了大量的研究^[6,10-13]。在大气校正方面,潘嫒嫒等^[14]以森林、水体、城市建筑物 3 种地物为研究对象,采用大气/地形卫星图像校正算法分析了 Sentinel-2A 单波段通道大气校正前后反射率变化;苏伟等^[15]结合冬小麦、裸土、水泥路和油菜地的实测光谱分析评估了大气校正简化模型、6S 算法和 Sen2Cor 算法对 Sentinel-2 MSI 影像的校正精度。然而针对 Sentinel-2 MSI 影像内陆水体大气校正的研究却相对较少^[16]。

松花湖、月亮泡、小兴凯湖均为内陆湖泊,距离人类聚集地较近,水质状况易受到人类活动影响。松花湖上游区域大都处于轻度营养化水平,中游部分区域处于中度营养化水平,下游区域大部分处于中营养向轻度富营养化过渡的状态^[17];月亮泡属于人工水库,水体呈碱性或弱碱性,水质呈中富营养状态^[18];小兴凯湖因区域农业生产、旅游业开发等因素导致整体水质较差,水体富营养化现象严重^[19]。这 3 个湖泊从轻营养化到富营养化呈现阶梯变化,具有一定的代表性。因此本文选择松花湖、月亮泡、小兴凯湖作为研究区域,基于 Sentinel-2 MSI 影像,使用 6S、Acolite DSF、C2RCC、SeaDas、Sen2Cor、Polymer 和 iCOR 这 7 种大气校正方法对内陆水体进行大气校正研究,对比地面同步实测遥感反射率数据,评估这 7 种大气校正算法的校正精度和适用性,为水质参数反演时大气校正算法的选择提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区

松花湖 (126°45'E ~ 127°38'E, 43°07'N ~ 43°50'N)位于中国吉林省中部,距离吉林省吉林市主城区 15 km,流经桦甸市、蛟河市和吉林市,是中国第三大人工湖泊,属于温带季风气候。月亮泡 (123°42'E ~ 124°02'E, 45°39'N ~ 45°48'N)位于吉林省西北部大安市与镇赉县之间,洮儿河下游,嫩江西北侧,属于温带季风气候,地处松辽平原中部,是一座调洪、灌溉、养鱼等综合利用的大型平原水库。小兴凯湖 (132°20'E ~ 132°46'E, 45°16'N ~ 45°22'N)位于黑龙江省东南部,距密山市 35 km,属于温带季风气候区,是在大兴凯湖退缩过程中形成的一个子湖(图 1)。

1.2 哨兵-2 MSI 数据

Sentinel-2 MSI 影像下载自欧洲航天局哥白尼开放数据访问中心(<https://scihub.copernicus.eu>)。本文选用 2020 年 10 月 22 日松花湖、2020 年 10 月 20 日月亮泡和 2021 年 9 月 6 日小兴凯湖 3 景 Sentinel-2 MSI L1C 数据(L1C 级产品经过辐射和几何校正,投影为 UTM/WGS 1984 投影),这 3 景影像覆盖了相应的研究区域,且影像中研究区域及其周围地区上空晴朗无云。Sentinel-2 MSI 波段基本信息见表 1。

1.3 实测数据

在 2020 年 10 月 20 日的松花湖、2020 年 10 月 19 日的月亮泡和 2021 年 9 月 5 日的小兴凯湖分别测得相应点位(图 1)的实测数据,实测数据与影像日期间隔不超过 ± 2 d。考虑到样点数据采集是在晴朗无云的天气下进行,且在影像日期与采样日期时间间隔内湖泊水质没有发生快速变化,将影像日期延长至采样日期 ± 7 d 是比较合理的^[9],因此在本文中不考虑实测遥感反射率数据与 Sentinel-2 MSI 影像的时间差对反射率对比的影响。实测数据除现场光谱数据外,还包括实验室测得的总悬浮物质量浓度、叶绿素 a 质量浓度等数据。总悬浮物质量浓度使用重量法进行测定,根据滤膜中沉淀物的重量和过滤用的水量计算总悬浮物质量浓度;叶绿素 a 质量浓度的测定方法为分光光度法^[20],首先利用 0.45 μm 的微孔滤膜过滤水样,然后通过 90% 丙酮萃取和离心后的水样,最后在实验室中通过分光光度法测定叶绿素 a 质量浓度。在进行实测遥感反

