

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, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2019.09.015

Li Yuan, Guo Yulong, Cheng Chunmei, et al. Remote estimation of total suspended matter concentration in the Hangzhou Bay based on OLCI and its water color product applicability analysis[J]. Haiyang Xuebao, 2019, 41(9): 156–169, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2019.09.015

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

李渊^{1,2}, 郭宇龙^{3*}, 程春梅⁴, 张毅博², 胡耀躲², 夏忠², 毕顺⁵

(1. 浙江工商大学 旅游与城乡规划学院, 浙江 杭州 310018; 2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所 湖泊与环境国家重点实验室, 江苏 南京 210008; 3. 河南农业大学 资源与环境学院, 河南 郑州 450002; 4. 浙江水利水电学院 测绘与市政工程学院, 浙江 杭州 310018; 5. 南京师范大学 地理科学学院, 江苏 南京 210023)

摘要: 悬浮物含量及其时空分布是河口海岸环境中关心的热点问题。2016 年 2 月 16 日, 欧洲航天局发射了新一代海洋水色传感器 (OLCI), 该传感器具有良好的时空及光谱分辨率。本研究结合 2017 年 7 月杭州湾同步采样数据, 对比了 6 种大气校正算法和 8 种悬浮物浓度 (TSM) 估算模型, 遴选和分析了适宜于杭州湾和 OLCI 数据的大气校正方法和 TSM 估算模型, 验证了 OLCI 数据二级产品精度和适用性。结果表明: (1) 基于紫外光谱的大气校正算法 (UVAC) 精度最高, 同步 4 个采样点的大气校正平均相对误差 (MAPE) 分别为 34.21%、13.11%、5.92% 和 20.28%。在除 Oa1 以外的 14 个波段的 MAPE 均值为 15.23%, Oa4 至 Oa10 波段的 MAPE 低于 8%; (2) 基于 Oa16/Oa5 的波段比值模型, 具有良好的建模 (MAPE 为 16.49%, RMSE 为 50.92 mg/L) 和验证 (MAPE 为 19.08%, RMSE 为 19.29 mg/L) 精度及模型稳健性; (3) 基于 C2RCC 算法的固有光学量和 TSM 含量产品及 OLCI 二级 TSM 含量产品在杭州湾精度较差, 不适用于杭州湾 TSM 和固有光学量遥感监测应用; (4) 空间上, TSM 在杭州湾中部区域含量较低, 在杭州湾南岸和湾口区域含量较高。

关键词: 杭州湾; OLCI 数据; 悬浮物浓度; 适用性分析; 大气校正

中图分类号: X87

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2019)09-0156-14

1 引言

悬浮颗粒物是水体中营养物质和污染物的重要载体, 对水体透明度、水下光场和水体初级生产力具有重要影响^[1-4]。杭州湾位于浙江省和上海市之间, 下游邻接舟山海域和东海, 上游接纳钱塘江, 是典型的河口海湾^[5]。受长江和钱塘江两大河流径流、入海泥沙、潮汐和人类活动的影响, 杭州湾悬浮物具有高浓度、宽范围、高动态的特点^[6-7]。此外, 据《2017 年

浙江省环境状况公报》显示, 杭州湾水域为劣四类水质, 水体处于严重富营养化状态。

目前, 利用对地观测卫星是获取陆地、水体和大气等要素大尺度、长时间观测数据的有效途径。2016 年 2 月 16 日, 欧洲航天局发射了新一代的海洋水色卫星, 哨兵 3A (Sentinel-3A) 卫星。Sentinel-3A 上搭载的 OLCI 传感器, 具有 21 个波段, 波段范围 400~1 020 nm, 空间分辨率 300 m^[8]。OLCI 是欧洲航天局 Envisat MERIS 的后继卫星传感器, 保留了 MERIS 传

收稿日期: 2018-08-15; 修订日期: 2018-11-01。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41501374, 41701422); 浙江省自然科学基金项目 (LQ16D010001)。

作者简介: 李渊 (1985—), 男, 山西省长治市人, 副教授, 主要从事水环境遥感研究。E-mail: liyuannjnu@163.com

* 通信作者: 郭宇龙, 讲师, 主要从事水环境遥感研究。E-mail: gyl.18@163.com

传感器的波段设置,同时在蓝光、红光和近红外光谱区域新增了光谱通道,为遥感估算水色要素提供了更多波段选择。2018年4月25日,同样搭载了OLCI传感器的Sentinel-3B卫星发射升空。在两颗卫星的覆盖下,OLCI数据可以在1~2d内获得1景数据,极大地改善了数据的时间分辨率,提高了对地观测的动态性^[9]。相比于目前常见的对地观测传感器,如GOCI、MODIS和Landsat等,OLCI传感器具有明显优势。具体地,在时间分辨率方面,OLCI数据优于Landsat系列数据;在空间分辨率方面,OLCI数据优于GOCI和MODIS数据;在波段设置及光谱分辨率方面,OLCI数据优于GOCI和Landsat系列数据。由于Landsat卫星具有较长的重访周期(16d),因此,该数据在动态性极强的杭州湾无法满足高频监测。另外,GOCI和MODIS传感器已接近和超过卫星设计寿命。因此,开展基于OLCI数据的杭州湾悬浮物浓度监测研究具有重要的理论和现实意义。

大气校正和水色要素估算模型的精度及其适用性是实现水色要素遥感定量监测的关键^[10]。高精度的大气校正方法能够最大程度地消除大气环境对水色要素信号的影响,从而为水色要素估算模型提供更加准确的水色要素光谱信号;高精度的水色要素估算模型是实现水色要素准确估算的重要环节。然而,由于OLCI属于新兴遥感数据,在当前研究区及类似高浑浊水体中该如何选取大气校正方法以及悬浮物浓度估算模型,目前还鲜有报道。针对该问题,本研究

基于杭州湾野外采样水色数据,结合同步过境的OLCI数据,通过对比常见的大气校正方法和悬浮物浓度估算算法的精度和适用性,遴选出适宜于OLCI数据的高浑浊水体大气校正方法和悬浮物浓度估算模型;验证欧洲航天局发布遥感反射率和水色要素产品精度,评价OLCI数据及其相关水色要素产品的适用性,期为OLCI数据在内陆及近海浑浊水体中估算悬浮物浓度提供参考和借鉴。

2 数据与方法

2.1 研究区概况

杭州湾位于长三角地区,紧邻长江口,与舟山海域、北仑港海域相连(图1),呈喇叭型,是典型的强潮河口。杭州湾水域面积约5000 km²,湾顶激浦宽约20 km,湾口(芦潮港-镇海)宽约100 km,全长约90 km^[11]。杭州湾内的港口航道、滩涂及水产资源丰富,经济开发利用价值巨大。

2.2 数据采集与分析

2.2.1 水质与遥感反射率数据采集与分析

2017年7月22-24日,在杭州湾进行了野外采样,50个采样点空间分布如图1所示。现场测量水体透明度(SDD)和遥感反射率,并收集水体表层(约50 cm)水样用以分析水体总悬浮物浓度(TSM)、有机悬浮物浓度(OSM)和无机悬浮物浓度(ISM)。野外采样期间,水样低温冷藏保存,当晚送回实验室进行水质分析。

