

邵宇杰, 胡越凯, 周斌, 等. 基于 GF-4 卫星的杭州湾悬浮泥沙浓度遥感监测研究[J]. 海洋学报, 2020, 42(9): 134–142. doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2020.09.014

Shao Yujie, Hu Yuekai, Zhou Bin, et al. Remote sensing monitoring of suspended sediment concentration based on GF-4 satellite in the Hangzhou Bay[J]. Haiyang Xuebao, 2020, 42(9): 134–142. doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2020.09.014

基于 GF-4 卫星的杭州湾悬浮泥沙浓度遥感监测研究

邵宇杰^{1,6}, 胡越凯², 周斌^{1,6}, 陈芳³, 何贤强⁴, 王国军⁵,
袁小红^{1,6}, 周亚丽^{1,6}, 于之锋^{1,5,6*}

(1. 杭州师范大学 遥感与地球科学研究院, 浙江 杭州 311121; 2. 华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室, 上海 200241; 3. 武汉大学 测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430079; 4. 湛江湾实验室南海渔业大数据中心, 广东 湛江 524006; 5. 中科卫星应用德清研究院 浙江省微波目标特性测量与遥感重点实验室, 浙江 德清 313200; 6. 浙江省城市湿地与区域变化研究重点实验室, 浙江 杭州 311121)

摘要: 悬浮泥沙作为重要水质参数, 其分布和动态变化对河口及近岸的生态、环境、物质循环等都具有深远的影响。我国静止轨道高分四号 (GF-4) 卫星数据具有高时间和高空间分辨率的观测优势, 在水色遥感上具有重大应用潜力。为探究 GF-4 卫星对悬浮泥沙浓度的监测能力, 本文以杭州湾为研究区, 构建反演模型, 利用静止海洋水色成像仪进行交叉验证。结果表明, 以 GF-4 卫星第 5 和第 4 波段遥感反射率的比值作为遥感因子建立的反演模型精度较高, 决定系数为 0.92, 均方根误差为 223.2 mg/L, 平均相对误差为 17.2%。交叉验证结果显示, GF-4 卫星作为一种新的遥感数据源, 在低浓度区与静止海洋水色成像仪反演悬浮泥沙浓度分布相似, 但在高浓度区的差异随浓度增高而增大, 总体可满足中国大部分海区的监测需求。

关键词: 悬浮泥沙浓度; 杭州湾; GF-4 卫星; GOCI 卫星; 指数模型

中图分类号: P736.2

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2020)09-0134-09

1 引言

水体中的悬浮泥沙是影响海洋水色的重要物质, 其浓度变化会对水体浑浊度、透明度等光学特性产生影响^[1]。悬浮泥沙的侵蚀与淤积不仅会影响港口、航道的生态环境, 同时对航道安全产生影响^[2]。因此, 实时掌握河口悬浮泥沙的时空分布、通量变化, 是河口资源可持续开发、沿岸水质保护的关键。传统的采样方法无法实现悬浮泥沙大范围同步观测, 且花费巨大, 而卫星遥感具有的大尺度、实时观测的优点, 能够对大面积的水域进行动态、连续、同步观测, 研

究表明, 在进行河口悬浮泥沙变化监测时, 遥感技术具有独特优势^[3-7]。

2016 年, 国产地球静止轨道卫星高分四号 (GF-4) 的投入使用为海洋水色的遥感监测提供了新的数据源。GF-4 卫星具有高时间分辨率 (20 s) 和高空间分辨率 (50 m), 在悬浮泥沙的观测上具有一定的应用潜力。近年来, GF-4 卫星的水色领域应用受到了学者的广泛关注。李珏^[8] 使用 NDVI、NDWI、MNDWI 进行了 GF-4 卫星影像数据的水体提取研究; 刘明等^[9] 通过与高分一号 (GF-1) 卫星以及美国 Terra 卫星进行对比实验证明了 GF-4 卫星数据可以用于水体面积及变化

收稿日期: 2019-06-22; 修订日期: 2020-04-14。

基金项目: 南方海洋科学与工程广东省实验室 (湛江) (湛江湾实验室) 项目 (ZJW-2019-08); 国家重点研发计划 (2016YFC1400906, 2016YFC1401008); 国家自然科学基金 (41206169); 浙江省微波目标特性测量与遥感重点实验室开放基金 (2018KF03)。

作者简介: 邵宇杰 (1997—), 男, 浙江省绍兴市人, 从事水环境遥感研究。E-mail: shaoyujie@stu.hznu.edu.cn

* 通信作者: 于之锋 (1984—), 博士, 从事水环境遥感研究。E-mail: yu@hznu.edu.cn

监测;宋挺等^[10]利用同步 MODIS 数据辅助 GF-4 数据,实现了 GF-4 卫星数据浑浊水体的大气校正,并通过与实测光谱数据、GOCI 卫星数据大气校正结果的协同比对分析,为 GF-4 卫星在内陆水体定量遥感监测提供了依据;陈晓英等^[11]利用 GF-4 卫星开展黄海绿潮漂移速度提取研究,并证明 GF-4 卫星数据可为绿潮快速漂移的高精度监测提供有效的数据支撑。以上研究成果均表明 GF-4 卫星在水色遥感监测方面具有较大的应用潜力,但在悬浮泥沙遥感监测方面,研究仍比较少。

