

Landsat-8 的舟山近岸海域总悬浮物遥感反演与时空变异研究

逢淑娜¹, 朱渭宁^{1*}, 陈江², 孙楠³, 黄李童¹, 张昱森¹, 张泽亮¹

1. 浙江大学海洋学院, 浙江 舟山 316021
2. 武汉大学遥感信息工程学院, 湖北 武汉 430079
3. 自然资源部第二海洋研究所, 浙江 杭州 310012

摘要 总悬浮物(TSM)是海洋水质和水环境评价的主要参数之一。舟山海域位于杭州湾边缘, 泥沙含量高, 总悬浮物长期处于高浓度状态, 其分布与动态变化对近岸水质、水循环以及该区域的渔业、旅游业都有较大影响。Landsat-8 卫星影像作为一种应用广泛、空间分辨率高、便于获取的光学信息, 可以为舟山海域的 TSM 观测提供有力的技术手段。利用舟山近岸海域实测 TSM 吸收系数 $a_p(440)$ 和水面光谱, 开发了基于 Landsat-8 反演 TSM 的最优模型, 发现基于近红外和蓝色波段比 B5/B2 的 S-函数和线性函数模型反演精度较好, 相对于线性模型, S-函数具有更强的鲁棒性, 该模型形式为 $a_p = 3.72 / (0.009 + e^{-5.249B5/B2})$, 克服了常用函数模型(如线性、对数、指数函数)应用于实际卫星影像时出现光谱幅度范围受限的困难。海岸带内陆复杂水体水色遥感的另一难点是大气校正, 以往的研究往往只采用某种大气校正模型, 但该模型不一定适合研究水域, 从而使得校正结果并不一定是最优的。在本研究中, 验证比较了 FLAASH, 6S 和 ACOLITE 三种大气校正方法面向 Landsat-8 水色反演的校正结果, 发现 ACOLITE 方法获取的光谱形状最准确, 误差最小, 特别在蓝色波段, 明显好于 FLAASH 和 6S 方法。将最优模型应用于舟山近岸海域 2013 到 2018 年的 10 幅 Landsat-8 图像。实测数据和反演结果显示: 舟山近岸海域的 TSM 吸收系数 $a_p(440)$ 的变化范围在 $1.64 \sim 417.04 \text{ m}^{-1}$, 均值 118.47 m^{-1} , TSM 吸收占水体总吸收的 90% 以上, 该海域实测的水面光谱形状呈现典型的河口海岸带复杂浑浊水体的光谱特征, 很多光谱曲线具有双峰特征, 遥感反射率幅值较大, 特别是红色、近红外波段, 由于受河口高浓度 TSM 的影响, 遥感反射率高于远海较清洁的海水; 衢山、洋山、宁波等近岸区域的 TSM 浓度明显高于东极、嵎泗等远海区域, 随河口羽化区呈现由高到低的梯度变化, 在近岸区域分布复杂, 外海区域分布较为均匀。在时间分布上具有冬季浓度远高于夏季的特点, 其中 12 月最高, 最大值为 413.32 m^{-1} , 8 月最低, 最小值为 3.69 m^{-1} , 5 月、10 月期间也有 TSM 的局部峰值。这些 TSM 时空变异特征表明舟山海域悬浮物的分布和变化一方面受地形、海流、潮汐、季风、台风等自然环境因素的影响, 另一方面也受如海运、港口建设、海岛旅游等人类活动的较大影响。

关键词 水色遥感反演; 总悬浮物; Landsat-8; 近岸海域; 时空变异

中图分类号: X87 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)12-3826-07

引言

总悬浮物(total suspended matter, TSM)是指悬浮在水中的固体物质, 主要包括悬浮泥沙和浮游植物^[1]。TSM 是一种重要的水质参数, 是影响水下光场分布的主要因素之一, 对光具有强烈的吸收和散射作用, 从而直接影响水体透明度、浑浊度和真光层深度等光学参数^[2]。舟山群岛海域位于

杭州湾东侧, 北临长江入海口, 有长江和钱塘江注入, 是典型的河口海岸地区。杭州湾作为长江和钱塘江河口的交汇区域, 具有潮强、水流急、泥沙含量高的特点, 舟山群岛海域的 TSM 浓度高达 $1.103 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[3]。了解舟山海域悬浮物吸收系数对研究东海泥沙流动和近岸水体环境有重要作用, 也对舟山海域的航运、港口建设和涉水工程开发具有重要意义, 在现阶段需要对该海域的 TSM 加强监测。

相比于传统的水质参数监测方法, 遥感监测方法具有观

收稿日期: 2018-10-19, 修订日期: 2019-02-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(41971373, 41471346)和浙江省自然科学基金项目(LY17D010005)资助