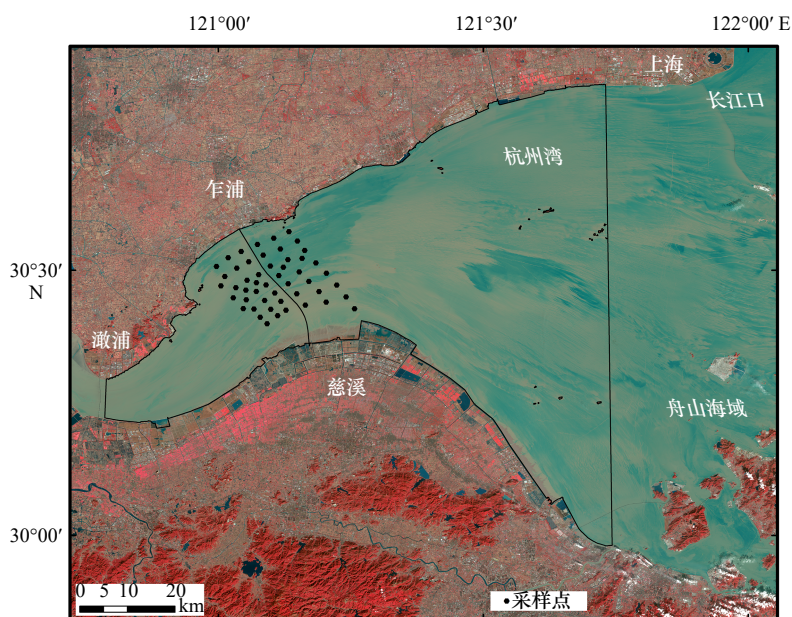


图1 研究区及采样点分布示意

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

总悬浮物浓度采用常规的干燥、烘烧、称重法 (GB/T 11901-1989) 测定^[12]。首先将 Whatman GF/F 滤膜 (直径 47 mm) 在马弗炉中以 550℃ 的条件下煅烧 4 h, 然后冷却、称重, 并用滤膜过滤一定体积的水样, 最后在烘箱中以 105℃ 进行烘干 4 h, 再次称重。两次重量之差除以水样体积即可计算获得 TSM。然后, 将上述滤膜继续在马弗炉中以 550℃ 的条件下煅烧 4 h, 冷却、称重, 进而可计算获得 ISM。TSM 与 ISM 之差即为 OSM。

颗粒物的吸收系数 (a_p) 是采用定量滤膜技术 (QFT), 利用紫外分光光度计进行测量^[13]。非藻类颗粒物吸收系数 (a_d) 是利用经次氯酸钠漂白过后的水样, 按照 a_p 测量方法进行测量。藻类颗粒物吸收系数 (a_{ph}) 等于 a_p 与 a_d 之差。

水体遥感反射率利用 ASD FieldSpec Pro 便携式光谱辐射计, 采用唐军武等^[14] 提出的内陆二类水体水面以上光谱测量方法进行测量。

2.2.2 OLCI 数据获取与预处理

结合野外采样时间, 获取了 2017 年 7 月 23 日 1 景同步、无云 OLCI Level 1 EFR 产品数据 (空间分辨率 300 m), 卫星过境时间为 10:13。OLCI 数据的波段设置、波宽和信噪比等信息参见文献 [8]。OLCI 数据的裁剪和投影等相关数据预处理在欧洲航天局官方发布的处理软件 SNAP 中完成。为评价欧洲航天局官方大气校正算法所得的遥感反射率精度及其适用性, 获取了当日 OLCI Level 2 EFR 产品数据。

2.3 大气校正方法

大气校正是水色定量遥感估算中重要的卫星数据预处理步骤之一, 其校正精度直接影响水色产品的估算精度。一方面, 目前尚无针对浑浊水体通用的大气校正算法; 另一方面, 哨兵卫星发射升空不久, 需要寻求适宜于高混浊水体的大气校正算法。因此, 本研究选取目前常用的 6 种大气校正方法进行对比分析及适用性评价, 确定适宜于高混浊水体和哨兵卫星的大气校正方法。

6S 大气校正模型是基于辐射传输模型, 通过输入卫星和太阳几何参数、卫星波段光谱范围、大气和气溶胶模式和地表高程等参数信息实现大气校正^[15]。本研究中大气模型选择中纬度夏季, 气溶胶类型选择城市型, 水汽和臭氧含量、卫星和太阳几何信息从 OLCI 辅助数据中获取。

Flaash 大气校正模型集成于 ENVI 软件中, 适合于可见光至近红外的多种多光谱和高光谱传感器大气校正, 被广泛应用于二类水体大气校正^[16]。依据研

究区纬度和卫星过境日期, 参考 Flaash 大气模型选择标准, 大气模型选择为热带型, 气溶胶类型选择城市型, 未进行气溶胶和水汽反演。

MUMM 大气校正算法是假设研究区内气溶胶反射率和离水反射率在 765/865 nm 处具有空间一致性, 从而计算获得近红外波段气溶胶反射率, 并推广至可见光波段, 最终求得水体遥感反射率。该算法适合于对浑浊水体进行大气校正^[17]。本研究利用 Seadas 软件实现 MUMM 大气校正, 2 个近红外波段选择为 779 nm 和 865 nm^[9]。

UVAC 是 He 等^[18] 于 2012 年提出的基于紫外波段实现高浑浊水体大气校正的方法。在高度浑浊水体中, 黄色物质和非色素颗粒物在紫外波段具有高吸收特性, 因此, 假设紫外波段 (365 nm) 离水辐亮度可以忽略。同时, 假设气溶胶散射反射率光谱在可见光至近红外波段是平稳的, 即各波段相等。基于上述假设, 可以求解获取各波段气溶胶散射反射率, 最终获得水体遥感反射率。但目前在轨的海洋水色卫星传感器无 365 nm 波段, 因此选择以 412 nm 为参考波段^[18]。研究结果表明, UVAC (412 nm) 算法精度与 UVAC (365 nm) 算法精度十分接近, 精度较高且满足需要^[18]。2013 年, He 等^[7] 在杭州湾利用 GOCI 数据, 假设 412 nm 处离水辐亮度为 0, 利用近红外波段 745 nm 和 865 nm 估算大气校正因子, 进而实现对 865 nm 处气溶胶散射反射率的估算, 最终完成大气校正。由于 OLCI 数据新增中心波长为 400 nm 的 Oa1 波段, 而且 400 nm 处离水辐亮度通常低于 412 nm。所以, 本研究中使用 400 nm 代替 412 nm, 近红外波段选择不变。

C2RCC 是集成在 SNAP 软件中的对哨兵数据进行大气校正的标准算法^[19]。该算法可以对 OLCI、哨兵 2 号 MSI、MERIS、MODIS 和 VIIRS 等多种数据进行大气校正。在 SNAP 软件中, 输入 OLCI Level 1 数据, 利用 C2RCC 算法, 可以输出大气校正后的遥感反射率、固有光学量、叶绿素浓度、悬浮物浓度和黄色物质等多种产品数据。

BPAC 大气校正算法是 OLCI Level 2 数据的标准大气校正算法, 该产品可以在欧洲航天局官方网站 (<https://codarep.eumetsat.int>) 上下载获取。BPAC 算法是一种耦合水文模型的大气校正算法, 之前已被成功应用于 MERIS 数据^[20]。

2.4 TSM 估算算法

在水色三要素 (悬浮颗粒物、叶绿素和黄色物质) 中, 通常悬浮物信号较强, 所以遥感估算 TSM 精度相对较高。由于杭州湾 TSM 高, 浓度跨度范围大,

这为遥感估算 TSM 带来了新的挑战。因此,亟需寻求适宜于 OLCI 的杭州湾 TSM 估算模型。遥感估算 TSM 常用的算法为经验和半经验算法。本研究在上述 2 类算法中选取了具有代表性的 8 种反演模型进行对比评价。具体地,经验算法包括:单波段^[2]、波段比值^[7]、三波段^[21-22]、多元回归^[23]、SAI 指数方法^[24];半经验算法包括: SERT 算法^[6]、3S 模型^[25] 和 Nechad 模型^[26]。

单波段与波段比值是通过分析单波段遥感反射率 $[R_{rs}(\lambda)]$ 、波段比值遥感反射率 $[R_{rs}(\lambda_1)/R_{rs}(\lambda_2)]$ 与 TSM 之间的相关性,寻找最优波段位置,进而结合不同数学模型(如:线性、指数、对数等),利用建模和验证数据集去确定最优反演模型。类似地,多元回归模型则是构建多波段线性组合与 TSM 之间的数学模型,实现 TSM 遥感估算。

三波段模型^[21]的形式为 $TSM=a+b[R_{rs}(\lambda_2)+R_{rs}(\lambda_3)]+c[R_{rs}(\lambda_1)/R_{rs}(\lambda_2)]$,其中 a, b, c 为常数系数,因子 $[R_{rs}(\lambda_2)+R_{rs}(\lambda_3)]$ 为悬浮物敏感因子, $[R_{rs}(\lambda_1)/R_{rs}(\lambda_2)]$ 为叶绿素敏感因子。