韩国于 2010 年发射的地球静止轨道卫星上搭载的 GOCI 卫星传感器具有 8 个可见光及近红外波段,空间分辨率为 500 m,时间分辨率为 3 h(具体参数见表 1),可用于海洋和沿海地区水质的连续观测,并能较好地反映水域高频变化的特点^[12-13]。众多研究表明,当需要监测、预测短时间范围的复杂水动力环境时,GOCI 卫星的水色产品具有较高可信度^[14-18]。因此,在本文中将利用 GOCI 卫星数据对 GF-4 卫星的反演精度进行交叉验证。对于杭州湾等高动态变化水体,其水体空间差异较大,GOCI 卫星等水色卫星空间分辨率较低,GF-4 卫星的高时空分辨率可以有效地弥补此不足。

表 1 卫星传感器的基本参数

Table 1 Basic parameters of satellite sensor

传感器	轨道类型	光谱范围/nm	幅宽/km
GOCI卫星	地球同步轨道	B1: 402~422	2 500
		B2: 433~453	
		B3: 480~500	
		B4: 545~565	
		B5: 650~670	
		B6: 675~685	
		B7: 735~755	
		B8: 845~885	
GF-4卫星	地球同步轨道	B1: 450~900	400
		B2: 450~520	
		B3: 520~600	
		B4: 630~690	
		B5: 760~900	
		B6: 3 500~4 100	

综上,本文基于 GF-4 卫星,通过分析实测悬浮泥沙浓度(Suspended Sediment Concentration, SSC)与光谱数据之间的关系,建立基于 GF-4 卫星的悬浮泥沙浓度

反演模型,采用与 GOCI 卫星交叉验证技术,评价 GF-4 卫星在水体悬浮泥沙监测上的适用性,以弥补目前 GOCI 卫星悬浮泥沙监测空间分辨率不足的问题,提供高时间和高空间分辨率的悬浮泥沙遥感监测产品。

2 数据与方法

2.1 研究区概况

杭州湾位于我国海岸线中段,是我国沿海潮差最大的喇叭形河口湾^[19]。湾口宽约 95 km,湾内水深最大约 10 m,总水域面积约为 5 000 km²,湾底形态自湾口至乍浦地势平坦;从乍浦起,以 0.1‰~2‰的坡度向西抬升,在钱塘江河口段形成巨大的沙坎^[20]。由于河口平面收缩强烈,湾底迅速抬升,潮差急剧增大,在钱塘江径流、长江口水流与东海潮波的共同影响下,水体具有高动态、超强急流、高含沙量等特点^[21],水体中悬浮物的平均浓度在 705~1 950 mg/L 之间^[22],致使杭州湾的水域一直处于高浑浊的状态。

2.2 实测数据及处理

本文采用定点观测法和连续流量观测相结合的方法,在 2011 年 12 月 2-13 日先后对杭州湾的 10 个实验点(4 个定点,6 个走航)进行水体采样以及光谱测量(图 1)。

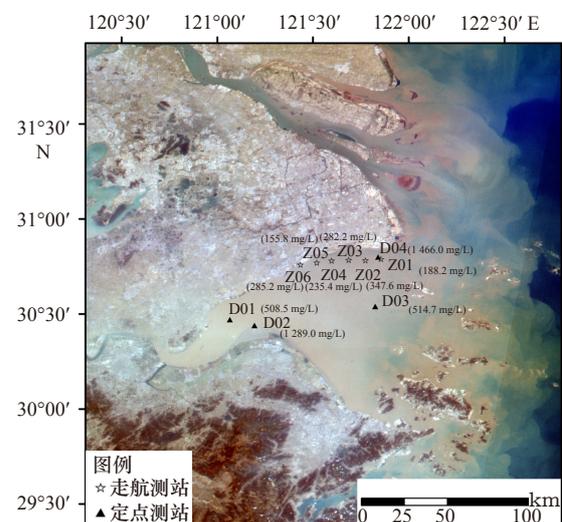


图 1 观测站位分布示意图

Fig. 1 Distribution of observation stations

样本水体由标准采样器采集得到,各站点均从站位表层以下约 5~10 cm 处进行采样。光谱数据利用手持式 ASD 光谱仪和 30% 反射率的标准板,依据水面以上测量法^[23]获取各站点的水体光谱数据,剔除每个观测点中偏差较大的异常光谱,计算剩余光谱数据的水体遥感反射率(图 2)。悬浮泥沙浓度的测定采

取过滤重量法^[24],取一定量的待测水样,使用直径为 0.45 μm 的醋酸纤维滤膜对水样进行过滤,将过滤得到的样品带回实验室进行烘干、灼烧、冷却、称量分析,计算出各站点的实测悬浮泥沙浓度,最后获得 60 组有效观测数据。根据实测数据,悬浮泥沙浓度范围大致在 155~1 800 mg/L,与前人研究结果基本一致。