作者简介: 逢淑娜, 女, 1995 年生, 浙江大学海洋学院硕士研究生 e-mail: shunapang@zju.edu.cn

* 通讯联系人 e-mail: zhuwn@zju.edu.cn

测面积大且能连续观测等优点,因此近年来利用遥感监测沿海 TSM 浓度的技术和方法发展迅速^[4]。目前,国内外对悬浮物的遥感研究主要集中于建立遥感反射率与悬浮物浓度的相关关系。利用遥感估算 TSM 浓度的方法主要有经验方法^[4],半分析方法^[5]和分析方法^[6],以经验和半分析方法为主。经验方法简单易于构建,而且应用到卫星影像上时能一定程度上降低大气校正误差的影响;与经验算法相比,半分析方法结合了经验参数和生物光学模型,将水体的表面光学量和固有光学量结合,能够在一定程度上提高模型的适用范围。此外,基于相同的方法,也存在不同的模型来估算 TSM 浓度,例如,张毅博等^[4]以 Landsat-8 的第 2, 3 和 8 波段为自变量构建了多元回归模型,较好地估算了新安江水库总悬浮物浓度;Zhang 等^[7]利用 2000 年—2010 年的 Landsat TM 和 ETM+ 数据监测和评估了黄河口的悬浮泥沙浓度,并分析了该区域年际和季节变化原因;但是这些在其他区域开发的模型不一定适用于舟山近海海域。

Landsat-8 陆地卫星是 NASA Landsat 系列的最新卫星,配备有 OLI 和 TIRS 两个成像仪,重访周期 16 d。OLI 是一种推扫式成像扫描仪,空间分辨率 30 m,共有 9 个波段,其中 5 个可用于水色遥感。基于 Landsat-8 的叶绿素^[8]、有色溶解有机物^[9]和悬浮物^[10]的相关研究已经陆续展开,例如,Watanabe 等^[8]估算了 Barra Bonita 水电站的叶绿素 a 浓度和营养状态;Chen 等^[9]建立了 Landsat-8 红绿波段比模型,实现了休伦湖有色溶解有机物的动态监测;黄李童等^[11]对杭州西湖的总悬浮物进行了遥感监测,建立了基于红绿波段的指数模型。在舟山区域,基于其他卫星(如 GF-1)的 TSM 遥感反演也有一定进展,如章敏超等^[3]发现 GF-1 号 B2, B3 波段组合的线性模型适用于舟山近岸水体悬浮泥沙浓度反演,并得到该区域悬浮泥沙含量呈西高东低的结论。然而这些研究涉及到的卫星时间跨度小、可用数据少,利用 Landsat-8 对舟山近海海域总悬浮物反演的研究还鲜有报道。

特别值得注意的是,在应用卫星数据时,需要高精度的大气校正结果,目前常用的大气校正方法有 FLAASH, 6S, ACOLITE 和暗像元等,如 Pan 等^[12]在研究长江口悬浮物分布时,使用 ACOLITE 方法。不同大气校正结果也存在很大的偏差,基于 Landsat-8 水色遥感反演的大气校正方法,哪一种更简易准确,目前也缺少比对研究。

因此,本研究将通过实测数据,建立适用于舟山近岸海域基于 Landsat-8 的 TSM 反演模型,分析不同大气校正模型面向 Landsat-8 水色应用的校正效果,反演 Landsat-8 时间序列影像,分析该海域 TSM 的时空分布规律及其环境影响因素,以期对包括舟山海域在内的东海沿岸及其他近海海域的研究提供借鉴。

1 数据获取

1.1 研究区域概况

舟山群岛(图 1)位于长江口以南,杭州湾外缘的浙江北部海域(121°30′—123°25′ E, 29°32′—31°04′ N),是我国最大的群岛,总面积 22 000 km²,海域面积 20 800 km²。舟山

地区有许多深水港口和航道资源,自然环境优越。该地区受环流影响,营养物充沛,有著名的近海渔场舟山渔场,渔业资源丰富。中国(浙江)自由贸易试验区 2017 年在舟山挂牌成立,是中国唯一由陆域和海洋锚地组成的自由贸易园区,也是中国立足环太平洋经济圈的前沿地区,因此研究舟山海域总悬浮物的状况对舟山群岛新区的海洋生态与工程建设以及我国海洋经济发展均有重要的现实意义。