SAI 指数法^[24]是通过构建光谱指数,实现 TSM 反演。该算法的反演公式如下

$$\lg(TSM) = a \cdot SAI + b, \quad (1)$$

$$SAI = [d \cdot R_{rs}(\lambda_1) + (1-d) \cdot R_{rs}(\lambda_3)] / R_{rs}(\lambda_2), \quad (2)$$

$$d = (\lambda_2 - \lambda_1) / (\lambda_3 - \lambda_1), \quad (3)$$

式中, $\lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_3$; a, b, d 为常数。

Shen 等^[6]于 2010 年提出了 SERT 半经验算法,该算法构建了 R_{rs} 与 TSM 之间的响应函数,进而基于多波段转换方法,实现了基于 MERIS 数据的长江口高混浊水体 TSM 估算。 R_{rs} 与 TSM 之间的函数关系式为

$$R_{rs} = \frac{\alpha \cdot \beta \cdot TSM}{1 + \beta \cdot TSM + \sqrt{1 + 2 \cdot \beta \cdot TSM}}, \quad (4)$$

式中, α 和 β 为具有物理意义的常量。

Chen 等^[25]于 2013 年提出了 3S 半分析算法,认为 TSM 可以用下式进行估算

$$TSM = a + b [R_{rs}(\lambda_1)^{-1} - R_{rs}(\lambda_2)^{-1}], \quad (5)$$

式中, a, b 为常数系数; λ_1 在 690~900 nm 之间; λ_2 在 720~780 nm 或 840~900 nm 之间。该算法基于 MODIS、MERIS 和 SeaWiFS 数据在长江口进行了 TSM 反演估算研究。

Nechad 等^[26]基于生物光学模型,构建了具有一定普适性的 TSM 反演半分析算法。反演公式可以表示为

$$TSM = a \cdot [R_{rs}(\lambda) / (c - R_{rs}(\lambda))] + b, \quad (6)$$

式中, a, b 为常数系数, c 为具有物理意义的常量。马骅^[27]根据长江口采样数据,对参数 c 进行了率定,取

值为 0.093。本研究亦采用该值。

2.5 OLCI 二级产品数据获取与分析

本研究中所涉及的 OLCI 二级产品主要包括 TSM 含量产品、固有光学量产品 ($a_{ph}(443)$ 和 $a_d(443)$) 以及遥感反射率产品。具体地, TSM 含量产品主要有 2 个数据来源,其一是从欧洲航天局官方网站下载的 OLCI Level 2 数据产品,其二是基于 C2RCC 算法模块获得的 TSM 含量产品;固有光学量产品 ($a_{ph}(443)$ 和 $a_d(443)$) 是将 OLCI Level 1 数据在 SNAP 软件中经 C2RCC 算法处理分析后所得;遥感反射率产品是从欧洲航天局官方网站下载的 OLCI Level 2 数据产品。本研究将结合地面同步采样数据,对上述二级产品数据的精度和适用性进行分析。

2.6 精度分析

本研究中大气校正、TSM 反演模型和 OLCI 二级产品精度采用平均相对误差 (Mean Absolute Percentage Error, MAPE) 和均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE) 进行评价。MAPE 和 RMSE 的计算公式可参考文献 [12]。TSM 反演模型构建过程中的相关性分析、多元回归分析、非线性拟合等方法均在 MATLAB(2016) 软件中实现。

3 结果与讨论

3.1 杭州湾水体水质及光学特性分析

地面 TSM 采样结果显示, TSM 范围为 33.88~695.24 mg/L, 均值为 (127.79±130.37) mg/L; OSM 范围为 0.45~19.51 mg/L, 均值为 (5.71±4.05) mg/L; ISM 范围为 28.74~675.73 mg/L, 均值为 (120.87±130.04) mg/L。其中, ISM/OSM 的范围为 82.94%~99.61%, 均值为 93.87%。ISM 与 TSM 呈现出显著的强相关性(相关系数为 0.99)(图 2)。上述结果表明,杭州湾水体以无机悬浮物为主导。

杭州湾 a_{ph} 和 a_d 均值如图 2 所示。从图 2 中可以看出, a_{ph} 在 450~550 nm 范围内随波长增加而递减,在 550~650 nm 范围内变化不大,在 675 nm 处有一个由叶绿素 a 的吸收作用出现的峰值。 a_d 在 400~800 nm 范围内随波长增加逐渐递减,吸收曲线遵循指数衰减规律。杭州湾 $a_{ph}(440)$ 和 $a_{ph}(675)$ 均值分别为 0.35 m^{-1} 和 0.18 m^{-1} , 低于珠江口的 0.51 m^{-1} 和 0.22 m^{-1} ^[26]。杭州湾 $a_d(440)$ 均值为 5.08 m^{-1} , 高于珠江口的 2.16 m^{-1} ^[28]。相比于内陆浑浊湖泊(太湖),杭州湾 $a_{ph}(440)$ 明显偏低, $a_d(440)$ 则显著偏高^[29]。由于颗粒物吸收系数为 a_{ph} 与 a_d 之和,结合图 2 的吸收系数曲线,可以判定杭州湾水体是非色素颗粒物吸收占主导。

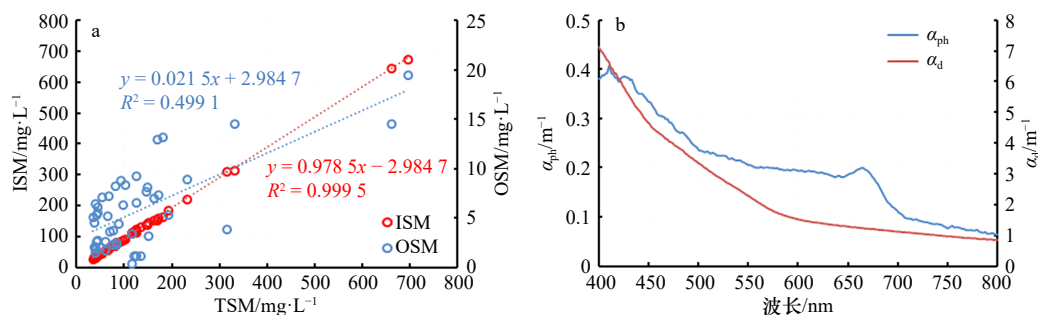


图2 杭州湾悬浮物浓度特征(a)及颗粒物吸收特性分析(b)

Fig. 2 Characteristics of TSM (a) and absorption of suspended matter (b)

由于杭州湾水体悬浮物浓度较高,所以光学信号较强,遥感反射率与TSM浓度表现出较好的相关性(图3)。从图3中可以看出,随着TSM浓度的增高,遥感反射率光谱信号逐渐增强。另一方面,对应于OLCI的不同波段,光谱响应也具有一定的差异性。总体来看,随TSM浓度逐渐增加至100 mg/L时,580 nm附近遥感反射率峰值逐渐升高。同时,580~670 nm的遥感反射率曲线会逐渐变平,表现出遥感反射率在该范围的“饱和”现象。然而,近红外波段遥感反射率与TSM含量表现出较好的一致性。利用OLCI数据

的光谱响应函数,将地面高光谱遥感反射率重采样为OLCI多光谱数据并与lg(TSM)进行相关性分析。相关性分析结果显示,OLCI波段12(Oa12)和波段16(Oa16)的遥感反射率(R_{rs} (Oa12)和 R_{rs} (Oa16))与lg(TSM)的相关性达到了0.90以上, R_{rs} (Oa17)和 R_{rs} (Oa18)与lg(TSM)的相关性也分别达到了0.89和0.87。上述结果与Bai等^[30]研究结果一致,表明750~900 nm的遥感反射率适宜于被用来估算高混浊水体的TSM浓度。