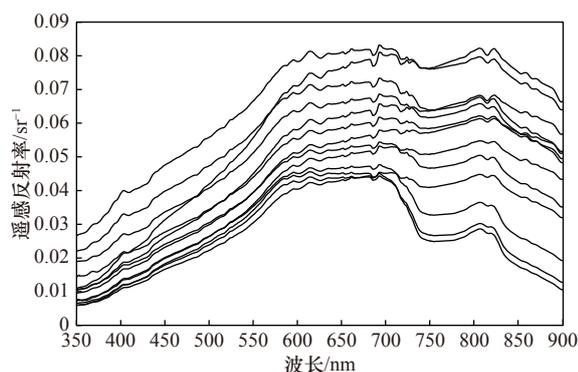


图 2 实测光谱数据
Fig. 2 In-situ spectral data

2.3 遥感数据及预处理

GF-4 卫星成像 (GF4_IRS_E120.6_N29.0_20160301_L1A0000107806) 时间为 2016 年 3 月 1 日 12 时 38 分, GOCI 卫星成像 (COMS_GOCI_L1B_GA_20160301041641) 时间为 2016 年 3 月 1 日 12 时 28 分,影像均无云。对于海洋水色卫星接收到的信号有 90% 为大气信号,只有不到 10% 为海洋信号^[25],为此,需通过大气校正以减少大气散射等的影响。在本文中, GOCI 卫星数据的大气校正采用 He 等^[26]提出的浑浊水体紫外大气校正算法。由于 GF-4 卫星只有一个近红外波段(中心波长约为 830 nm),缺少浑浊水体大气校正所需的短波红外以及蓝紫光波段,无法采用基于短波红外或蓝紫光的大气校正算法。因此 GF-4 卫星数据的大气校正利用 ENVI 的 FLAASH 模块完成。

2.4 模型构建

研究中获取的实测数据由手持式光谱数据得到,为进行 GF-4 卫星影像悬浮泥沙反演模型的建模及验证,需将各站点计算得到的水体遥感反射率转换为等效波段遥感反射率,公式为

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

式中, R_{rs} 为等效波段遥感反射率; $R_{rs}(\lambda)$ 为各站点实测的连续光谱遥感反射率; $S_i(\lambda)$ 为影像各波段的光谱响应函数。

在目前的研究中,利用指数模型构建悬浮泥沙反演模型较为常见^[27-28],因此本文采用多波段指数模型构建 GF-4 卫星反演 SSC 模型。将实测数据分成两部分,其中 2/3 (40 对) 的数据用于建模, 1/3 (20 对) 的数据用于评价模型精度。水体光谱在黄光波段 (560~590 nm) 和近红外波段 (750~900 nm) 有两个反射峰,且反射率波谱曲线随着泥沙浓度的增加而增大,增幅不同^[29]。为探究近红外波段与可见光波段比值和悬浮泥沙浓度的相关关系,利用 GF-4 卫星的 B2、B3、B4、B5 波段的遥感反射率构建不同的遥感因子反演悬浮泥沙浓度模型,计算建模数据回归关系的决定系数 (R^2),并验证数据计算均方根误差 (RMSE) 和平均相对误差 (MRE),用以评价反演模型的优劣性。

$$\text{RMSE} = \sum_{n=1}^{n=i} \sqrt{\left[\frac{(\text{SSC}_{\text{model}} - \text{SSC}_{\text{reg}})^2}{i} \right]}, \quad (2)$$

$$\text{MRE} = \frac{1}{i} \cdot \sum_{n=1}^{n=i} \frac{|\text{SSC}_{\text{model}} - \text{SSC}_{\text{reg}}|}{\text{SSC}_{\text{reg}}} \cdot 100\%, \quad (3)$$

式中, $\text{SSC}_{\text{model}}$ 为计算得到的悬浮泥沙浓度; SSC_{reg} 为实测的悬浮泥沙浓度; i 为验证点的数量。

3 结果与分析

3.1 模型精度分析

研究基于建模组建立 GF-4 卫星反演的模型,并基于验证组数据,以 RMSE 和 MRE 为指标确定模型优度(图 3)。结果表明,当遥感因子为 $R_{rs}(B5)/R_{rs}(B2)$ 、 $R_{rs}(B5)/R_{rs}(B3)$,这两种模型反演结果与实际相差较大,对应的 MRE 分别为 32.0% 和 24.5%。当遥感因子为 $R_{rs}(B5)/R_{rs}(B4)$ 时,构建出的反演模型误差较小, MRE 为 17.2%。因此,将该模型作为本文中应用的 GF-4 卫星反演模型(式(4)),该模型在 SSC 浓度低于 800 mg/L 的水域,反演结果与实际基本吻合,主要误差来源于 SSC 高于 800 mg/L 的高浑浊水域。

$$\text{SSC} = 4.87 \exp(5.63X), \quad (4)$$

式中, X 为 GF-4 卫星第 5 波段与第 4 波段遥感反射率比值。

本文 GOCI 卫星数据同样采用指数模型,根据以往的相关研究的经验^[17,26,30]和建模尝试,确定其反演模型(图 3),并计算各模型的反演误差(表 2),计算公式为