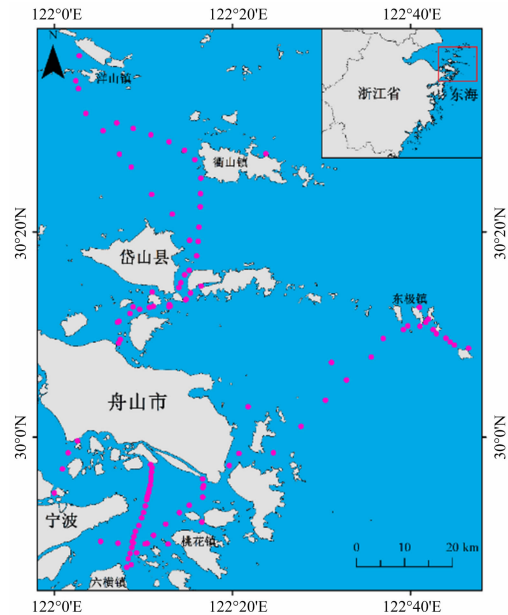


图 1 研究区域与采样点分布

Fig. 1 Study site and sampling points

1.2 实地数据采集

2018 年 3 月到 4 月在舟山近海海域进行五次野外采样,共计采集 108 个样本,见图 1。采集时间主要集中于上午 9 点到 11 点,下午 2 点到 4 点,空气质量状况良好,无云或少云。水样用琥珀瓶储存并低温冷藏,当日或次日在实验室进行测量。在每个采集点,根据 NASA 推荐使用的水上测量法^[13],使用 ASD 地物光谱仪(波长 325~1 075 nm,间隔 1 nm)测量三组海表光学量:白板辐亮度 L_g 、天空光辐亮度 L_{sky} 和水面总反射率 R_t 。每个光学量采集 10 条光谱,以减少波浪、白帽等引起的不确定性。根据这三组光学量,海面遥感反射率(remote sensing reflectance, R_{rs})由式(1)计算

$$R_{rs} = \frac{1}{\pi} \left(R_t - \frac{\rho L_{sky}}{L_g} \right) \quad (1)$$

其中 ρ 是水表面反射系数,根据 ASD 指导手册和 Mobley 推荐值^[14],设为 0.028。

在实验室中,水样经 0.45 μm 滤膜过滤,再用 Agilent Cary-100 分光光度计测量原液和滤液在 200~800 nm 之间的吸光度 $A(\lambda)$ (测量前晃动使得 TSM 再悬浮),再转换成吸收系数, $a_{Total}(\lambda)$ 是原液在波长 λ 处的吸收系数,表示水体总吸收系数, $a_{CDOM}(\lambda)$ 是滤液在波长 λ 处的吸收系数,表示有色可溶性有机物(colored dissolved organic matter, CDOM)的吸收,因此可知 TSM 相应的吸收系数 $a_p(\lambda)$ 为

$$a_p(\lambda) = a_{Total}(\lambda) - a_{CDOM}(\lambda) \quad (2)$$

1.3 遥感影像数据

为了观察 TSM 在舟山海域的时空变化,从美国地质调查局(USGS)网站下载了 2013 年—2018 年质量较好且无云或少云的 10 景 Landsat-8 OLI L1T 级别的影像数据(行列号: 117, 39),成像时间分别为 2013 年 8 月 6 日、12 月 12 日、2015 年 4 月 22 日、10 月 15 日、7 月 27 日、2017 年 1 月 21 日、5 月 29 日、9 月 18 日和 2018 年 3 月 13 日、6 月 1 日,其中由于 2018 年 3 月 13 日影像的成像时间和 2018 年 3 月 12 号的实地采样时间接近,可用于大气校正和 TSM 反演结果的验证。

2 实验部分

2.1 基于实测数据的反演建模

根据 Landsat-8 的相对光谱响应函数,使用实测光谱模拟 Landsat-8 的前五个波段(433~885 nm),然后与实测的 $a_p(440)$ 通过统计回归方法建立多种经验模型,并确定最佳反演模型。

本研究测试了线性、指数、对数和 S-函数。线性、指数和对数函数在水色遥感反演研究中应用较多,但是它们的输出范围都没有上界,特别是线性函数,一旦自变量 R_{rs} 超出建模所使用的数值范围(这种情况在通过卫星图像获取反射率时常会出现),输出(TSM 吸收系数)就有可能产生很大误差。S-函数在生物统计学、数量心理学、BP 神经网络等领域有较广泛的应用,其特征是在输入变量很大或很小时,输出变量会趋向于确定的最大和最小值,这与研究对象的实际情况较吻合,因为在确定的研究区域, $a_p(440)$ 总在一定的范围内,既不可能极大,也不可能出现负值情况,因此 S 函数在针对遥感图像反演的应用上,具有较强的鲁棒特征。S-函数的具体形式如式(3)

$$y = a/(b + e^{-kx}) \quad (3)$$

式中 x 为不同波段或波段组合的 R_{rs} , y 为实测 TSM 的吸收系数, a , b , k 为模型参数。

从 108 组实测数据中随机选取 73 组用于模型构建,剩下 35 组用于模型验证。根据建模和验证数据组的统计参数,如 R^2 , RMSE, RRMSE, AME 比较各个模型的精度, R^2 较大或 RMSE, RRMSE, AME 较小的模型可以应用于遥感影像反演。