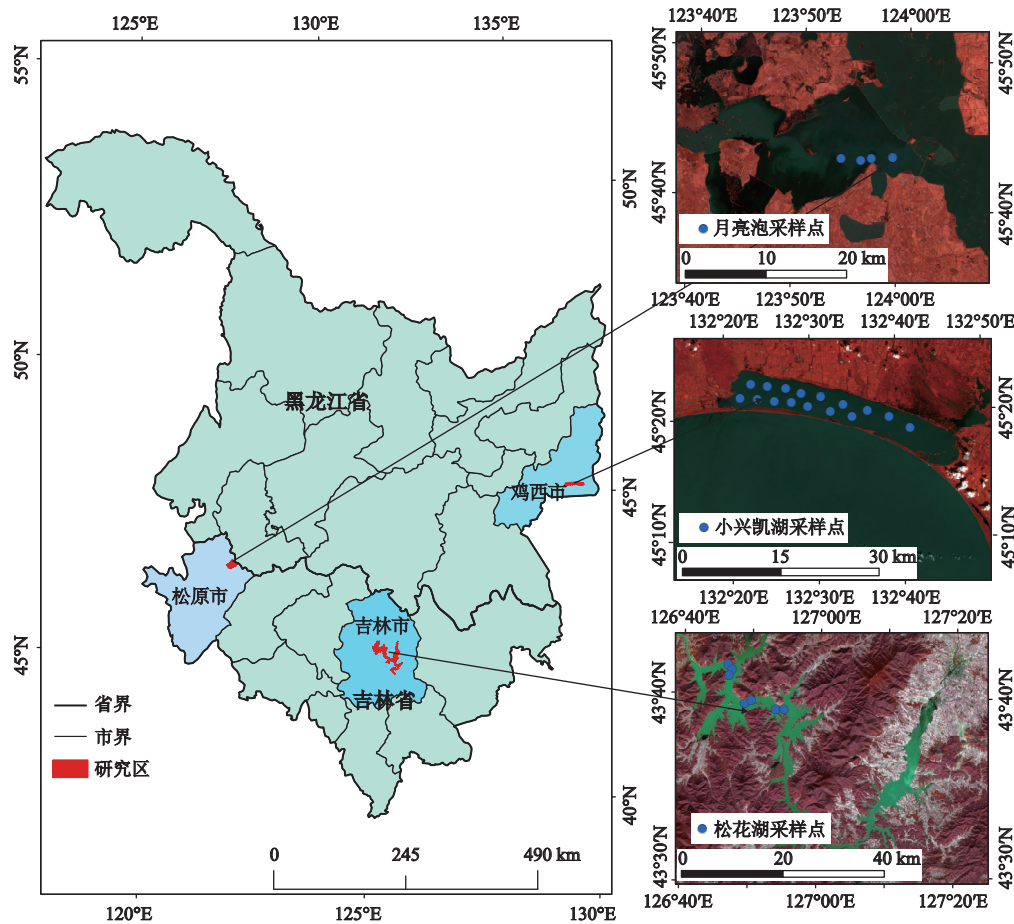


图 1 研究区域与实测点位置

Fig.1 Location of research area and measured site

表 1 Sentinel-2 卫星波段设置

Table 1 Sentinel-2 satellite band setting

波段序号	中心波长/nm	波宽/nm	分辨率/m	波段序号	中心波长/nm	波宽/nm	分辨率/m
波段1	443	20	60	波段8	842	115	10
波段2	490	65	10	波段8A	865	20	20
波段3	560	35	10	波段9	945	20	60
波段4	665	30	10	波段10	1375	30	60
波段5	705	15	20	波段11	1610	90	20
波段6	740	15	20	波段12	2190	180	20
波段7	783	20	20				

射率数据与校正后影像数据匹配时,以采样点为中心,选取周围 3×3 像元区域内所有有效像元反射率的均值作为该采样点校正后的反射率值,并要求采样点周围有效像元百分比大于 60%;同时为了防止噪声等因素的影响,要求 3×3 像元区域内有效像元均值不能超过有效像元值标准偏差的 1.5 倍。通过上述筛选,与校正后 Sentinel-2 卫星影像共匹配得到 27 个样点数据(松花湖 7 个,月亮泡 4 个,小兴

凯湖 16 个)用于本研究。

水体遥感反射率使用 TriOS RAMSES 高光谱辐射仪(350~950 nm, 采样间隔 3.3 nm)测得。现场光谱数据测量在晴朗无云、风速低的天气条件下进行,采用水面以上测量法^[21]每个采样点至少测量 10 次取平均值以保证数据的精确。采用遥感反射率 $R_{rs}(\lambda)$ 来分析评估这 7 种大气校正算法校正精度,遥感反射率定义如下:

$$R_{rs}(\lambda) = \frac{[L_w(\lambda) - L_{sky}(\lambda) \times \rho_{sky}]}{E_d(0^+, \lambda)} \quad (1)$$

式中, λ 为波长, $L_w(\lambda)$ 为光谱仪测量的水面辐亮度, $L_{sky}(\lambda)$ 为天空方向的辐亮度, ρ_{sky} 是空气-水界面反射系数(取固定值 0.256)^[22], $E_d(0^+, \lambda)$ 为水面入射辐照度。

1.4 大气校正算法

本文采用 6S、Acolite DSF、C2RCC、SeaDas、Sen2Cor、Polymer 和 iCOR 共 7 种大气校正方法, 其具体原理如下:

6S 模型是 Vermote 等^[23]在 5S 模型基础上的改进版本, 该算法考虑了目标高程、地表面的非朗伯体特性、大气中吸收分子种类的影响。它采用近似算法来估算大气和气溶胶的散射与吸收的影响。6S 大气校正的过程是从大气顶层表观反射率到地表反射率 $R_s(\lambda)$ 的反演, $R_s(\lambda)$ 是一个无单位的比值, 除以 π 等于 $R_{rs}(\lambda)$ ^[24]。6S 模型需要输入卫星过境时刻的大气参数, 经过计算输出的大气校正系数 x_a , x_b 和 x_c 用于计算 $R_s(\lambda)$:

$$R_s(\lambda) = \frac{x_a(\lambda)L_i(\lambda) - x_b(\lambda)}{\{1.0 + x_c(\lambda)[x_a(\lambda)L_i(\lambda) - x_b(\lambda)]\}} \quad (2)$$

式中, $L_i(\lambda)$ 是卫星传感器接收到的大气层顶辐亮度。文中参数设置为中纬度冬季大气模式, 大陆型气溶胶、550 nm 气溶胶光学厚度 0.23。输出 $R_s(\lambda)$ 。

Acolite 是由比利时皇家自然科学研究所开发的水体大气校正算法^[25], 有指数外推和暗像元两种大气校正方法(DSF), 本文采用暗像元大气校正方法。暗像元大气校正方法假定水体在近红外或短波红外波段存在反射率为 0 的暗像元, 通过暗像元预测大气路径辐射^[26]。对于 Sentinel-2 MSI 数据其可以根据 1610 nm 处的反射率掩膜非水像元, 为了防止水体像元被掩膜影响反射率对比, 文中提高了掩膜阈值。