$$\text{SSC} = 20.59 \exp(4.49X), \quad (5)$$

式中, X 为 GOCI 第 8 波段与第 6 波段遥感反射率比值。

由表 2 可知,相较而言, GOCI 卫星建模得到的反

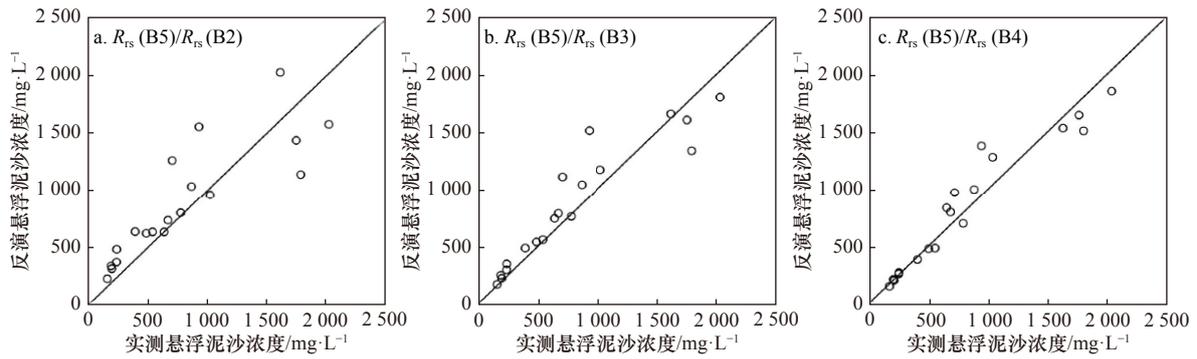


图3 GF-4 实测点与建模点悬浮泥沙浓度对比

Fig. 3 Comparison of suspended sediment concentration retrieved by GF-4 satellite measured point and modeling point

表2 悬浮泥沙浓度反演模型误差

Table 2 Error of different suspended sediment concentration inversion models

传感器	遥感因子	建模点(40对)		验证点(20对)	
		方程	R ²	RMSE/mg·L ⁻¹	MRE/%
GF-4卫星	R _{rs} (B5)/R _{rs} (B2)	SSC=40.29exp(1.83X)	0.82	489.7	32.0
	R _{rs} (B5)/R _{rs} (B3)	SSC=13.88exp(3.59X)	0.88	349.5	24.5
	R _{rs} (B5)/R _{rs} (B4)	SSC=4.87exp(5.63X)	0.92	223.2	17.2
GOCI卫星	R _{rs} (B8)/R _{rs} (B6)	SSC=20.59exp(4.49X)	0.86	212.6	12.3

演模型,与实测数据相比,误差较小,决定系数相对较高,GF-4 卫星建模得到的反演模型 RMSE 为 223.2 mg/L,而 GOCI 卫星为 212.6 mg/L。为探究误差的来源,将实测 SSC 按 0~500 mg/L、500~1 000 mg/L、1 000~2 000 mg/L 进行分段,并分别计算各区间的 RMSE 与 MRE(表 3)。由表 3 可知,在实测低浓度区域,GOCI 与 GF-4 卫星模型的误差均较小,且较为接近。而在实测高浓度区域,二者算法均存在一定的误差,且二者之间的误差也较大。

表3 各区间反演模型误差

Table 3 Model error of interval inversion

悬浮泥沙浓度/mg·L ⁻¹	GF-4卫星模型		GOCI卫星模型	
	RMSE/mg·L ⁻¹	MRE/%	RMSE/mg·L ⁻¹	MRE/%
0~500	26.4	13.1	22.8	12.4
500~1 000	91.7	16.0	104.6	20.0
1 000~2 000	260.8	20.6	181.9	18.7

3.2 悬浮泥沙浓度反演结果分析

利用反演模型对 GOCI 和 GF-4 卫星影像分别进行计算,得到悬浮泥沙浓度结果及其空间分布(图 4)。从图中可以看得出来,GOCI 及 GF-4 卫星的杭州湾悬浮泥沙浓度趋势基本一致。具体表现为:湾顶的浓度大

于湾口,且浓度随着离岸距离的增加而降低,两景影像悬浮泥沙浓度的极大值均出现在近岸水域,并且南岸的悬浮泥沙浓度普遍高于北岸,陆地或岛屿周边的水体悬浮泥沙浓度较高,以其为中心,悬浮泥沙浓度向四周辐散减小,与杭州湾悬浮泥沙实际分布基本一致。

对比两者的反演结果,在湾顶、湾口区域,两景影像的 SSC 大致相同,湾顶区域反演 SSC 在 440.8~530.8 mg/L 之间,湾口区域在 100.6~243.4 mg/L 之间。但在悬浮泥沙浓度较高的南岸区域,GOCI 卫星反演所得的 SSC 明显高于 GF-4 卫星,GOCI 卫星反演的 SSC 分布在 641.12~1 403.9 mg/L 之间,而 GF-4 卫星反演的 SSC 在 646.5~980.1 mg/L 之间,且随 SSC 增高差异逐渐增大。对比影像总体的反演结果,GF-4 和 GOCI 卫星反演的悬浮泥沙浓度变化趋于一致,GF-4 卫星反演的 SSC 大体分布在 100.6~980.1 mg/L 的范围内,而 GOCI 卫星影像的反演 SSC 范围则大体分布在 103.7~1 403.9 mg/L。