2.2 遥感图像处理与大气校正

大气校正是 Landsat-8 用于水色遥感反演中极为重要的图像预处理过程,其结果的准确性对后期的反演精度有较大的影响。对比分析了 FLAASH, 6S 和 ACOLITE 三种大气校正方法,期望获取更为准确的 R_{rs} 。ACOLITE 是一种专门针对高浊度近岸水体的大气校正方法,能够直接输出 R_{rs} 。FLAASH 和 6S 方法虽然在水色遥感领域有一定的应用,但它们更多地用于陆地卫星的大气校正,且其输出是辐照度反射率 R_t ,需将其处理成 R_{rs} ,公式如式(4)

$$R_{rs} = \frac{R_t}{\pi} - \frac{L_r(\theta, \varphi)}{E_d} \quad (4)$$

其中 $L_r(\theta, \varphi)$ 是天顶角 θ 和方位角 φ 观测下的经由水面反射

的辐亮度, E_d 为下行辐照度,这两个参数可用水光学辐射传输模拟软件 Hydrolight 估算。

将以上三种大气校正方法应用于 2018 年 3 月 13 日的 Landsat-8 图像,从大气校正后获取的 22 条实测的光谱(采用 3×3 中值滤波提取)与 ASD 前日期的实测光谱相比较。图 2(a)为比对结果,可以看出 ACOLITE 的误差最小(AME < 60%, RMSE < 0.031 m^{-1} , RRMSE < 62%), FLAASH 和 6S 的校正效果明显较差(AME 的范围分别为 54%~75%和 >60%),特别是在蓝色波段,ACOLITE 的误差明显小于另两种方法。因此根据以上结果,本研究采用 ACOLITE 对 Landsat-8 图像进行大气校正。

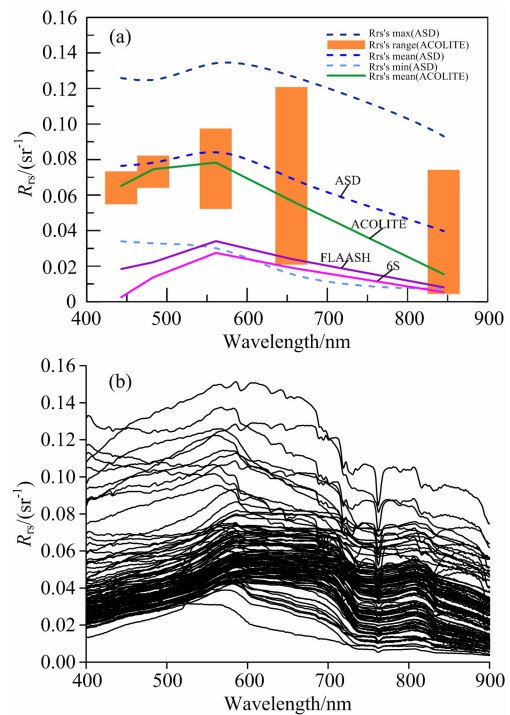


图 2 (a) 比较实测 R_{rs} 与 Landsat-8 影像经不同大气校正模型校正后获取的 R_{rs} ; (b) 实测 R_{rs}

Fig. 2 (a) Comparison of the in-situ measured R_{rs} and Landsat-8 image derived R_{rs} via different atmospheric correction models; (b) the in-situ measured R_{rs}

3 结果与讨论

3.1 实测水质和光谱

根据研究区域内实测水体吸收系数 a_{Total} , a_{CDOM} 和 a_p 值,水体的总吸收主要由 TSM 贡献,平均占比 98.08%, CDOM 的贡献较小,只占 1.92%。在局部区域,由于东极海域岛屿较少,人类活动不频繁,离舟山本岛较远,水相对清澈,因此 TSM 浓度相对较低($1.64 \sim 153.58 \text{ m}^{-1}$, 均值 25.79 m^{-1}); 舟山本岛以北,衢山、洋山海域的 TSM 值最高($9.36 \sim 417.04 \text{ m}^{-1}$, 均值 158.25 m^{-1}),因为洋山海域有大小 90 个岛礁,离长江口最近,是长江和钱塘江江水直接交汇碰撞的区域,潮流强劲,泥沙不易落淤,而且有全球最大的智能集装箱码头洋山深水港,频繁往来的大型船只众多,吃

水较深, 船体运动的扰动使得泥沙长期处于悬浮状态; 桃花岛和六横岛海域 TSM 浓度比衢山、洋山海域略低(19.08~336.66 m⁻¹, 均值 124.53 m⁻¹), 但比东极岛海域平均值高出近 100 m⁻¹, 该海域离舟山本岛和宁波地区的海岸带较近, 岛际、岛陆之间的客货运及旅游船只比较密集, 加之岛屿较多, 岸线曲折, 水域又相对狭小, 使得由钱塘江汇出的浑浊水体长期在此聚集, 不易向海外扩散。综合可见, 舟山海域 TSM 的吸收系数极值大, 变化剧烈, 水体普遍浑浊, 是典型河口海岸地区的复杂二类水体。

该海域的实测水面光谱曲线如图 2(b)所示, 大部分光谱形状具有较为典型的海岸带浑浊水体特征, R_{rs} 普遍较高, 在 400~800 nm 之间的均值是 0.05 sr⁻¹, 很多谱线具有双峰特征, 其中第一反射峰在 550~600 nm 之间, 第二反射峰在