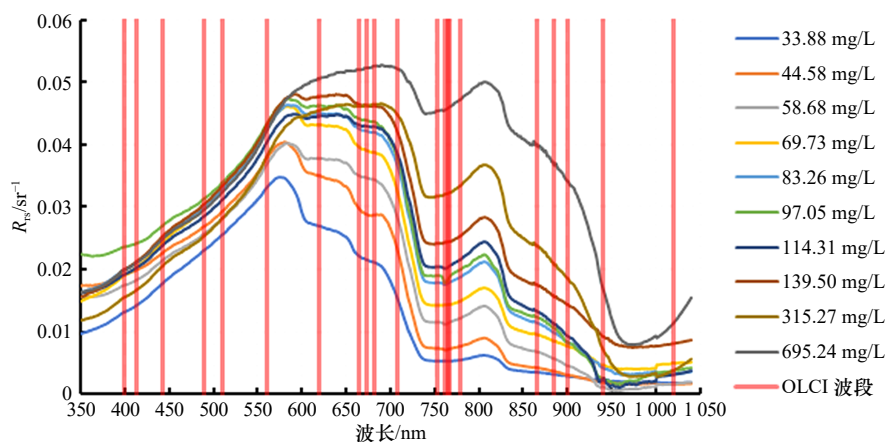


图3 遥感反射率与悬浮物浓度关系示意

Fig. 3 The relationship between remote sensing reflectance and TSM

3.2 大气校正精度及适用性分析

由于受到水汽和臭氧吸收作用的影响,OLCI数据的Oa13(中心波长761 nm)、Oa14(中心波长764 nm)、Oa15(中心波长768 nm)、Oa19(中心波长900 nm)和Oa20(中心波长940 nm)波段未进行大气校正^[31]。杭州湾水体受潮汐和径流影响显著,水体水色参数及光学特性动态性强。因此,我们选择卫星过境时间前后1 h内采样点的光谱进行不同大气校正方法的精度评价和适用性分析。结合地面采样时间和卫星过境时间,共筛选出4个准同步地面采样点。利用6种不

同大气校正方法对OLCI数据进行大气校正,大气校正结果与4个地面准同步样点的实测结果在可见光范围内的精度对比如图4所示。

从图4中可以看出,不同大气校正方法精度差异显著。6S和Flaash方法的大气校正结果在各波段均高于实测结果,存在明显高估现象;C2RCC方法的大气校正结果在各波段均低于实测结果,存在明显低估现象。从图4a和图4b中可以看出,散点图中回归方程斜率分别为0.85和0.82,接近于1,说明6S和Flaash大气校正方法的校正结果与实测光谱在光谱

形态上保持了较好的一致性。6S 和 Flaash 大气校正结果的高估现象,可能是由于大气模式和气溶胶类型的选择与当天实际情况存有差异,导致气溶胶光学厚度和气溶胶散射反射率估算不准所致。由于 C2RCC

方法是基于神经网络发展起来的,所以,训练样本的代表性对大气校正的精度会产生显著影响。C2RCC 算法的训练数据集主要采集于大洋水体,水体较为清洁^[19,31]。所以,C2RCC 算法在高浑浊水体中不适用。

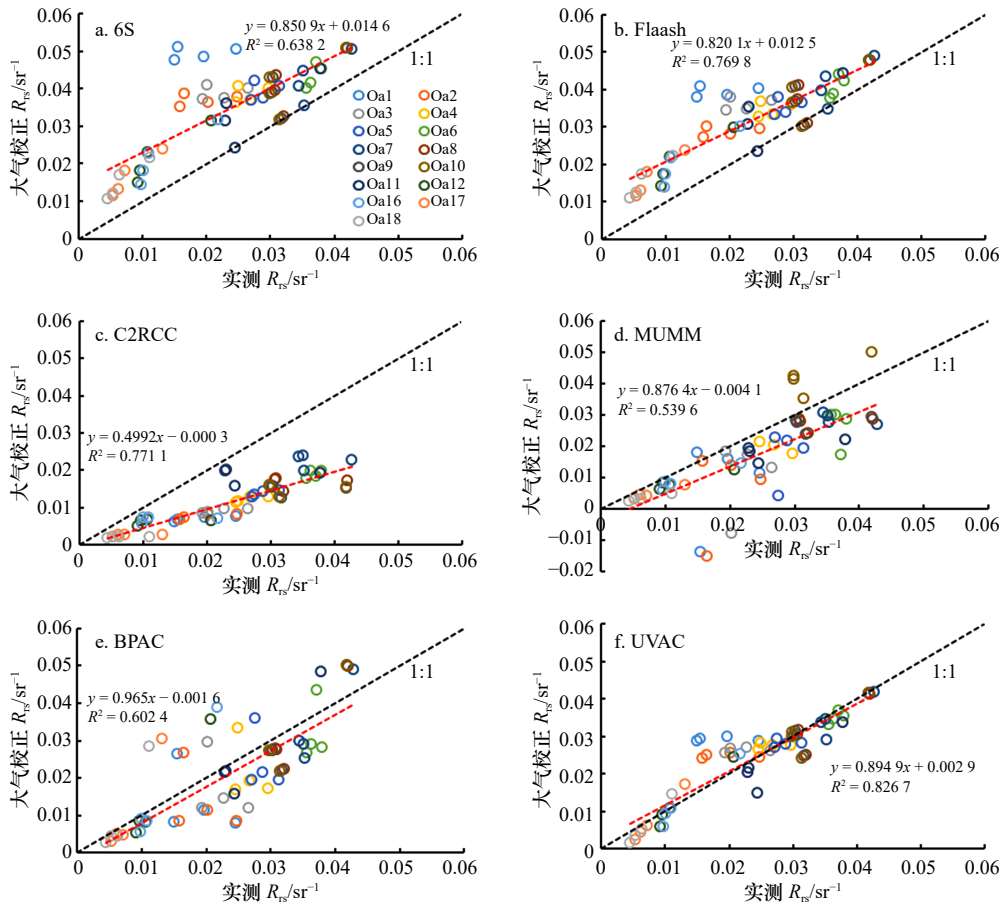


图4 不同方法大气校正精度评价

Fig. 4 Evaluation of the accuracy of different atmospheric correction method

MUMM 方法的大气校正结果在蓝光波段(400~500 nm)易出现过校正现象,一些像元的遥感反射率会出现负值;在红光和近红外波段的校正结果较为理想,校正结果贴近 1:1 线。上述结果与 Bi 等^[31]在内陆浑浊湖泊的大气校正结果一致。由于杭州湾空间范围大,TSM 浓度范围广,导致近红外两波段离水反射率的比值在一景影像内不一定为恒定值。因此,导致 MUMM 算法假设失效,从而引起部分像元的近红外波段气溶胶散射反射率估算不准和蓝光波段过校正的现象。整体上看,MUMM 算法在全波段范围内存在轻微低估现象。

BPAC 和 UVAC 大气校正结果较为理想,各波段的对比结果均匀地分布在 1:1 线附近。其中,BPAC 方法的验证点回归方程斜率为 0.965,截距为-0.0016;UVAC 方法的验证点回归方程斜率为 0.8949,截距

为 0.0029。从图 4 中可以看出,UVAC 大气校正结果的验证点分布更加贴近 1:1 线。本文中基于假设 400 nm 处离水辐亮度为 0 得到的大气校正结果要优于基于 412 nm 处离水辐亮度为 0 得到的大气校正结果。不同大气校正方法在各波段的 MAPE 统计结果如表 1 所示。从表 1 中可以看出,各方法在蓝光波段的大气校正结果均不理想。在 Oa1 波段,MAPE 误差范围为 56.30%~174.43%,6S 方法在该波段校正结果最不理想,BPAC 方法最优。在除 Oa1 以外的波段,UVAC 方法要显著优于其他方法,MAPE 均低于 37%,14 个波段的 MAPE 均值为 15.23%,在 Oa4 至 Oa10 波段 MAPE 低于 8%。不同大气校正方法在各波段的误差呈现“两头大,中间小”的分布,蓝光和近红外波段误差较高,绿光和红光波段误差较小。虽然 BPAC 方法在 4 个准同步样点的验证中精度较好,但该算法在杭

表 1 不同大气校正方法逐波段 MAPE 误差统计

Tab. 1 Error statistics in each band of different atmospheric correction method

波段(中心波长)	6S	Flaash	C2RCC	MUMM	BPAC	UVAC
Oa1(400 nm)	174.43%	118.94%	61.67%	70.46%	56.30%	62.39%
Oa2(413 nm)	96.66%	53.00%	59.45%	72.68%	54.33%	32.88%
Oa3(443 nm)	77.79%	64.59%	58.32%	55.37%	44.26%	20.95%
Oa4(490 nm)	46.07%	31.41%	53.83%	43.93%	34.07%	7.67%
Oa5(510 nm)	37.06%	23.53%	52.09%	41.24%	30.31%	4.81%
Oa6(560 nm)	18.02%	10.56%	48.45%	28.25%	21.97%	4.93%
Oa7(620 nm)	16.22%	13.77%	38.58%	21.45%	18.55%	6.09%
Oa8(665 nm)	23.08%	18.11%	50.24%	18.45%	17.46%	6.85%
Oa9(674 nm)	23.08%	18.53%	55.52%	17.47%	17.40%	6.69%
Oa10(681 nm)	23.83%	19.14%	53.93%	28.23%	17.05%	7.06%
Oa11(709 nm)	28.64%	26.72%	27.51%	29.95%	18.65%	16.89%
Oa12(754 nm)	78.99%	70.45%	45.68%	30.47%	37.70%	14.66%
Oa16(779 nm)	70.60%	62.73%	42.46%	29.17%	39.26%	16.24%
Oa17(865 nm)	116.25%	114.58%	64.91%	39.70%	57.22%	31.13%
Oa18(885 nm)	128.84%	137.43%	66.74%	47.37%	62.38%	36.43%