C2RCC 大气校正算法是由 Doerffer 和 Schiller^[27]提出的基于神经网络的水体大气校正算法, 通过神经网络模拟辐射传输过程, 构建校正后水体反射率和大气顶层辐射亮度数据集^[28]。在进行大气校正时, 它根据大气顶层辐亮度值查找得到相应水体的反射率值。此外, 在对 Sentinel-2 MSI 数据进行校正时, C2RCC 算法会根据 B8 波段处的反射率掩膜陆地、云等非水像元。为了更准确的提取水体信息, 可以适当调大阈值。

SeaDas 是由 NASA GSFC 的 SeaDas 开发组

和海洋生物处理组(Ocean Biology Processing Group, OBPBG)开发的适用于海陆色度仪(Ocean and Land Colour Instrument, OLCI)等水色卫星的大气校正算法。目前, SeaDas-v7.5.2.1-l2gen 9.3.0 也可以处理 Sentinel-2 MSI 影像, 但是 Sentinel-2 影像的空间分辨率较高, 水体像元容易被掩盖。为了防止研究区域水体像元缺失影响实验结果, 本文在实验中取消了掩膜设置。

Sen2Cor 是欧洲航天局官方提供的 Sentinel-2 MSI 影像的大气校正方法, 该算法的核心是大气辐射传输模型 libRadtra。libRadtra 运用离散纵标法计算地球大气、太阳以及热辐射传输, 包含不同计算模块^[29]。Sen2Cor 将 libRadtra 代码生成的大气校正查找表集成在程序中, 该查找表存储的反射率的光谱分辨率为 0.6 nm, 通过滤波函数对光谱进行重采样, 得到特定通道的反射率。Sen2Cor 利用 Python 编译的可移植代码提供用户命令行和集成软件 2 种模式^[15]。

Polymer 是由 Didier Ramon 等^[30]提出的一种去除太阳耀光污染的大气校正算法。该算法是一种基于大气散射与太阳耀光的多项式拟合模型以及生物光学海水反射率模型的光谱匹配方法^[30]。目前, 该算法只支持 Linux 系统和 MacOS 系统运行, 在运行时需要联网在 NASA 上下载辅助数据。

iCOR 是由 De Keukelaere 等^[31]研发的一种基于影像的大气校正算法, 目前只能应用于 Sentinel-2 MSI 与 Landsat-8 OLI 数据。该算法将原始影像划分为不同的子网格, 假定子网格中大气性质均一, 通过波段阈值识别陆地像元和水体像元, 然后使用浓密植被法(Dense Dark Vegetation, DDV)结合陆地像元估算子场景气溶胶光学厚度(Aerosol Optical Thickness, AOT), 并将其外推到水面上。最后, 利用中等分辨率大气传输(MODTRAN-5)查找表对辐射传输方程进行求解。

6S 算法、Sen2Cor 算法和 iCOR 算法的输出结果均为地表反射率, 本研究将其输出结果除以 π 转化为遥感反射率进行精度对比。

1.5 精度评价

将校正后影像的遥感反射率与实测遥感反射率进行匹配, 参考线性拟合关系的决定系数 R^2 、均方根误差 RMSE、平均绝对百分比误差 MAPE 分析评价 6S、Acolite DSF、C2RCC、SeaDas、Sen2Cor、Polymer 和 iCOR 这 7 种大气校正方法精度。

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y'_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2}{n}} \quad (4)$$

$$MAPE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y'_i - y_i|}{y_i} \right] \times 100\% \quad (5)$$

式中, n 代表采样点数量, y_i 代表实测的第 i 个波段遥感反射率, y'_i 代表校正后的第 i 个波段遥感反射率数据, \bar{y} 代表实测遥感反射率平均值。

2 结果与讨论

2.1 水质参数与反射率特征

选择 400~900 nm 范围的实测光谱数据计算遥感反射率, 如图 2 所示。27 个采样点的光谱曲线波形基本一致, 呈现典型的内陆水体的光谱特征, 在 400~500 nm 由于叶绿素和黄色物质的吸收作用, 光谱反射率较低, 在 665 nm 附近月亮泡和小兴凯湖出现明显的谷值, 这是由于叶绿素 a 的吸收作用造成的, 而松花湖采样点叶绿素 a 质量浓度较低 (0.037~0.800 $\mu\text{g/L}$), 所以在 665 nm 附近未出现明显的叶绿素 a 吸收谷; 在 700 nm 附近由于叶绿素荧光作用的影响出现强烈的反射峰值, 这一反射峰值随着叶绿素质量浓度的增加向长波方向偏移; 810 nm 处的反射峰是由悬浮物引起的^[32], 松花湖采

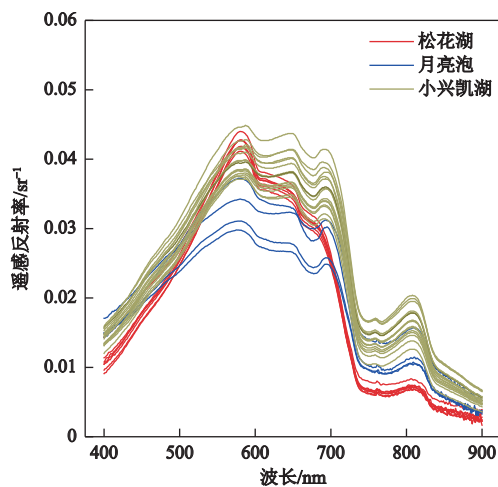


图 2 实测遥感反射率

Fig.2 Measured remote sensing reflectance

样点悬浮物质量浓度范围为 (10.5~11.5 mg/L) 低于月亮泡 (28.5~51.2 mg/L) 和小兴凯湖 (19~35 mg/L), 所以在 810 nm 附近松花湖的反射峰值较低。