800 nm 附近。其中洋山岛附近最浑浊水体的 R_{rs} 最大值在红绿波段达到 0.15 sr⁻¹, 而东极岛附近较清澈水体的 R_{rs} 则明显偏低, 最大值仅有 0.04 sr⁻¹。

3.2 基于 Landsat-8 波段的 TSM 最佳反演模型

TSM 与 B1—B5 五个波段的 R_{rs} 的单波段或波段组合在四种函数形式下回归一共可产生 190 种反演模型, 表 1 中仅列出在某一模型下最好的单波段或波段组合, 可以看出, 波段组合算法(No. 4-13, 平均 R²=0.74, RMSE=57.81 m⁻¹) 优于单波段算法(No. 1-3, 平均 R²=0.28, RMSE=82.98 m⁻¹)。另外, 由于最好的单波段或波段组合的波长大都是 483 或 865 nm, 表明蓝和近红外波段更适合于 TSM 遥感建模。

表 1 TSM 与 Landsat-8 波段组合统计建模与验证的结果

Table 1 Results of statistical modeling and validation between TSM and two Landsat-8 bands

序号	模型函数	建模集		验证集			波长/nm	
		R ²	RMSE/m ⁻¹	R ²	RMSE/m ⁻¹	RRMSE/%	B1	B2
1	y=aB1+b	0.32	79.00	0.08	63.44	22.88	865	/
2	y=a ln(B1)+b	0.34	77.30	0.002	57.95	22.02	865	/
3	y=ae ^{bB1}	0.19	92.65	0.08	78.90	27.03	865	/
4	y=a(B1-B2)+b	0.61	59.92	0.60	39.78	14.02	865	483
5	y=a ln(B1-B2)+b	0.75	48.26	0.44	42.92	13.44	561	865
6	y=ae ^{b(B1-B2)}}	0.77	73.19	0.43	34.65	12.51	655	561
7	y=aB1/B2+b	0.77	46.29	0.75	32.04	13.05	865	483
8	y=a ln(B1/B2)+b	0.64	57.23	0.34	35.21	13.47	865	483
9	y=ae ^{b(B1/B2)}}	0.76	73.62	0.53	35.36	12.83	655	561
10	y=a $\frac{B1-B2}{B1+B2}$ +b	0.69	53.45	0.69	33.67	12.91	865	483
11	y=a $\frac{\ln(B1-B2)}{B1+B2}$ +b	0.81	41.98	0.27	45.41	16.46	865	561
12	y=ae ^{$\frac{B1-B2}{B1+B2}$}	0.75	75.74	0.50	37.43	17.82	654	561
13	y=a/(b+e ^{-k$\frac{B1}{B2}$})	0.83	48.43	0.79	52.60	39.51	864	483

从模型函数上看, 当利用双波段组合作为自变量时, 以往常用的线性、指数、对数模型反演结果相对较好(平均 R²=0.73, RMSE=58.85 m⁻¹), 但每个函数反演精度相差不大, 其中线性函数(No. 4)的反演精度较低(R²=0.61, RMSE=59.92 m⁻¹)。相比较而言, 基于蓝色和近红外波段的 S-函数(No. 13)在建模和验证中精度高、效果好[如图 3(a)和(b), 建模集 R²=0.83, RMSE=48.43 m⁻¹; 验证集 R²=0.79, RMSE=52.60 m⁻¹, RRMSE=39.51%], 函数形式为

$$y = 3.72 / (0.009 + e^{-5.249x}), x = R_{rs}(B5) / R_{rs}(B2) \quad (5)$$

比 S-函数效果次之的是基于蓝色和近红外波段的线性模型, 公式为

$$y = 336.24x - 92.66, x = R_{rs}(B5) / R_{rs}(B2) \quad (6)$$

但该函数后期在图像上的应用显示, 当 x<0.28 时模型输出负值, 当 x>1.7 时会出现极大的 y 值, 因此没有将该模型实际应用于图像反演。

3.3 基于 Landsat-8 影像的 TSM 估算与验证

将最佳模型[式(5)]应用于 2018 年 3 月 13 日的 Landsat-8 影像, 获得了舟山海域 TSM 的吸收系数分布状况。与实测值相比较, 模型的反演准确度相对较好(R²=0.88, RMSE=25.98 m⁻¹, RRMSE=52.72%, AME=62%)。有个别样本的误差较大, 如样本 12 和 13 的相对误差分别为 238.02%和 136.05%, 可能是由于这些样本靠近岸边(<30 m), 水体光谱与陆地光谱混合, 且这几个样点处于水质较清的东极海域, TSM 浓度值较小, 而建模时使用的大部分样点是较浑浊的水体, 所以应用于清水区域时有较大的不确定性。如果排除这几个点, 则实测值与预测值之间的误差仅为 33%, 说明该 S-函数基本适用于 Landsat-8 在舟山海域的 TSM 反演。