为了验证 GF-4 卫星影像反演结果的可靠性,通过计算两组影像 SSC 的最大值、最小值、平均值,从而对反演结果进行定量分析(表 4)。

由表 4 可以看出,GOCI 卫星影像反演的 SSC 均值为 256.8 mg/L,而 GF-4 卫星影像反演的 SSC 均值

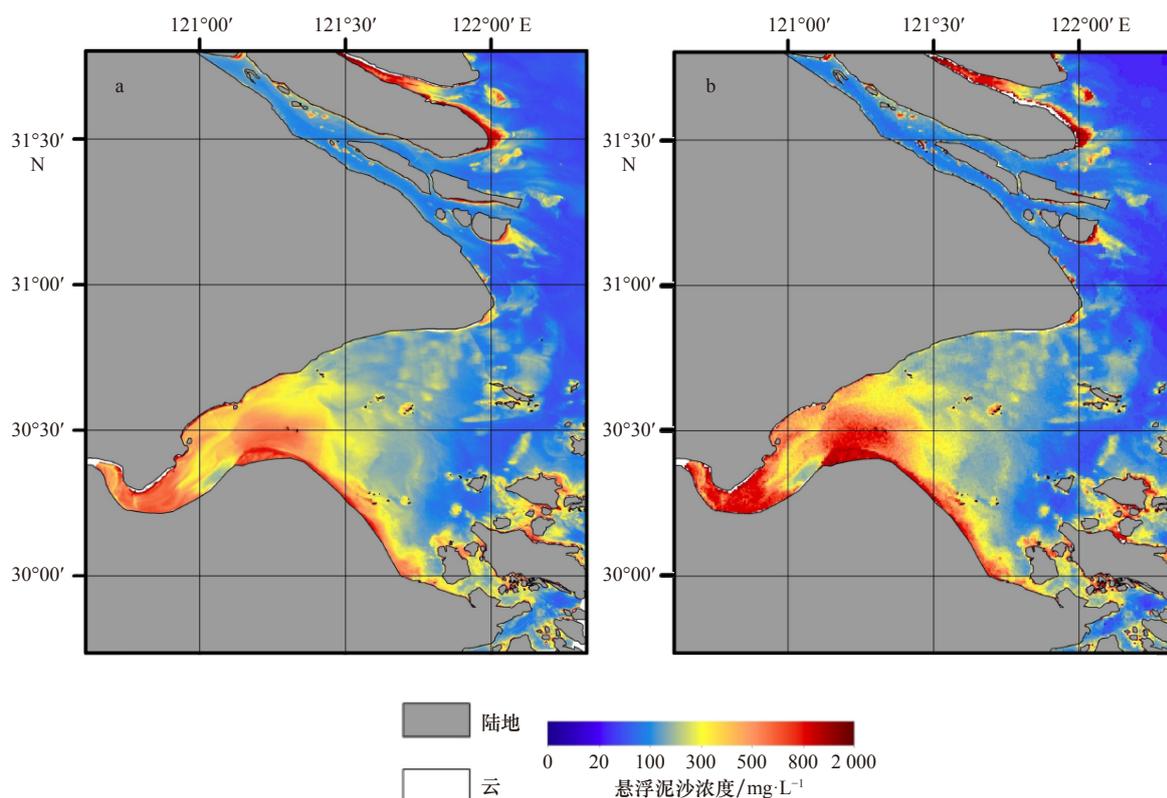


图4 GF-4(a)和GOCI(b)卫星反演悬浮泥沙浓度结果

Fig. 4 Inversion results of suspended sediment concentration retrieved by GF-4 satellite (a) and GOCI satellite (b)

表4 杭州湾悬浮泥沙反演结果 (单位: mg/L)

Table 4 Inversion results of suspended sediment concentration in the Hangzhou Bay (unit: mg/L)

传感器	最大值	最小值	平均值
GF-4卫星	1 248.8	54.9	171.8
GOCI卫星	1 905.9	23.5	256.8

为 171.8 mg/L。在两景影像 SSC 均值上, GOCI 卫星影像的反演结果较高, 由于在低值区域, GF-4 和 GOCI 卫星的悬浮泥沙浓度接近, 在高值区, GOCI 卫星的悬浮泥沙浓度远高于 GF-4 卫星, 因此悬浮泥沙平均值的差异可能是由于高值区 GOCI 卫星反演浓度较高导致的。

3.3 星星交叉区域对比

研究表明, 杭州湾内动能从湾口至湾顶先减小后增大, 水动力条件的不同导致悬浮泥沙的浓度有较大差异^[31]。为更好地比较 GOCI 和 GF-4 卫星在不同水动力条件下的悬浮泥沙反演效果, 在影像中选取 4 个实验区域进行对比(图 5), 其中区域 A 位于湾顶, 水流流速较快, 再悬浮能力较强; 区域 B 靠近杭州湾南岸, 水流流速较慢, 水深较浅; 区域 C、区域 D 位于湾口的主要潮汐通道上, 受水动力条件差异的影响,

C 区域表现为以冲刷作用为主, 而 D 区域则表现为淤积^[32]。

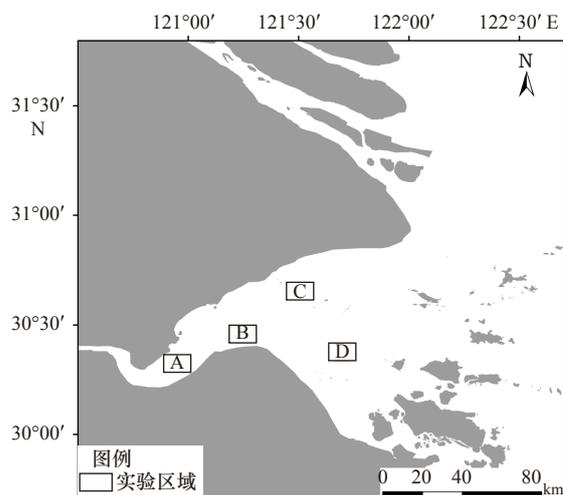


图5 悬浮泥沙浓度反演的4个实验区域

Fig. 5 Four experimental regions for inversion of suspended sediment concentration

4 个实验区域 SSC 空间分布特征如图 6 所示(具体数值见表 5), 由图可知, 4 个区域均表现为 GOCI 卫星影像反演的 SSC 数值较高。在远离湾顶的区域 C、区域 D, 反演 SSC 数值基本一致, 且两者反演的 SSC 数值相对较低。在 SSC 略高的湾顶区域 A, GF-4