州湾的部分像元存在失效情况,导致对应像元无值,这会导致水色要素估算产品在研究区内不连续。

综上所述,6S、Flaash 和 C2RCC 大气校正方法在高混浊水体中会出现不同程度的低估或高估现象;MUMM 大气校正方法在蓝光波段易出现过校正现象,但近红外波段校正结果精度可以接受;BPAC 大气校正方法精度较好,但在杭州湾区域会出现无值像元,影响数据的应用;UVAC 大气校正方法精度最好,适宜于在高混浊水体进行大气校正应用。

3.3 TSM 反演模型构建及适用性分析

3.3.1 基于 OLCI 模拟数据的 TSM 反演模型构建

由于卫星过境当天同步地面数据样本较少,因此,利用地面采样数据进行模拟 OLCI 数据的 TSM 反演模型构建。首先,利用 OLCI 数据的光谱响应函数,将地面高光谱数据重采样为 OLCI 对应波段,重采样方法见文献 [32]。其次,将地面 50 个采样数据,随机分成建模数据集和验证数据集。其中,建模数据包含 33 个样本,验证数据包含 17 个样本。最后,结合前文提及的 8 种模型形式,利用相关性分析确定最优波段位置,利用回归分析和非线性拟合等方法确定模型函数表达式。其中,SERT 半分析算法需要结合不同传感器,对各波段的参数 α 和 β 进行重新率定。本研究结合地面数据和 OLCI 传感器波段设置,对参

数 α 和 β 进行了率定,取值如表 2 所示。各类模型的最优函数形式及精度评价见表 3。

表 2 SERT 模型中的参数 α 和 β Tab. 2 The value of parameters α and β in SERT model

波长/nm	α	β
560	0.042 2	35.334 8
620	0.064 3	0.147 6
709	0.074 9	0.036 7
779	0.086 7	0.007 6

从表 3 中可以看出,基于地面实测数据的各类模型对杭州湾 TSM 反演都取得了较好的精度,MAPE 在 30% 以内。其中,SAI 光谱指数和波段比值模型最优,SERT 和 Nechad 模型相对精度较差。Liu 等^[24]基于 GOCI 数据,对杭州湾 TSM 反演模型进行对比分析,结果同样显示 SAI 光谱指数和波段比值型模型最优。由于上述各类模型的精度是基于地面数据评价所得,模型的精度和适用性还需进一步结合同步 OLCI 数据进行验证。

3.3.2 基于 OLCI 数据的 TSM 反演模型验证

结合卫星过境当天乍浦站潮高数据,发现卫星过

表 3 基于实测数据构建的各类最优反演模型及精度评价

Tab. 3 The various developed TSM retrieval algorithms and its accuracy assessment

模型	公式	自变量	R^2	MAPE/%	RMSE/mg·L ⁻¹
单波段	$TSM = 10^{(27.761x + 1.4212)}$	Oa16	0.81	18.16	72.73
波段比值	$TSM = 10^{(1.0575x + 1.3275)}$	Oa16/Oa5	0.90	16.49	50.92
三波段	$TSM = 10^{[2.0492 + 9.6864(x2 + x3) - 0.1498(x1/2)]}$	Oa1、Oa17、Oa18	0.87	18.87	65.88
多元回归	$TSM = 10^{(1.8601 - 36.8293x1 + 17.5772x2 + 27.7534x3)}$	Oa5、Oa7、Oa12	0.91	17.79	42.87
SAI光谱指数	$TSM = 10^{(1.8277SAI + 1.0072)}$	Oa4、Oa6、Oa16	0.89	16.29	49.19
SERT	—	—	—	24.56	62.07
3S	$TSM = -1911.7x + 26.924$	$[Oa11^{-1} - Oa12^{-1}]^{-1}$	0.92	18.68	52.17
Nechad	$TSM = 910.02x - 7.6247$	$Oa18/(0.093 - Oa18)$	0.84	25.54	65.17

境前后 2 h 内潮位稳定上升, 没有经历或跨越潮高峰谷值。同时, 为了进一步丰富验证数据集的样点数量, 验证反演模型的稳健性, 本研究选择卫星过境前后 2 h 内的同步样点, 结合 UVAC 大气校正结果, 对上述模型进行验证。各反演模型验证精度如表 4 所示。从表 4 中可以看出, 波段比值模型精度最优, MAPE 为 19.08%; 半分析模型(SERT、3S 和 Nechad 模型)精度较差, MAPE 高于 30%; 三波段模型最差, MAPE 为 53.39%。三波段算法, 由于受到蓝光大气校正精度的影响, 导致算法精度较差。半分析模型精度较差的原因可能是由于模型构建过程中使用的训练数据不是采集于杭州湾, 导致模型精度受到影响。例如, SERT 多波段转换算法是基于长江口样本数据, 构建的基于 MERIS 数据的算法。虽然 MERIS 数据与 OLCI 数据在波段设置方面近似, 但选择用来反演 TSM 的波段的遥感反射率阈值仍需要结合杭州湾水

样进行率定。同样地, 本研究中 Nechad 模型中参数 c 的值是源于长江口数据发展而来。因此, 将来需要进一步在杭州湾测量后向散射系数等固有光学量, 构建适宜于杭州湾高混浊水体的半分析方法。

3.3.3 模型适用性评价

为进一步评价上述模型在杭州湾 TSM 估算中的适用性, 本研究将从模型在不同 TSM 浓度等级下的估算精度和模型敏感性两个方面进行评价。

一方面, 结合地面采样 TSM 浓度数据的范围, 将 TSM 浓度分为小于 80 mg/L、80~150 mg/L 和大于 150 mg/L 3 个浓度等级。各模型在 3 个浓度区间的精度见表 5。从表 5 中可以看出, 各反演模型在不同浓度等级上精度存在差异。整体上看, 反演模型随着 TSM 浓度等级的升高, MAPE 也有所升高。例如, 单波段模型在 3 个浓度区间的 MAPE 分别为 16.25%、22.54% 和 34.29%。这也说明, 单波段模型不适宜被用来估算具有宽 TSM 浓度范围的杭州湾水体。波段比值模型, 在小于 80 mg/L 和 80~150 mg/L 两个浓度等级上都具有最优的反演精度, 在大于 150 mg/L 浓度等级上, 模型精度有所下降, MAPE 为 21.35%。综合各模型在各浓度等级上的精度, 认为波段比值效果最优, 其次为多元回归模型和 SAI 光谱指数模型。

另一方面, 对上面筛选出来的 3 个模型进行模型敏感性分析。由于大气校正和测量误差等因素, 反演模型的稳健性是模型适用性的另一个重要考量。参考 Qiu^[33] 的方法, 对遥感反射率添加均匀分布的白噪声, 用以测试模型对误差扰动的敏感性。考虑到波段比值模型和多元回归模型使用了 Oa5 波段, 该波段遥感反射率较低, 为避免加噪后遥感反射率为负值, 本研究选用均值为 0, 标准差为 0.5% 的均匀分布白噪

表 4 基于 OLCI 数据的模型精度评价

Tab. 4 The accuracy assessment of various developed TSM retrieval algorithms based on OLCI data

模型	斜率	截距	R^2	MAPE/%	RMSE/mg·L ⁻¹
单波段	0.58	21.97	0.93	23.43	31.02
波段比值	0.82	11.86	0.91	19.08	19.29
三波段	0.66	-11.78	0.85	53.39	49.94
多元回归	0.72	14.88	0.92	19.74	23.07
SAI光谱指数	0.93	12.07	0.91	22.23	18.68
SERT	0.78	-6.31	0.84	31.10	35.32
3S	0.82	23.45	0.87	30.84	22.41
Nechad	0.79	-3.53	0.83	33.73	33.83