2.2 MSI 大气校正算法验证

图 3 为大气校正后的 Sentinel-2 MSI 影像 (以月亮泡为例), 影像被重采样至 10 m, 右上角数字为波长 (单位为 nm)。6S、Sen2Cor 与 iCOR 算法的遥感反射率输出结果范围一致, 约为 0~0.075 sr^{-1} ; Acolite DSF 和 SeaDas 算法输出结果较小, 范围为 0~0.040 sr^{-1} ; C2RCC 的输出在 0~0.035 sr^{-1} ; Polymer 的输出结果范围最小, 为 0~0.025 sr^{-1} 。内陆水体的光谱曲线通常会在 665 nm 处由于叶绿素 a 的吸收作用出现谷值, 从 665 nm 到 704 nm 由于叶绿素的荧光作用反射率逐渐增加出现峰值, 这与 7 种校正算法的输出结果变化趋势一致。

结合实测遥感反射率数据, 选择 Sentinel-2 MSI 在水质反演中常用 443~740 nm 这 6 个波段对校正结果进行校正精度对比分析, 结果如图 4 所示: 6S、Acolite DSF、C2RCC、SeaDas、Sen2Cor、Polymer 和 iCOR 这 7 种大气校正算法校正后的结果均存在不同程度的低估, 但相较于其余 4 种算法, 6S、Sen2Cor 与 iCOR 算法的输出更接近于实测遥感反射率。图 4 中 Sen2Cor 和 iCOR 算法拥有较高的决定系数 (0.92, 0.93) 和较低的误差 (均方根误差分别为 0.0064 sr^{-1} 、0.0067 sr^{-1} ; 平均百分比误差分别为 22.25%、21.56%), 总体校正精度优于其余 5 种算法。6S 和 Acolite DSF 算法的决定系数高于 Sen2Cor 算法, 达到了 0.93, 但是均方根误差 (0.0076 sr^{-1} 、0.0087 sr^{-1}) 和平均绝对百分比误差 (25.82%、30.92%) 均高于 Sen2Cor 算法 (图 4a 和图 4b)。SeaDas 算法的校正精度高于 C2RCC 和 Polymer 算法, 决定系数为 0.90, 均方根误差和平均绝对百分比误差分别为 0.0099 sr^{-1} 和 32.98% (图 4d); Polymer 算法表现最差, 决定系数为 0.76, 均方根误差和平均绝对百分比误差分别为 0.0147 sr^{-1} 和 53.54% (图 4f); 其次是 C2RCC 算法 (图 4c)。为了更好的比较这 7 种大气校正算法的校正效果, 随机选择某一采样点进行校正后遥感反射率与实测遥感反射率对比, 如图 4h 所示, 7 种大气校正算法校正后的水体遥感反射率都比实测的遥感反射率低。除 C2RCC 算法外, 其余 6 种校正算法校正后的光谱曲线与实测光谱曲线波形相似, 而 C2RCC 算法在 490~665 nm 处的反射率变化幅度较大, 光谱曲