3.4 TSM 浓度的时空变异特征

根据上述图像验证结果, 将 S-函数模型应用到 10 景 Landsat-8 影像上, 获取了舟山近岸海域 TSM 吸收系数的空间分布及在不同月份的动态变化情况(图 4)。结果显示该海域近岸水体 TSM 较高(最大值 413.32 m⁻¹), 距离岸线越远

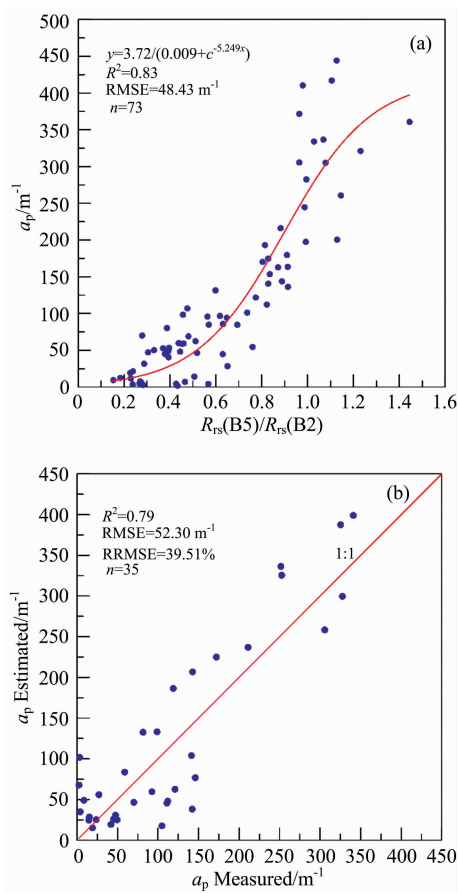


图 3 $R_{rs}(B5)/R_{rs}(B2)$ 的 S-函数拟合的建模与验证
 Fig. 3 $R_{rs}(B5)/R_{rs}(B2)$ S-function fitting and their validation results

值越低(最小值 3.69 m^{-1}), 且在外海分布较为均匀, 在杭州湾湾口羽化区, 整体呈现西北向东南方向降低的趋势, 与之前有关研究一致^[3], 出现这种现象的原因可能一方面与北邻长江入海口受河流携带陆源物质的影响有关, 另一方面西北侧有洋山深水港, 受船只货轮等人活动的影 响。舟山本岛与岱山岛和宁波之间的狭小水体区域 TSM 长期处于较高状态(最大值 409.27 m^{-1}), 由于这些区域客货运船只来往频繁, 船只扰动使得 TSM 长期处于悬浮状态。而在岛外区域(东极岛、嵎泗岛和六横岛)TSM 值相对较低, 因为这些区域离舟山本岛较远, 受人类活动影响小, 水质清澈。

从舟山近海海域 2013 年—2018 年 TSM 时间分布来看, 具有冬季高、夏季低的特点, 其中 12 月最高可达 413.32 m^{-1} , 8 月最低, 最小值为 3.69 m^{-1} 。12 月、1 月和 4 月 TSM 值不仅近岸较高, 而且高值区域分布较广, 一方面可能是舟山春冬季多大风, 引起泥沙再悬浮; 另一方面 12 月、1 月临近年底、春节, 洋山港货运频繁, 船只扰动作用使得 TSM 中的较大颗粒始终处于悬浮状态。但是冬季 TSM 较高还可能与冬季空气浑浊有关: 大气校正不能完全去除雾霾影响, 造成 R_{rs} 偏高, 从而引起反演结果升高, 所以冬季水体实际 TSM 浓度可能比夏季较大, 但遥感反演结果可能偏大。5 月和 10 月 TSM 值比 7 月、8 月高, 因为 5 月和 10 月是旅游旺季, 普陀山、嵎泗岛、桃花岛等旅游景区船只出海游览、钓鱼等活动都会加剧水体扰动。6 月—8 月份 TSM 吸收系数较低, 大部分区域 $a_p(440) < 15 \text{ m}^{-1}$, 受季风和降雨影响: 6 月有梅汛, 7 月和 8 月多台风, 降水较多, 淡水冲击力强, 对 TSM 有稀释作用。8 月岱山岛以北区域 TSM 较低, 几乎与 3 月外海区域接近, 可能受潮汐引起的海水内推, 稀释了河口输出的浑浊淡水; 另一方面, 由于夏季光照较强, 也会使 TSM 中的部分有色组分发生光褪色反应, 引起 TSM 的吸收降低。