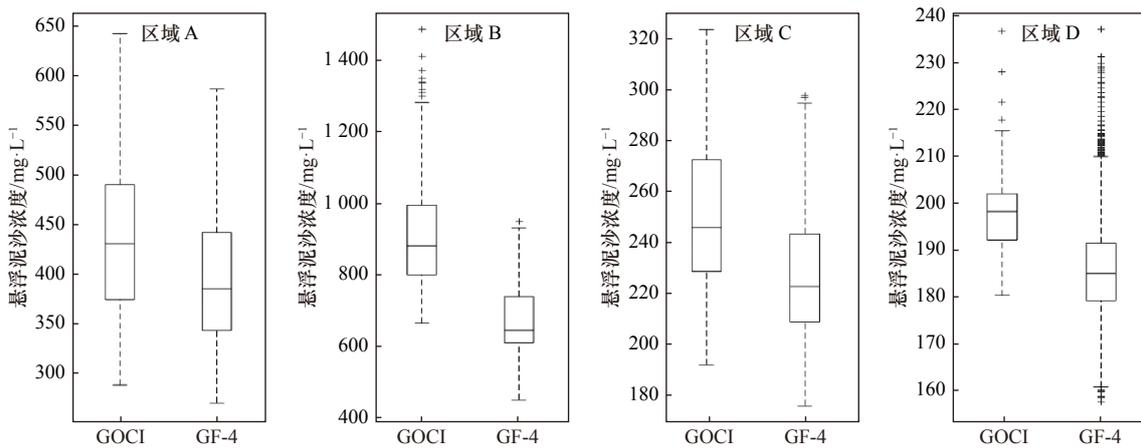


图 6 反演得到的 4 个实验区域的悬浮泥沙浓度箱线图

Fig. 6 Box-plot of suspended sediment concentration in four experimental regions

表 5 杭州湾实验区域悬浮泥沙浓度 (单位: mg/L)

Table 5 Suspended sediment concentration of experimental regions in the Hangzhou Bay (unit: mg/L)

传感器	区域A			区域B			区域C			区域D		
	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值
GF-4卫星	297.3	703.3	490.5	439.5	939.3	663.4	176.8	297.1	227.9	157.3	236.5	185.9
GOCI卫星	358.3	794.0	577.7	654.4	1465.2	937.1	192.8	322.6	251.7	179.9	236.1	197.8

表 6 大气校正后 GF-4 卫星相对 GOCI 卫星反演的悬浮泥沙浓度平均误差

Table 6 Average error of suspended sediment concentration retrieved by GF-4 satellite relative to GOCI satellite after atmospheric correction

SSC浓度/mg·L ⁻¹	GF-4 B5相对GOCI B8/%	GF-4 B4相对GOCI B6/%	GF-4 B5、B4相对GOCI B8、B6/%
<500	18.4	-1.0	23.8
500~1 000	9.0	-1.6	11.8
>1 000	5.1	-1.6	7.1

卫星反演的 SSC 结果略低于 GOCI 卫星。而在 SSC 最高的区域 B, GOCI 卫星反演的 SSC 数值明显高于 GF-4 卫星。

综上,在 SSC 较低的水域,两者反演的结果差异较小,在高 SSC 区域,两者反演的结果差异增大,且 GOCI 卫星的反演结果高于 GF-4 卫星。一方面,两种反演模型均为底数大于 1 的指数模型,其一阶导数随着自变量的增加而增大,表现为在高值区两种数据源反演的 SSC 差异增大。另一方面,计算 GF-4 卫星与 GOCI 卫星的近红外和红波段大气校正后的相对误差(表 6),由表 6 可知,GF-4 卫星平均反射率高 15%,且主要来源于浓度低于 500 mg/L 的区域。根据反演结果可知,浓度低于 500 mg/L,GF-4 卫星结果比 GOCI 卫星高 26%,而当水体悬浮泥沙浓度为 500~1 000 mg/L,GF-4 卫星结果较 GOCI 卫星高 11.8%,当浓度大于

1 000 mg/L,GF-4 卫星结果仅高 6.7%。结合模型拟合原理,当 GF-4 卫星第 5 波段在 SSC 较低的区域大气校正结果相对偏差较大,而该区域占杭州湾总体比重较高,模型将尽可能还原水域面积较大的低 SSC 水体的真实情况,在此过程中,模型在高值区误差会有所扩大,这也是两种卫星在高 SSC 水体反演中差异较大的原因。GF-4 卫星的大气校正结果精度在一定程度上影响了反演结果的比对,此外,GOCI 卫星的校正也对交叉检验结果有一定影响。李军等^[31]指出由于 GOCI 卫星大气校正算法在高浑浊水体的精度不足,近红外波段的离水辐亮度精确不足,导致 MODIS 与 GOCI 卫星的遥感反射率差异会随着水体浑浊度的增大而增大。尽管 GF-4 和 GOCI 卫星的大气校正均采用了目前较为主流的算法,但是两种算法也存在一定不足,考虑为造成杭州湾高 SSC 水体反演结果差异的主要原因。

4 结论

GF-4 卫星具有高时间和高空间分辨率的特点, 可以实现对水质指示因子悬浮泥沙的动态监测。本研究通过对杭州湾的实测悬浮泥沙数据、光谱数据以及 GF-4 卫星影像的分析, 得到以下结论:

(1) 通过实测数据构建基于 GF-4 卫星数据的悬浮泥沙反演模型, 该指数模型的 MRE 为 17.2%, RMSE 为 223.2 mg/L, 反演精度较高。

(2) 利用 GOCI 卫星影像反演的 SSC 结果进行交叉验证, 分析两景影像杭州湾 SSC 的空间分布情况, 并以此来验证 GF-4 卫星在悬浮泥沙遥感监测精度。结果表明, 在 SSC 较低的水域, 两种数据源的反演结果差异较小, 但在高 SSC 区的差异随浓度增高而增大, 该误差考虑来源于大气校正。

(3) 通过与 GOCI 卫星的对比, 研究表明 GF-4 卫星可以应用于近海二类水体的悬浮泥沙监测, 其结果基本满足应用需求。

参考文献:

- [1] 姜丽君. 基于遥感反演的近20 a莱州湾表层悬浮泥沙和叶绿素a时空变化研究[D]. 烟台: 鲁东大学, 2018.
Jiang Lijun. Temporal and spatial variations of suspended sediment and chlorophyll-a in Laizhou Bay in recent 20 years based on remote sensing inversion[D]. Yantai: Ludong University, 2018.
- [2] 沈宏. 多源卫星数据的光谱带宽和空间尺度对水色参数遥感的影响[D]. 上海: 华东师范大学, 2012.
Shen Hong. Effect of spectral bandwidth and spatial scale of mul-sensors data on remote sensing of ocean color[D]. Shanghai: East China Normal University, 2012.
- [3] 陈勇, 韩震, 杨丽君, 等. 长江口水体表层悬浮泥沙时空分布对环境演变的响应[J]. 海洋学报, 2012, 34(1): 145-152.
Chen Yong, Han Zhen, Yang Lijun, et al. The spatial and temporal distribution of suspended sediment concentration and its response to environmental change in the Changjiang Estuary[J]. Haiyang Xuebao, 2012, 34(1): 145-152.
- [4] 刘艳霞, 黄海军, 杨晓阳. 基于遥感反演的莱州湾悬沙分布及其沉积动力分析[J]. 海洋学报, 2013, 35(6): 43-53.
Liu Yanxia, Huang Haijun, Yang Xiaoyang. The transportation and deposition of suspended sediment and its dynamic mechanism analysis based on Landsat images in the Laizhou Bay[J]. Haiyang Xuebao, 2013, 35(6): 43-53.
- [5] Yu Shengyan, Mantravadi V S. Study on distribution characteristics of suspended sediment in Yellow River estuary based on remote sensing[J]. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2019, 47(9): 1507-1513.
- [6] Lu Cuizhuo, Li Huan, Dai Weiqi, et al. 3-D simulation of the suspended sediment transport in the Jiao Jiang Estuary: Based on validating by remote sensing retrieval[J]. *Journal of Coastal Research*, 2018(85): 116-120.
- [7] Li Yangdong, Li Xiaofeng. Remote sensing observations and numerical studies of a super typhoon-induced suspended sediment concentration variation in the East China Sea[J]. *Ocean Modelling*, 2016, 104: 187-202.
- [8] 李珏. 高分四号影像水体提取算法比较分析[J]. 黑龙江科技信息, 2016(29): 110.
Li Jue. Comparison and analysis of water extraction algorithms in GF-4 image[J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2016(29): 110.
- [9] 刘明, 吴玮, 舒阳, 等. 基于“高分四号”卫星数据的水体提取效果评价[J]. 航天返回与遥感, 2016, 37(4): 96-101.
Liu Ming, Wu Wei, Shu Yang, et al. Evaluation of water extraction based on GF-4 satellite data[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2016, 37(4): 96-101.
- [10] 宋挺, 龚绍琦, 刘军志, 等. 浑浊二类水体的高分四号卫星大气校正效果分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(4): 1191-1197.
Song Ting, Gong Shaoqi, Liu Junzhi, et al. Performance assessment of atmospheric correction for multispectral data of GF-4 on inland case II turbid water[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2018, 38(4): 1191-1197.
- [11] 陈晓英, 张杰, 崔廷伟, 等. 基于高分四号卫星的黄海绿潮漂移速度提取研究[J]. 海洋学报, 2018, 40(1): 29-38.
Chen Xiaoying, Zhang Jie, Cui Tingwei, et al. Extraction of the green tide drift velocity in the Yellow Sea based on GF-4[J]. Haiyang Xuebao, 2018, 40(1): 29-38.
- [12] 胡耀躲, 张运林, 杨波, 等. 基于高频次GOCI数据的太湖悬浮物浓度短期动态和驱动力分析[J]. 湖泊科学, 2018, 30(4): 992-1003.
Hu Yaoduo, Zhang Yunlin, Yang Bo, et al. Short-term dynamics and driving factors of total suspended matter concentration in Lake Taihu using high frequent geostationary ocean color imager data[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, 30(4): 992-1003.
- [13] 伍高燕. 基于GOCI遥感影像的长江入海口悬浮泥沙浓度反演及其时空动态分析[D]. 西安: 长安大学, 2015.
Wu Gaoyan. Retrieval of suspended sediment concentration in the Yangtze Estuary and its spatiotemporal dynamics analysis based on GOCI image data[D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.
- [14] 刘波, 程乾, 曾焕建, 等. 基于GOCI数据的杭州湾跨海大桥两侧水域悬浮泥沙浓度空间分异规律研究[J]. 杭州师范大学学报: 自然科学版, 2016, 15(1): 102-107.
Liu Bo, Cheng Qian, Zeng Huanjian, et al. On the suspended sediment concentration distribution and diversity of the waters on both sides of Hangzhou Bay Sea-crossing bridge based on GOCI data[J]. *Journal of Hangzhou Normal University: Natural Science Edition*, 2016, 15(1): 102-107.
- [15] 杨雪飞. 基于GOCI和数值模拟的东海近岸悬浮泥沙浓度逐时变化研究[D]. 上海: 中国科学院大学, 2016.