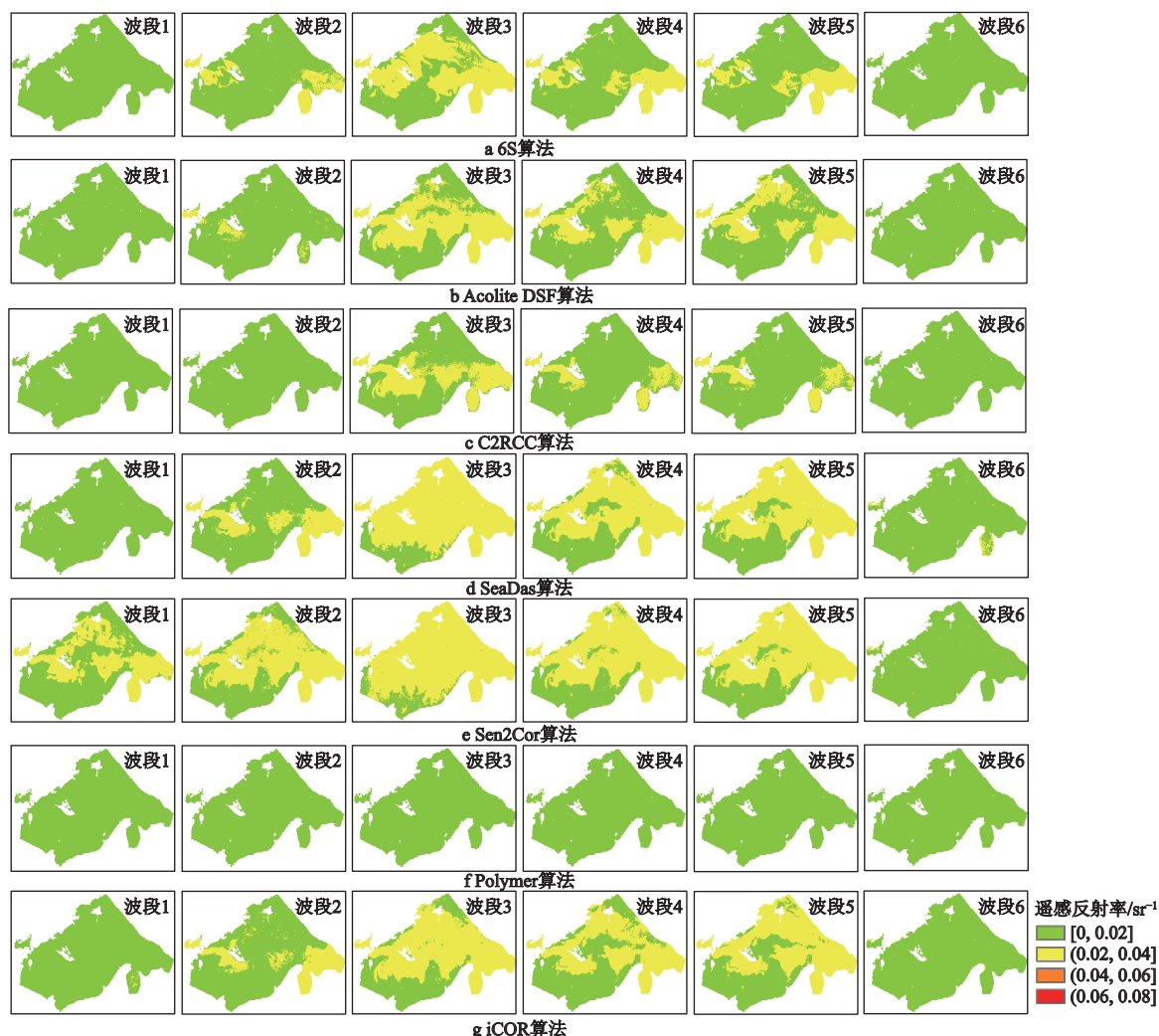


图3 月亮泡 Sentinel-2 校正后影像

Fig.3 Sentinel-2 corrected images in the Yueliangpao Lake

线形状与实测光谱有明显的差异。

2.3 MSI 大气校正算法波段对比分析

由图5可知 Sen2Cor 和 iCOR 算法在所有波段都有良好的表现, 产生了较低的均方根误差和平均绝对百分比误差, 并且在部分波段拥有相对较高的决定系数。在 560 nm、665 nm 和 705 nm 处, Sen2Cor 算法的决定系数低于除 Polymer 和 C2RCC 算法之外的其余 4 种算法, 但是拥有最低的均方根误差(0.0083 sr^{-1} 、 0.0078 sr^{-1} 、 0.0061 sr^{-1})和平均绝对百分比误差(20.79%、21.64%、18.95%), 整体校正精度优于其它 6 种算法。iCOR 算法虽然在 443 nm 处决定系数较低(0.39), 但其均方根误差(0.0044 sr^{-1})和平均绝对百分比误差(19.54%)低于其余 6 种算法; 在 740 nm 处, iCOR 算法与 SeaDas 算法的输出精度相似, 拥有较高的决定系数和

低于其余 5 种算法的均方根误差和平均绝对百分比误差。6S 算法在 490 nm 处的表现优于其余 6 种算法, 其决定系数、均方根误差和平均百分比误差分别为 0.55、 0.0059 sr^{-1} 和 21.40%。Acolite DSF 算法在各个波段的校正精度中等, 虽然拥有较高的决定系数, 但是均方根误差和平均绝对百分比误差也相对较高。Polymer 算法在所有波段均拥有最高的误差, 并且在大部分波段拥有最低的决定系数, 校正精度最差; C2RCC 算法的单波段校正精度优于 Polymer 算法, 但是也产生了较高的误差, 校正精度较低。

从大气校正算法本身的特点来看, Sen2Cor 算法其优点是普适性好、整体校正精度较高, 不需要人为输入复杂的参数, 操作简单, 缺点是需占用计算机的大量内存, 计算速度慢^[15]; iCOR 算法则不需