声。具体地,以地面验证数据集为例,每个验证光谱添加 50 条随机噪声,形成 850 条光谱数据,统计 MAPE 和 RMSE。为避免随机因素干扰,上述过程重复 1 000 次,最终统计 MAPE 和 RMSE 的范围及均值。加噪后模型敏感性分析结果见表 6。从表 6 中可以看出,波段比值模型的稳健性最好,相比于加噪前

的 MAPE(16.49%),加噪后 MAPE 变化范围为 0.13%~0.15%,显著小于 0.5%;SAI 光谱指数模型稳健性次之,相比于加噪前的 MAPE(16.29%),加噪后 MAPE 变化范围为 0.09%~0.37%,小于 0.5%;多元回归模型稳健性最差,相比于加噪前的 MAPE(17.79%),加噪后 MAPE 变化范围为 33.20%~44.44%,显著高于 0.5%。

表 5 模型在不同 TSM 浓度等级上的精度评价

Tab. 5 The performance of various developed TSM retrieval algorithms on different TSM level

模型	TSM<80 mg/L		80 mg/L≤TSM≤150 mg/L		TSM>150 mg/L	
	MAPE/%	RMSE/mg·L ⁻¹	MAPE/%	RMSE/mg·L ⁻¹	MAPE/%	RMSE/mg·L ⁻¹
单波段	16.25	12.38	22.54	45.70	34.29	107.20
波段比值	14.71	10.97	14.60	22.94	21.35	68.46
三波段	18.23	12.60	17.73	31.76	24.52	77.42
多元回归	14.99	10.75	15.72	23.57	19.63	45.76
SAI光谱指数	17.26	13.19	14.49	23.24	20.94	51.45
SERT	25.53	17.22	26.07	59.43	34.67	81.86
3S	26.83	16.47	16.73	31.61	22.61	58.70
Nechad	26.74	16.71	26.79	51.70	31.58	78.43

表 6 模型敏感性分析

Tab. 6 The sensitivity analysis of three developed TSM retrieval algorithms

模型	MAPE/%		RMSE/mg·L ⁻¹	
	范围	均值	范围	均值
波段比值	16.34~16.62	16.50	50.14~51.83	51.02
多元回归	50.99~62.23	55.88	108.66~182.18	141.75
SAI光谱指数	16.20~16.66	16.43	48.74~50.22	49.42

综上所述,经地面和影像同步验证及模型适用性分析,认为波段比值模型精度和稳健性最好,SAI 光谱指数模型次之,适宜于估算杭州湾 TSM 含量。

3.4 二级数据产品精度及适用性分析

利用 C2RCC 算法可以获得 $a_{ph}(443)$ 和 $a_d(443)$ 以及 TSM 含量产品。结合上述产品及 OLCI Level 2 的 TSM 含量产品,分别与实测结果进行对比(图 5,图 6),以分析相应遥感二级产品的适用性。从图 5 中可以看出,基于 C2RCC 的 $a_{ph}(443)$ 要显著高于实测结果,两种结果间无显著相关性;基于 C2RCC 的 $a_d(443)$ 变化不大,基本围绕在均值 2.80 m^{-1} 附近,与实测结果的 MAPE 为 38.66%。由于 C2RCC 的 $a_d(443)$ 变化幅

度不大,导致基于 C2RCC 算法的 TSM 含量在采样当天浓度变化不大,均值为 169.67 mg/L ,其浓度在低于 100 mg/L 和大于 200 mg/L 出现明显的高估和低估现象,在 $100\sim 200 \text{ mg/L}$ 浓度区间,遥感产品数据与实测结果较为接近。然而,OLCI Level 2 产品对 TSM 浓度的估算则存在显著偏差,当天同步采样点的 TSM 浓度估算结果仅为 2 mg/L 。OLCI Level 2 的 TSM 产品是基于神经网络计算的结果,可能由于训练样本数据集代表性不足,无法准确估算高混浊水体 TSM 浓度。Toming 等^[19]在波罗的海利用 C2RCC 算法,对比了 $a_{ph}(443)$ 和 $a_d(443)$ 与实测值的关系,结果也证实 $a_{ph}(443)$ 和 $a_d(443)$ 与实测值间无显著相关性。因此,基于 C2RCC 的固有光学量和 TSM 浓度及 OLCI Level 2 的 TSM 产品在杭州湾不适用。

3.5 基于 OLCI 数据的 TSM 反演应用

结合 2017 年 7 月 23 日 OLCI 数据,参考大气校正和反演算法遴选结果,本研究选择 UVAC 大气校正方法和波段比值反演方法实现 TSM 浓度遥感估算(图 7)。同时,对比展示基于 C2RCC 算法的 TSM 估算结果(图 7),进一步分析其在杭州湾的适用性。由于 OLCI Level 2 TSM 产品在杭州湾浓度范围为 $0\sim 2 \text{ mg/L}$,空间区分度很低,所以本文并未展示。从图 7

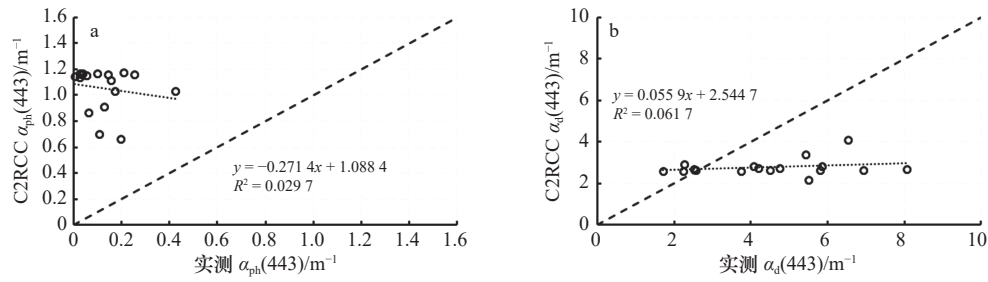


图 5 基于 C2RCC 算法所得 $a_{ph}(443)$ (a) 和 $a_d(443)$ (b) 的估算结果与实测值对比
 Fig. 5 The C2RCC-derived $a_{ph}(443)$ (a) and $a_d(443)$ (b) are compared with in situ value, respectively

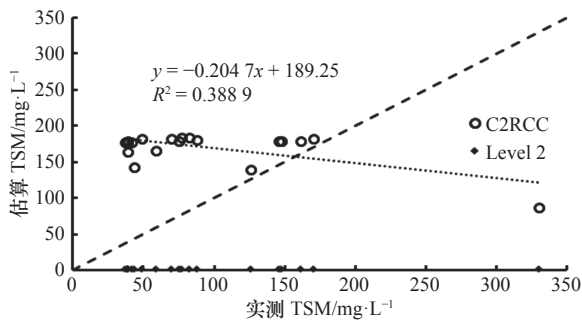


图 6 基于 C2RCC 算法和 OLCI Level 2 产品的 TSM 估算结果与实测值对比
 Fig. 6 The C2RCC-derived TSM and OLCI Level 2 TSM are compared with measured TSM

中可以看出, 基于 UVAC 和波段比值算法, TSM 在杭州湾具有很好的空间分异特征, TSM 浓度范围在 22.81~2 908.37 mg/L 之间, 均值为 233.77 mg/L; 然而基于 C2RCC 算法的 TSM 浓度空间分异度和辨识度较低, TSM 范围在 0.72~184.59 mg/L 之间, 均值为 64.87 mg/L。从空间上看, TSM 在杭州湾中部区域浓度较低, 在杭州湾湾口区域和钱塘江区域及杭州湾南岸浓度较高, 这与 He 等^[7] 和 Liu 等^[24] 的研究结果一