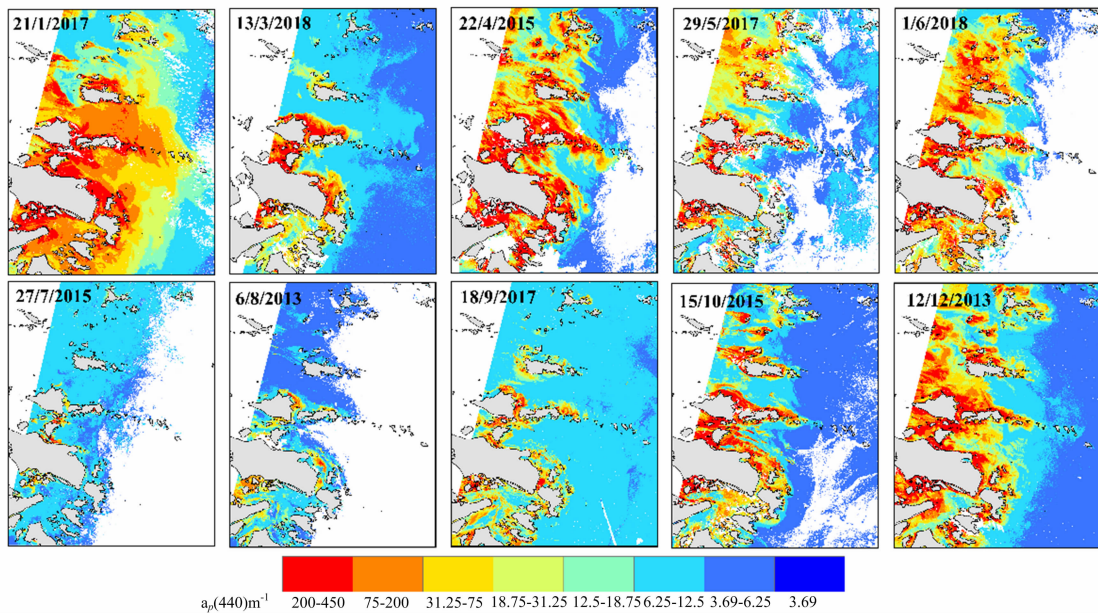


图 4 舟山近岸海域不同月份的 TSM 的时空分布与变化
 Fig. 4 Monthly TSM distributions and variations in Zhoushan coastal regions

另外,从图 4 可以看出,舟山本岛与岱山岛和宁波之间有小部分区域 TSM 浓度始终较高(即使在 7 月和 8 月份大部分海域 TSM 浓度较低的月份),这与舟山三江码头与岱山高亭码头,以及鸭蛋山码头与宁波白峰码头之间客运渡轮比较密集有关,船体扰动使得该区域泥沙长期处于悬浮状态。

4 结 论

以舟山近岸海域的实测 TSM 吸收系数和光谱数据为基础,建立了基于 Landsat-8 近红外和蓝波段比值的 S 函数反演模型,利用 Landsat 影像,获取并分析了该海域 TSM 的时空变化,得到以下结论。

(1)舟山近岸海域 TSM 浓度整体较高(均值 121 m^{-1}),水体总吸收主要由 TSM 贡献(平均占比 98%)。舟山以北的衢山、洋山区域 TSM 值最高(最大值 417.04 m^{-1}),桃花岛和六横岛海域次之(最大值 336.66 m^{-1}),而东极海域附近水体相对清澈, $a_p(440)$ 值相对较低,最大值仅为 153.58 m^{-1} 。

(2)实测数据建模、验证及在图像上的应用表明,基于

近红外波段/蓝波段的 S 型函数模型是最适用于舟山海域的反演模型,具体形式是: $y = 3.72 / (0.009 + e^{-5.249x})$, $x = R_{rs}(B5) / R_{rs}(B2)$ 。

(3)该海域 TSM 的空间分布呈现近岸高、离岸低的特点,且在外海分布较为均匀。特别在岛屿之间的狭小区域, TSM 浓度较高,而在东极岛、嵊泗岛等岛外区域,浓度较低。在时间分布上,呈现冬季高、夏季低的特点,5 月、10 月等旅游旺季受人为活动影响, TSM 值也相对较高。

对舟山近岸海域 TSM 吸收系数的水色遥感反演与时空变异做了初步的探索与研究,结果表明,通过 Landsat-8 遥感评估可以为该海域的基于 TSM 的水质监测提供一种较为便捷准确的方法。但是由于该海域地形、海况及水质状况都较为复杂,我们的研究尚存在一些不足之处,受数据缺乏的限制,一些环境因素并没有展开定量分析,如潮汐、洋流、水团、水汽交互等海洋物理因素,以及其他可能与 TSM 发生作用的水光学、海洋生物及海洋化学因素,如黄色物质、浮游藻类、油迹等等,这些因素对 TSM 及其遥感光学反演的影响有待于获取更多的数据之后做进一步的深入研究。