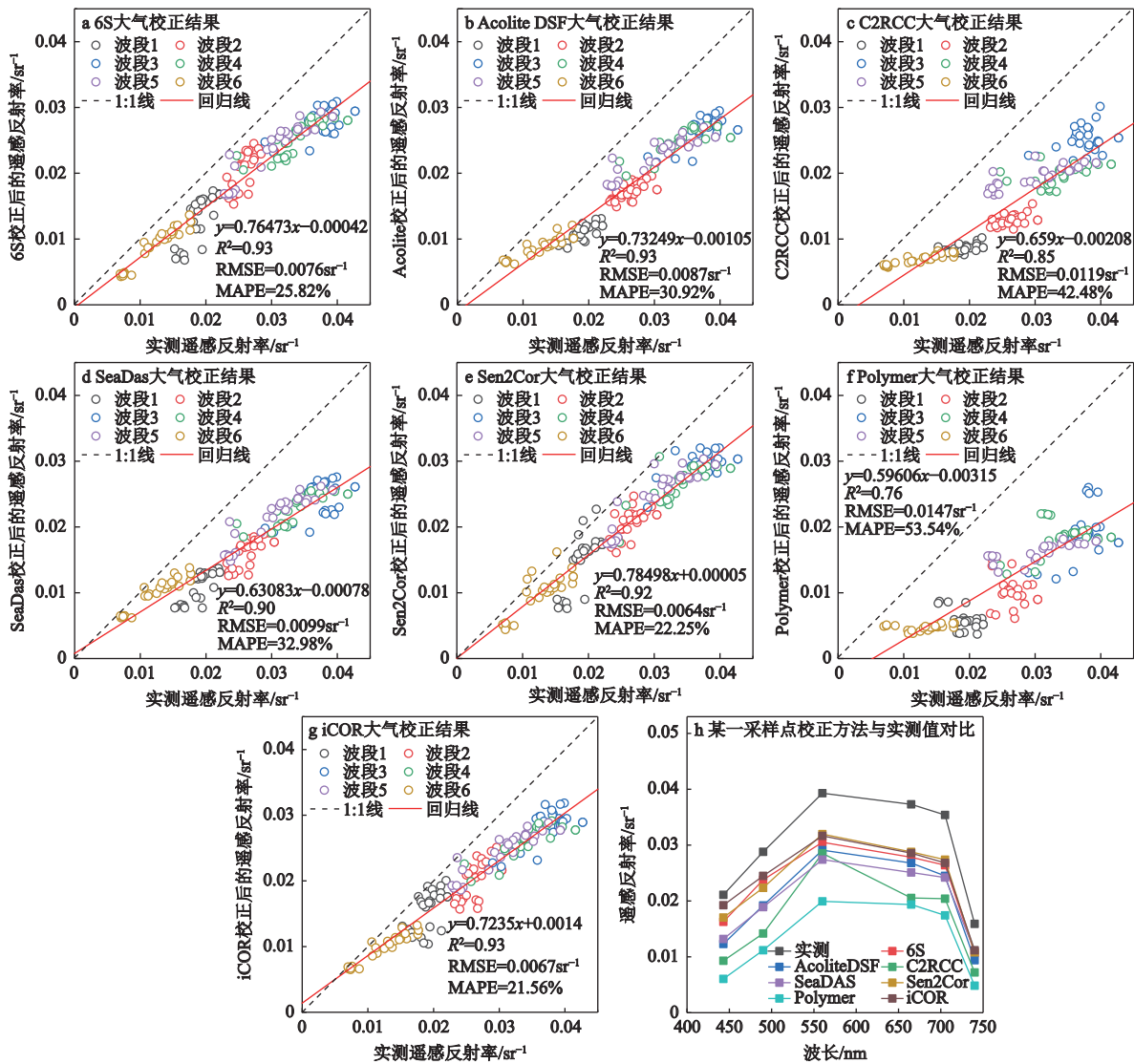


图 4 校正后遥感反射率与实测遥感反射率对比

Fig.4 Comparison of corrected remote sensing reflectance and measured remote sensing reflectance

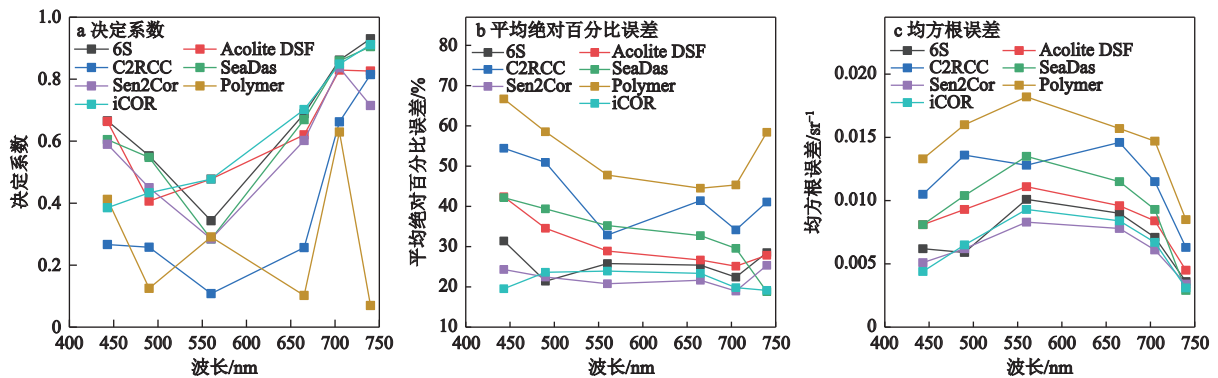


图 5 7 种大气校正算法 443~740 nm 校正精度对比

Fig.5 Comparison of correction accuracy of 7 atmospheric correction algorithms at 443-740 nm

要手动输入大气参量,且可以作为插件集成在 SNAP 软件中,操作简单,校正精度较高;6S 算法在陆地地物大气校正中精度较高,但对于水体的校正精度还有待改进^[33],而且 6S 算法需要输入气溶胶质量浓度等参数,参数获取较难,参数的精确程度对校正结果有很大的影响;SeaDas 算法集成了面向 I 类水体的近红外算法及其改进算法,以及后来面向浑浊近岸和内陆水体的短波红外算法,Acolite DSF 与其相似也集成了类似原理的算法,所以参数设置的不同对 SeaDas 算法和 Acolite DSF 算法的校正精度有很大的影响^[34];Polymer 算法主要是针对 I 类水体进行大气校正,在内陆浑浊水体中反射率通常会被明显的低估这与 David Doxaran^[8]的研究结果一致;C2RCC 是一种神经网络校正算法,它的校正精度与它的样本数量和样本类型有很大的关系,未来随着样本数量与样本类型的增多,它的校正精度也会有所提升^[7]。

3 结论

本文基于 6S、Acolite DSF、C2RCC、SeaDas、Sen2Cor、Polymer 和 iCOR 共 7 种大气校正算法对松花湖,月亮泡,小兴凯湖的 Sentinel-2 MSI 卫星影像进行大气校正处理,结合实测水体光谱对其精度进行分析评价。结果表明:

1) 在 6S、Acolite DSF、C2RCC、SeaDas、Sen2Cor、Polymer 和 iCOR 这 7 种大气校正算法中,Sen2Cor 和 iCOR 算法整体校正精度最好,拥有较高的决定系数(0.92, 0.93)、较低的均方根误差(0.0064 sr⁻¹、0.0067 sr⁻¹)和平均百分比误差(22.25%、21.56%),Polymer 算法的表现最差。在 443~740 nm 除 C2RCC 算法外,其余 6 种算法校正后的水体遥感反射率的光谱曲线形状与实测光谱有较好的一致性,这 7 种大气校正算法均可以在一定程度上去除大气影响。其中 iCOR 和 Sen2Cor 算法整体校正效果较好,建议在本文研究水体或相似水体中使用这两种算法校正 Sentinel-2 MSI 影像。

2) 在 443~740 nm 处单波段的校正精度对比中,Sen2Cor 和 iCOR 算法的拥有较高的校正精度,在所有波段它们均拥有较低的均方根误差和平均绝对百分比误差。此外,Sen2Cor 算法 560 nm、665 nm 和 705 nm 处整体校正精度优于其余 6 种算法,iCOR 算法除在 740 nm 与 SeaDas 算法校正精度相似优于其余 5 种算法外,在 443 nm 处也产生了较

低的误差,整体校正精度优于其余 6 种算法;6S 算法在 490 nm 处校正精度高于其余 6 种算法;Acolite DSF 整体校正精度中等;Polymer 算法校正效果最差在所有波段的平均绝对百分比误差均大于 44%;C2RCC 算法校正效果也较差,但是优于 Polymer 算法。