致。由于乍浦附近区域水深较深, 导致 TSM 浓度在杭州湾中部区域浓度较低。受到长江径流和输沙的影响, 导致在杭州湾湾口附近水域 TSM 浓度较高。在杭州湾南岸(慈溪附近区域), 由于水深较浅且有部分滩涂区域, 因此 TSM 浓度较高。此外, 杭州湾 TSM 浓度空间分布与潮汐关系密切。由于杭州湾为非正规半日潮, 在涨潮时, 杭州湾悬浮物会沿北岸向钱塘江方向运输, 落潮时, 悬浮物会沿南岸向杭州湾下游运输^[34]。结合乍浦潮位观测站数据, 2017 年 7 月 23 日 0 点 12 分和 12 点 41 分为高潮位, 7 点 37 分和 19 点 33 分为低潮位。据此可以判断, 卫星过境时杭州湾正处于涨潮时期, 因此在杭州湾湾口区域 TSM 浓度较高且向湾顶区域扩散。

4 结论

本文利用哨兵 3 号 OLCI 数据, 结合地面同步采样数据, 就 OLCI 数据在杭州湾 TSM 浓度遥感估算进行了研究。通过对比多种常用大气校正方法和 TSM 遥感估算模型, 遴选出了适宜于 OLCI 数据和杭州湾的大气校正方法和 TSM 反演模型, 结果表明, UVAC

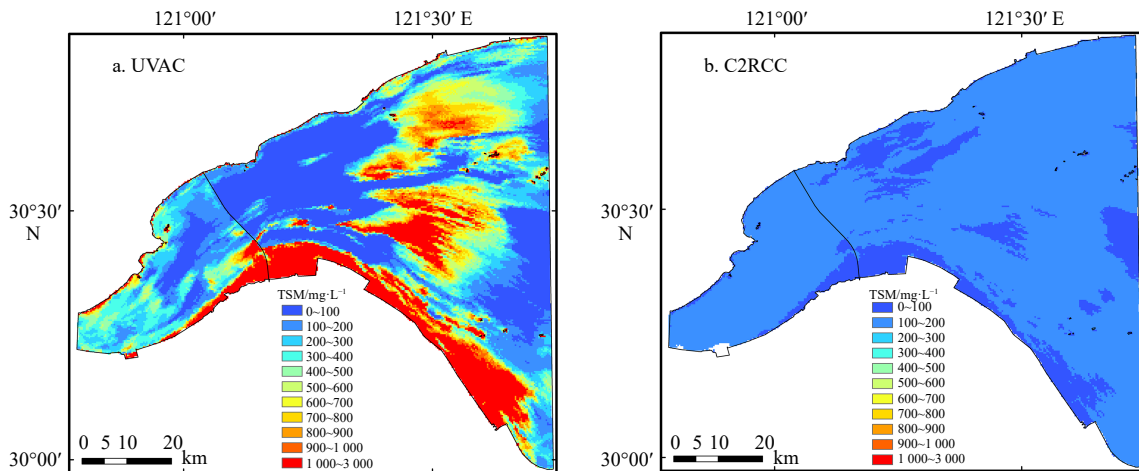


图 7 基于 UVAC 和 C2RCC 算法的 TSM 空间分布
 Fig. 7 Spatial distribution of TSM based on UVAC and C2RCC algorithm

大气校正方法精度最优,波段比值算法(Oa16/Oa5)具有良好的模型精度和稳健性;通过验证 OLCI 数据二级产品的精度,认为该二级产品在杭州湾估算 TSM 浓度和固有光学量并不适用;最后,将遴选出的大气校正方法和 TSM 反演模型应用于 OLCI 数据,获得了 TSM 空间分布,结果与实际情况匹配。

总体上看,由于 OLCI 数据具有良好的光谱、空间和时间分辨率,其对杭州湾 TSM 浓度估算具有很好的适用性,未来可进一步将该数据推广应用于其他类似浑浊水体的 TSM 浓度遥感估算研究中。目前,

由于 OLCI 数据属于新兴数据,地面同步采样数据较少。未来需要进一步丰富地面同步数据,获得不同时间季节、潮位以及更广阔的空间范围的采样数据,对大气校正算法和 TSM 反演模型的适用性进行更深入的验证,同时可以开展基于 OLCI 数据的其他水色要素遥感估算研究。

致谢: 感谢中国科学院南京地理与湖泊研究所张运林研究员及所有参与杭州湾野外采样和室内分析的工作人员在数据采集和分析方面给予的帮助。

参考文献:

- [1] Sun Deyong, Li Yunmei, Le Chengfeng, et al. A semi-analytical approach for detecting suspended particulate composition in complex turbid inland waters (China)[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 134: 92–99.
- [2] Shi Kun, Zhang Yunlin, Zhu Guangwei, et al. Long-term remote monitoring of total suspended matter concentration in Lake Taihu using 250 m MODIS-Aqua data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 164: 43–56.
- [3] 刘王兵, 于之锋, 周斌, 等. 杭州湾HJ CCD影像悬浮泥沙遥感定量反演[J]. *遥感学报*, 2013, 17(4): 905–918.
Liu Wangbing, Yu Zhifeng, Zhou Bin, et al. Assessment of suspended sediment concentration at the Hangzhou Bay using HJ CCD imagery[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2013, 17(4): 905–918.
- [4] 高永强, 高磊, 朱礼鑫, 等. 长江口及其邻近海域悬浮颗粒物浓度和粒径的时空变化特征[J]. *海洋学报*, 2018, 40(3): 62–73.
Gao Yongqiang, Gao Lei, Zhu Lixin, et al. Spatiotemporal variations in concentration and size of suspended particulate matter in the Changjiang (Yangtze River) Estuary and its adjacent sea[J]. *Haiyang Xuebao*, 2018, 40(3): 62–73.
- [5] Xie Dongfeng, Gao Shu, Wang Zhengbing, et al. Numerical modeling of tidal currents, sediment transport and morphological evolution in Hangzhou Bay, China[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2013, 28(3): 316–328.
- [6] Shen Fang, Verhoef W, Zhou Yunxuan, et al. Satellite estimates of wide-range suspended sediment concentrations in Changjiang (Yangtze) estuary using MERIS data[J]. *Estuaries and Coasts*, 2010, 33(6): 1420–1429.
- [7] He Xianqiang, Bai Yan, Pan Delu, et al. Using geostationary satellite ocean color data to map the diurnal dynamics of suspended particulate matter in coastal waters[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 133: 225–239.
- [8] 毕顺, 李云梅, 吕恒, 等. 基于OLCI数据的洱海叶绿素a浓度估算[J]. *湖泊科学*, 2018, 30(3): 701–712.
Bi Shun, Li Yunmei, Lv Heng, et al. Estimation of chlorophyll-a concentration in Lake Erhai based on OLCI data[J]. *Journal of Lake Science*, 2018, 30(3): 701–712.
- [9] 吴志明, 李建超, 王睿, 等. 基于随机森林的内陆湖泊水体有色可溶性有机物(CDOM)浓度遥感估算[J]. *湖泊科学*, 2018, 30(4): 979–991.
Wu Zhiming, Li Jianchao, Wang Rui, et al. Estimation of CDOM concentration in inland lake based on random forest using Sentinel-3A OLCI[J]. *Journal of Lake Science*, 2018, 30(4): 979–991.
- [10] 崔廷伟, 张杰, 马毅, 等. 渤海悬浮物分布的遥感研究[J]. *海洋学报*, 2009, 31(5): 10–18.
Cui Tingwei, Zhang Jie, Ma Yi, et al. The study on the distribution of suspended particulate matter in the Bohai Sea by remote sensing[J]. *Haiyang Xuebao*, 2009, 31(5): 10–18.
- [11] 余丹, 于之锋, 窦文洁, 等. 杭州湾冬季表层水体悬浮泥沙质量浓度的逐时变异[J]. *杭州师范大学学报: 自然科学版*, 2014, 13(4): 373–379.
Yu Dan, Yu Zhifeng, Dou Wenjie, et al. Hourly variability of surface suspended sediment concentration in Hangzhou Bay in winter[J]. *Journal of Hangzhou Normal University: Natural Science Edition*, 2014, 13(4): 373–379.
- [12] Li Yuan, Zhang Yunlin, Shi Kun, et al. Monitoring spatiotemporal variations in nutrients in a large drinking water reservoir and their relationships with hydrological and meteorological conditions based on Landsat 8 imagery[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 599–600: 1705–1717.
- [13] Mitchell B G. Algorithms for determining the absorption coefficient for aquatic particulates using the quantitative filter technique[J]. *Proceedings of SPIE*, 1990, 1302: 137–149.
- [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, 8(1): 37–44.
Tang Junwu, Tian Guoliang, Wang Xiaoyong, et al. The methods of water spectra measurement and analysis I: above-water method[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2004, 8(1): 37–44.
- [15] Li Yuan, Zhang Yunlin, Shi Kun, et al. Spatiotemporal dynamics of chlorophyll-a in a large reservoir as derived from Landsat 8 OLI data: understanding its driving and restrictive factors[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(2): 1359–1374.