References

- [1] Shi K, Li Y, Li L, et al. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2013, 118(2): 860.
- [2] Tian L, Wai O, Chen X, et al. Remote Sensing, 2014, 6(10): 9911.
- [3] ZHANG Min-chao, GUO Bi-yun(章敏超, 郭碧云). Ocean Development and Management(海洋开发与管理), 2018, 35(1): 126.
- [4] ZHANG Yi-bo, ZHANG Yun-lin, ZHA Yong, et al(张毅博, 张运林, 查勇, 等). Environmental Science(环境科学), 2015, 36(1): 56.
- [5] LIU Zhong-hua, LI Yun-mei, TAN Jing, et al(刘忠华, 李云梅, 檀静, 等). Environmental Science(环境科学), 2012, 33(9): 3000.
- [6] Liu H, Li Q, Shi T, et al. Remote Sensing, 2017, 9(7): 761.
- [7] Zhang M, Dong Q, Cui T, et al. Remote Sensing of Environment, 2014, 146: 136.
- [8] Watanabe F, Alcantara E, Rodrigues T, et al. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2015, 12(9): 10391.
- [9] Chen J, Zhu W N, Tian Y Q, et al. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2017, 55(4): 2201.
- [10] LUAN Hong, FU Dong-yang, LI Ming-jie, et al(栾虹, 付东洋, 李明杰, 等). Marine Environmental Science(海洋环境科学), 2017, 36(6): 892.
- [11] HUANG Li-tong, CHEN Jiang, ZHU Wei-ning, et al(黄李童, 陈江, 朱渭宁, 等). Acta Scientiae Circumstantiae(环境科学学报), 2018, 38(10): 4073.
- [12] Pan Y Q, Shen F, Wei X D, et al. Remote Sensing, 2018, 10(2): 158.
- [13] Mueller J L, Austin R W. Ocean Optics Protocols for SeaWiFS Validation; NASA Technical Memorandum 104566. Greenbelt, MD, NASA Goddard Space Flight Center, 1992.
- [14] Mobley C D. Applied Optics, 1999, 38(36): 7442.

Using Landsat-8 to Remotely Estimate and Observe Spatio-Temporal Variations of Total Suspended Matter in Zhoushan Coastal Regions

PANG Shu-na¹, ZHU Wei-ning^{1*}, CHEN Jiang², SUN Nan³, HUANG Li-tong¹, ZHANG Yu-sen¹, ZHANG Ze-liang¹

1. Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China

2. School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China

3. Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China

Abstract Total suspended matter (TSM) is one of the important parameters for ocean water quality and aquatic environment assessment. Zhoushan Islands is located on the edge of Hangzhou Bay, where sediments present very high concentration and TSM shows suspended status for long-term. The distribution and variation of TSM in Zhoushan Islands have great impacts on its coastal water quality, ferry, fishery and tourism. Because of its high spatial resolution and open access, Landsat-8 imagery has been widely used for ocean color studies and hence providing good spectral information for observing variations of TSM in Zhoushan coastal regions. This study used in-situ measured TSM absorption coefficient ($a_p(440)$, m^{-1}) and water surface spectra to develop the TSM remote sensing model based on Landsat-8 imagery, and results show that the S-function using blue and near-infrared bands of Landsat-8 performed better than the other functions. The S-function is with the form $a_p = 3.72 / (0.009 + e^{-5.249B5/B2})$. This function overcomes the shortcomings of previous inversion functions (e. g., linear, logarithmic, and exponential functions) which performed well for modeling datasets, but often failed when they were applied to real satellite images since spectral values in images are often much larger than those in the modeling dataset. Another problem of coastal and inland water color remote sensing is the atmospheric correction. The previous studies usually used a specific atmospheric correction method, but it might not return the best results. In this study, we tested and compared three types of atmospheric corrections models, FLAASH, 6S, and ACOLITE, and found that ACOLITE was better than the other two methods for ocean color remote sensing using Landsat-8, especially in blue band, where ACOLITE performed better than the FLAASH and 6S methods. The S-model was used to a series of Landsat-8 images covering the Zhoushan Islands from 2013 to 2018. The field measured and image-derived results show that TSM absorption coefficients in Zhoushan Islands were extremely high, ranging from 1.64 to 417.04 m^{-1} , with mean 118.47 m^{-1} , which account for more than 90% of total water absorption coefficients. The measured above-surface spectra demonstrated typical spectral signatures of complex turbid coastal water, with two peaks within green and red bands and relatively high reflectance within red and near-infrared bands. Due to the high concentrations of the riverine discharged TSM, remote sensing reflectance in estuarine and coastal regions were much higher than those in open sea. TSM concentrations illustrated a clear downward gradient from Hangzhou Bay to open sea, and TSM in coastal areas such as Qushan, Yangshan and Ningbo were much higher than those in open sea area such as Dongji and Shengsi. TSM distribution pattern in coastal regions were usually more complex than those in offshore regions. TSM concentrations in winter were usually much higher than those in summer, where the highest was found in December with value of 413.32 m^{-1} , and the lowest was found in August with value of 3.69 m^{-1} . There are also local peaks of TSM during May and October. Our results indicate that the TSM spatio-temporal variations in Zhoushan Islands are not only controlled by many natural environmental factors, such as currents, tides, typhoons, monsoons, but also are significantly influenced by many human activities, such as ferry, ocean shipping, harbor projects and island tourism.

Keywords Ocean color remote sensing; Total suspended matter; Landsat-8; Coastal regions; spatio-temporal variations

(Received Oct. 19, 2018; accepted Feb. 16, 2019)

* Corresponding author