内陆水体的光学性质比较复杂,不同水体的光学性质不同,其大气校正算法的性能可能有所不同。本文中所采用的实测数据与影像日期存在±2 d 的时间间隔,采样点的水体组分与采样当天微弱的变化会对反射率的对比产生一定的影响。为了进一步验证基于 Sentinel-2 影像不同大气校正算法的适用性,应尽量使用与影像日期同步的实测数据。同时为提高大气校正精度,有必要对输入的参数进行敏感性分析,对校正方法加以分析改进,在后续的研究中需对水体根据浑浊程度、气溶胶厚度、季节、不同卫星传感器等条件的不同进行验证分析。

参考文献(References):

- [1] Gordon H R, Wang M. Retrieval of water leaving radiance and aerosol optical thickness over the oceans with SeaWiFS: A preliminary algorithm[J]. *Applied Optics*, 1994, 33(3): 443-452.
- [2] Morel A, Prieur L. Analysis of variations in ocean color[J]. *Limnology and Oceanography*, 1977, 22(4): 709-722.
- [3] Wang M, Antoine D, Deschamps P Y et al. Atmospheric correction for Remotely-Sensed Ocean-Color Products [R]. Canada: International Ocean-Colour Coordinating Group, 2010: 15-58.
- [4] Ilori C O, Pahlevan N, Knudby A. Analyzing performances of different atmospheric correction techniques for Landsat 8: Application for coastal remote sensing[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(4): 469.
- [5] 龚燃. 哨兵-2A 光学成像卫星发射升空[J]. *国际太空*, 2015(8): 36-40. [Gong Ran. Sentinel-2A satellite launches. *International Space*, 2015(8): 36-40.]
- [6] 姚杰鹏, 杨磊库, 陈探, 等. 基于 Sentinel-1, 2 和 Landsat 8 时序影像的鄱阳湖湿地连续变化监测研究[J]. *遥感技术与应用*, 2021, 36(4): 760-776. [Yao Jiepeng, Yang Leiku, Chen Tan et al. Consecutive monitoring of the Poyang Lake Wetland by Integrating Sentinel-2 with Sentinel-1 and Landsat 8 Data. *Remote Sensing Technology and Application*, 2021, 36(4): 760-776.]
- [7] Vanhellefont 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.
- [8] Renosh P R, Doxaran D, Keukelaere L D 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.
- [9] 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.
- [10] 董舜丹, 何宏昌, 付波霖, 等. 基于Landsat-8陆地成像仪与Sentinel-2多光谱成像仪传感器的香港近海海域叶绿素a浓度遥感反演[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(20): 8702-8712. [Dong Shundan, He Hongchang, Fu Bolin et al. Remote sensing inversion of chlorophyll a concentration in Hong Kong coastal waters based on Landsat-8 operational land imager and Sentinel-2 multispectral imager sensors. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(20): 8702-8712.]
- [11] 谢勇, 李凯云, 李家国, 等. Sentinel-2A影像珠海市污染水体识别[J]. *遥感信息*, 2021, 36(3): 1-9. [Xie Yong, Li Kaiyun, Li Jiaguo et al. Water pollution identification in Zhuhai city based on sentinel-2 imagery. *Remote Sensing Information*, 2021, 36(3): 1-9.]
- [12] 刘宇晨, 高永年. Sentinel时序影像的长江流域地表水体提取[J]. *遥感学报*, 2022, 26(2): 358-372. [Liu Yuchen, Gao Yongnian. Surface water extraction in Yangtze River Basin based on sentinel time series image. *National Remote Sensing Bulletin*, 2022, 26(2): 358-372.]
- [13] 杨雷, 禹定峰, 高嵩, 等. Sentinel-2的胶州湾水体透明度遥感反演[J]. *红外与激光工程*, 2021, 50(12): 515-521. [Yang Lei, Yu Dingfeng, Gao Hao et al. Remote sensing retrieval of secchi disk depth in Jiaozhou Bay using Sentinel-2 MSI image. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(12): 515-521.]
- [14] 潘媛媛, 李长春, 马潇潇, 等. Sentinel-2A卫星大气校正方法及校正效果[J]. *遥感信息*, 2018, 33(5): 41-48. [Pan Yuanyuan, Li Changchun, Ma Xiaoxiao et al. Atmospheric correction method of Sentinel-2A satellite and result analysis. *Remote Sensing Information*, 2018, 33(5): 41-48.]
- [15] 苏伟, 张明政, 蒋坤萍, 等. Sentinel-2卫星影像的大气校正方法[J]. *光学学报*, 2018, 38(1): 322-331. [Su Wei, Zhang Mingzheng, Jiang Kunping et al. Atmospheric correction method for Sentinel-2 satellite imagery. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(1): 322-331.]
- [16] 穆超, 刘振宇, 孟丹. 基于Sentinel-2卫星数据的内陆湖泊水体大气校正[J]. *测绘通报*, 2021(9): 9-14. [Mu Chao, Liu Zhenyu, Meng Dan. Atmospheric correction of inland lake water based on Sentinel-2 satellite data. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2021(9): 9-14.]
- [17] 程云轩, 赵可, 张越, 等. 松花湖沉积物溶解性有机质荧光光谱特性[J]. *环境科学*, 2022, 43(4): 1941-1949. [Cheng Yunxuan, Zhao Ke, Zhang Yue et al. Fluorescence spectral characteristics of dissolved organic matter in Songhua Lake sediment. *Environmental Science*, 2022, 43(4): 1941-1949.]
- [18] 方芳, 杨雪玲, 张志强, 等. 月亮泡水体营养状况评价[J]. *中国地方病防治杂志*, 2010, 25(1): 27-29. [Fang Fang, Yang Xueling, Zhang Zhiqiang et al. Study on eutrophication of Yueliang Lake. *Chinese Journal of Control of Endemic Disenaces*, 2010, 25(1): 27-29.]
- [19] 郑恺原, 向小华. 基于AHM-CRITIC赋权的小兴凯湖水质评价模型[J]. *节水灌溉*, 2020(9): 79-83. [Zheng Kaiyuan, Xiang Xiaohua. Water quality evaluation model of Xiaoxingkai Lake based on AHM-CRITIC weighting. *Water Saving Irrigation*, 2020(9): 79-83.]
- [20] 国家环保总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 第4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002. [The State Environmental Protection Administration the Water and Wastewater Monitoring Analysis Method Editorial Board. *Water and wastewater monitoring analysis method*. 4th edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.]
- [21] 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. [Tang Junwu, Tian Guoliang, Wang Xiaoyong et al. The methods of water spectra measurement and analysis I: Above-water method. *Journal of Remote Sensing*, 2004(1): 37-44.]
- [22] 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.
- [23] Vermote E F, Tanré 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.
- [24] 卢昭羿. 内陆水体多源卫星遥感大气校正方法研究[D]. 北京: 中国科学院遥感与数字地球研究所, 2019. [Lu Zhaoyi. Research on atmospheric correction method for multi-source satellite remote sensing of inland water. Beijing: Institute of Remote Sensing and Digital Earth, the Chinese Academy of Sciences, 2019.]
- [25] Knaeps E, Ruddick K G, Doxaran D et al. A SWIR based algorithm to retrieve total suspended matter in extremely turbid waters[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 168: 66-79.
- [26] Vanhellemont Q, Ruddick K. Acolite for Sentinel-2: Aquatic applications of MSI imagery[C]//Proceedings of the 2016 ESA Living Planet Symposium. Prague: European Space Agency, 2016: 9-13.
- [27] Doerffer R, Schiller H. The MERIS case 2 water algorithm[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2007, 28(3-4): 517-535.
- [28] 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 2016 ESA Living Planet Symposium. Prague: European Space Agency, 2016, 740: 54.
- [29] 霍娟, 吕达仁. 晴空与有云大气辐射分布的数值模拟及其对全天空图像云识别的应用[J]. *气象学报*, 2006(1): 31-38. [Huo Juan, Lyu Daren. Characteristics and distribution of all-sky radiance by libradtran modeling: For cloud determination algorithm in all-sky images. *Acta Meteorologica Sinica*, 2006(1):