- [16] Zheng Zhubin, Li Yunmei, Guo Yulong, et al. Landsat-based long-term monitoring of total suspended matter concentration pattern change in the wet season for Dongting Lake, China[J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(10): 13975–13999.
- [17] 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.
- [18] He Xianqiang, Bai Yan, Pan Delu, et al. Atmospheric correction of satellite ocean color imagery using the ultraviolet wavelength for highly turbid waters[J]. *Optics Express*, 2012, 20(18): 20754–20770.
- [19] 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.
- [20] Moore G F, Aiken J, Lavender S J. The atmospheric correction of water colour and the quantitative retrieval of suspended particulate matter in Case II waters: Application to MERIS[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1999, 20(9): 1713–1733.
- [21] Tassan S. An improved in-water algorithm for the determination of chlorophyll and suspended sediment concentration from Thematic Mapper data in coastal waters[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1993, 14(6): 1221–1229.
- [22] Zhang Minwei, Tang Junwu, Dong Qing, et al. Retrieval of total suspended matter concentration in the Yellow and East China Seas from MODIS imagery[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(2): 392–403.
- [23] Mao Zhihua, Chen Jianyu, Pan Delu, et al. A regional remote sensing algorithm for total suspended matter in the East China Sea[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 124: 819–831.
- [24] Liu Jia, Liu Jiahang, He Xianqiang, et al. Diurnal dynamics and seasonal variations of total suspended particulate matter in highly turbid Hangzhou Bay waters based on the geostationary ocean color imager[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2018, 11(7): 2170–2180.
- [25] Chen Jun, D'Sa E, Cui Tingwei, et al. A semi-analytical total suspended sediment retrieval model in turbid coastal waters: a case study in Changjiang River Estuary[J]. *Optics Express*, 2013, 21(11): 13018–13031.
- [26] Nechad B, Ruddick K G, Park Y. Calibration and validation of a generic multisensor algorithm for mapping of total suspended matter in turbid waters[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(4): 854–866.
- [27] 马骅. 高浊度长江河口三色要素的光学特征及其对TSM反演的影响[D]. 上海: 华东师范大学, 2015.
Ma Hua. The optical characteristics of the three elements in high turbidity water of the Yangtze River Estuary and its influence on the inversion of TSM[D]. Shanghai: East China Normal University, 2015.
- [28] 王珊珊, 王永波, 扶卿华, 等. 珠江口水体组分的吸收特性分析[J]. *环境科学*, 2014, 35(12): 4511–4521.
Wang Shanshan, Wang Yongbo, Fu Qinghua, et al. Spectral absorption properties of the water constituents in the estuary of Zhujiang River[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(12): 4511–4521.
- [29] 乐成峰, 李云梅, 查勇, 等. 太湖梅梁湾水体组分吸收特性季节差异分析[J]. *环境科学*, 2008, 29(9): 2448–2455.
Le Chengfeng, Li Yunmei, Zha Yong, et al. Seasonal variation of in water constituents' absorption properties in Meiliang Bay of Taihu Lake[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(9): 2448–2455.
- [30] Bai Yan, He Xianqiang, Pan Delu, et al. The extremely high concentration of suspended particulate matter in Changjiang Estuary detected by MERIS data[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7858: 78581D–78588D.
- [31] Bi Shun, Li Yunmei, Wang Qiao, et al. Inland water atmospheric correction based on turbidity classification using olci and slstr synergistic observations[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(7): 1002.
- [32] Sun Deyong, Hu Chuanmin, Qiu Zhongfeng, et al. Reconstruction of hyperspectral reflectance for optically complex turbid inland lakes: test of a new scheme and implications for inversion algorithms[J]. *Optics Express*, 2015, 23(11): A718–A740.
- [33] Qiu Zhongfeng. A simple optical model to estimate suspended particulate matter in Yellow River Estuary[J]. *Optics Express*, 2013, 21(23): 27891–27904.
- [34] 刘猛, 沈芳, 葛建忠, 等. 静止轨道卫星观测杭州湾悬浮泥沙浓度的动态变化及动力分析[J]. *泥沙研究*, 2013(1): 7–13.
Liu Meng, Shen Fang, Ge Jianzhong, et al. Diurnal variation of suspended sediment concentration in Hangzhou Bay from geostationary satellite observation and its hydrodynamic analysis[J]. *Journal of Sediment Research*, 2013(1): 7–13.

附录:

表 A1 参数缩写及其含义

Tab. A1 Abbreviations of parameters and its meaning

物理量缩写	参数含义
SDD	secchi disk depth (透明度)
OSM	organic suspended matter (有机悬浮物)
ISM	inorganic suspended matter (无机悬浮物)
TSM	total suspended matter (总悬浮物)
a_{ph}	absorption of phytoplankton particles (色素颗粒物吸收系数)
a_d	absorption of nonphytoplankton particles (非色素颗粒物吸收系数)
a_p	absorption of particulates (颗粒物吸收系数)
MAPE	mean absolute percentage error (平均相对误差)
RMSE	root mean square error (均方根误差)
SNAP	sentinel application platform (哨兵数据处理平台)
6S	second simulation of the satellite signal in the solar spectrum
Flaash	fast line-of-sight atmospheric analysis of hypercubes
MUMM	management unit of the north seas mathematical models
C2RCC	case 2 regional coast colour
BPAC	bright pixel atmospheric correction
SERT	semi-empirical radiative transfer

Remote estimation of total suspended matter concentration in the Hangzhou Bay based on OLCI and its water color product applicability analysis

Li Yuan^{1,2}, Guo Yulong³, Cheng Chunmei⁴, Zhang Yibo², Hu Yaoduo², Xia Zhong², Bi Shun⁵

(1. School of Tourism and Urban & Rural Planning, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310018, China; 2. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. College of Resources and Environmental Sciences, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China; 4. College of Geomatics and Municipal Engineering, Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, Hangzhou 310018, China; 5. School of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: As a main carrier of nutrients and pollutants, total suspended matter (TSM) has a significant influence on water environment, especially on estuary water environment. The Ocean and Land Colour Instrument (OLCI) was onboard ESA Sentinel-3A satellite and launched in February 16, 2016, with fine spatial, temporal and spectral resolution. To find the best atmospheric correction method and TSM retrieval model for the application of OLCI in Hangzhou Bay (HZB), six atmospheric correction methods and eight TSM retrieval models were test based on in

situ water color data collected from HZB on July 2017. In addition, the OLCI Level 2 product (e.g. TSM and inherent optical properties (IOP) data) was compared with in situ data to evaluate the accuracy and applicability of OLCI Level 2 product. The results show that the method of atmospheric correction based on ultraviolet wavelength (UVAC) and the TSM retrieval model based on band ratio have best performance. Specifically, the mean absolute percentage error (MAPE) of atmospheric correction in four match-up sites is 34.21%, 13.11%, 5.92% and 20.28%, respectively. In addition, the averaged MAPE of atmospheric correction in band Oa2 to Oa12 and Oa16 to Oa18 is 15.23%, and in band Oa4 to Oa10 is less than 8%. The band ratio (Oa16/Oa5) model has the best performance, with a MAPE of 16.49% and root mean square error (RMSE) of 50.92 mg/L in calibration stage, and a MAPE of 19.08% and RMSE of 19.29 mg/L in validation stage. However, the TSM and IOP product derived from C2RCC (case 2 regional coast colour) algorithm and the TSM product derived from OLCI Level 2 product has no linear relationship with in situ data. These results indicate that the above Level 2 product is unsuitable for HZB TSM and IOP remote estimation. Finally, the UVAC method and band ratio model are applied to OLCI imagery that is collected on July 23, 2017. Spatially, TSM shows a relative low value in the center of HZB and relative high value in the south and east part of HZB.

Key words: Hangzhou Bay; OLCI data; total suspended matter; applicability analysis; atmospheric correction