- 31-38.]
- [30] Antoine D, Morel A. Relative importance of multiple scattering by air molecules and aerosols in forming the atmospheric path radiance in the visible and near-infrared parts of the spectrum[J]. *Applied Optics*, 1998, 37(12): 2245-2259.
- [31] 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.
- [32] 吕恒, 李新国, 江南. 基于反射光谱和模拟MERIS数据的太湖悬浮物遥感定量模型[J]. *湖泊科学*, 2005, 17(2): 104-109. [Lyu Heng, Li Xinguo, Jiang Nan. Estimation of suspended solids concentration in Lake Taihu using spectral reflectance and simulated MERIS. *Journal of Lake Sciences*, 2005, 17(2): 104-109.]
- [33] 程春梅, 韦玉春, 李渊, 等. 太湖水体GF-1/WFV影像的6S逐像元大气校正[J]. *遥感技术与应用*, 2020, 35(1): 141-152. [Cheng Chunmei, Wei Yuchun, Li Yuan et al. Atmospheric correction of GF-1/WFV image in Taihu Lake based on the 6S model pixel by pixel. *Remote Sensing Technology and Application*, 2020, 35(1): 141-152.]
- [34] 张兵, 李俊生, 申茜, 等. 长时序大范围内陆水体光学遥感研究进展[J]. *遥感学报*, 2021, 25(1): 37-52. [Zhang Bing, Li Junsheng, Shen Qian et al. Recent research progress on long time series and large scale optical remote sensing of inland water. *Journal of Remote Sensing*, 2021, 25(1): 37-52.]

Evaluation of atmospheric correction processors for Sentinel-2 imagery for typical lakes in Northeast China in autumn

Li Yong^{1,2}, Li Sijia², Song Kaishan², Xu Maolin¹, Liu Ge²

(1. *School of Civil Engineering, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114000, Liaoning, China*; 2. *Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, Jilin, China*)

Abstract: Quantitative inversion of lake water quality parameters is the most widely used field of lake remote sensing, and the atmospheric correction is one of the key steps to determine the inversion accuracy. In this study, seven atmospheric correction processors, e.g., 6S, Acolite DSF, C2RCC, SeaDas, Sen2Cor, Polymer and iCOR, were used to validate the performances of processors with *in situ* Remote Sensing Reflectance in the Songhua Lake, the Yueliangpao Lake and the Xiaoxingkai Lake, respectively. From the overall comparison results, these seven atmospheric correction processors had low estimation results comparing with *in situ* reflectance measurement in visible bands (400-800 nm). Of which, the Sen2Cor and iCOR processors has the best performance, and the Polymer processors has the worst performance, considering the accuracy. All processors performed well and showed a similar tendency with *in situ* reflectance considering MSI bands, excepted for C2RCC. For the validation performance of single bands, the root mean square error and mean absolute percentage error of Sen2Cor and iCOR processors are lower than the other five processors in almost all bands. Sen2Cor processor worked best at 560 nm, 665 nm and 705 nm, and iCOR processor performed is better than other algorithms at 443 nm and 740 nm, 6S processor has the highest calibration accuracy at 490 nm, with the lowest root mean square error (0.0059 sr^{-1}) and average absolute percentage error (21.40%). Further, our study on the validation of seven atmospheric correction processors indicated that they can remove atmospheric influence and increase the availability of imagery, as well as the Sen2Cor and iCOR preformed best and was more appropriate for studied lakes or lakes with similar aquatic environments.

Key words: atmospheric correction; Sentinel-2 satellite; inland lake; remote sensing reflectance