- Yang Xuefei. Diurnal variation of suspended sediment concentration coupled GOCI and numerical simulation in coastal waters of the East China Sea[D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences, 2016.
- [16] 江彬彬, 张霄宇, 杜泳, 等. 基于GOCI的近岸高浓度悬浮泥沙遥感反演——以杭州湾及邻近海域为例[J]. 浙江大学学报: 理学版, 2015, 42(2): 220–227.
- Jiang Binbin, Zhang Xiaoyu, Du Yong, et al. Retrieving high concentration of suspended sediments based on GOCI: An example from coastal water around Hangzhou Bay, China[J]. Journal of Zhejiang University: Science Edition, 2015, 42(2): 220–227.
- [17] Lamquin N, Mazeran C, Doxaran D, et al. Assessment of GOCI radiometric products using MERIS, MODIS and field measurements[J]. *Ocean Science Journal*, 2012, 47(3): 287–311.
- [18] 孙璐, 蒋锦刚, 朱渭宁. 基于GOCI影像的长江口及其邻近海域CDOM遥感反演及其日内变化研究[J]. 海洋学报, 2017, 39(9): 133–145.
- Sun Lu, Jiang Jin'gang, Zhu Weining. Remote sensing inversion and daily variation of CDOM based on GOCI in the Changjiang Estuary and adjacent waters[J]. *Haiyang Xuebao*, 2017, 39(9): 133–145.
- [19] 陶建峰, 蒯宇, 康彦彦, 等. 杭州湾及甬江口外海域悬沙时空动态研究[C]//第十八届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(下). 北京: 海洋出版社, 2017: 370–374.
- Tao Jianfeng, Kuai Yu, Kang Yanyan, et al. Temporal and spatial dynamics of suspended sediment in Hangzhou Bay and Yongjiang Estuary[C]//Proceedings of the 18th China Ocean (Shore) Engineering Symposium (Part 2). Beijing: China Ocean Press, 2017: 370–374.
- [20] 朱为静. 杭州湾河口悬浮颗粒物介导的硝化—反硝化耦合过程微生物机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- Zhu Weijing. Microbial mechanism of coupled nitrification-denitrification mediated by suspended particulate matter in Hangzhou Bay estuary[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [21] 王飞, 王珊珊, 王新, 等. 杭州湾悬浮泥沙遥感反演与变化动力分析[J]. 华中师范大学学报: 自然科学版, 2014, 48(1): 112–116, 135.
- Wang Fei, Wang Shanshan, Wang Xin, et al. Remote sensing retrieval and dynamic driving force analysis of suspended sediment in Hangzhou Bay[J]. Journal of Huazhong Normal University: Natural Sciences, 2014, 48(1): 112–116, 135.
- [22] 王繁, 周斌, 徐建明, 等. 基于实测光谱的杭州湾悬浮物浓度遥感反演模式[J]. *环境科学*, 2008, 29(11): 3022–3026.
- Wang Fan, Zhou Bin, Xu Jianming, et al. Remote sensing inversion mode of suspended particles concentration in Hangzhou Bay based on *in situ* measurement spectrum[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(11): 3022–3026.
- [23] 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.
- [24] 周虹丽, 朱建华, 韩冰, 等. 重量法测量悬浮物浓度关键技术研究[J]. *海洋技术*, 2004, 23(3): 15–20.
- Zhou Hongli, Zhu Jianhua, Han Bing, et al. Research on the key technique of the analysis of suspended matter by weighting method[J]. *Ocean Technology*, 2004, 23(3): 15–20.
- [25] Pan Yanqun, Shen Fang, Verhoef W. An improved spectral optimization algorithm for atmospheric correction over turbid coastal waters: A case study from the Changjiang (Yangtze) Estuary and the adjacent coast[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 191: 197–214.
- [26] 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.
- [27] 陈瑞瑞, 蒋雪中. 长江河口悬浮泥沙向浙闽沿岸运输近期变化的遥感分析[J]. *海洋科学*, 2017, 41(3): 89–101.
- Chen Ruirui, Jiang Xuezhong. Analysis of suspended sediment variations from the Yangtze Estuary to Zhejiang-Fujian Provincial coastal waters using remotely sensed data[J]. *Marine Sciences*, 2017, 41(3): 89–101.
- [28] 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.
- [29] 张芸, 张鹰, 王晶晶. 悬浮泥沙浓度遥感反演模型研究[J]. *海洋科学*, 2008, 32(5): 32–35, 56.
- Zhang Yun, Zhang Ying, Wang Jingjing. Analysis on the sensing model of suspended sediment concentrations[J]. *Marine Sciences*, 2008, 32(5): 32–35, 56.
- [30] Hu Yuekai, Yu Zhifeng, Zhou Bin, et al. Tidal-driven variation of suspended sediment in Hangzhou Bay based on GOCI data[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2019, 82: 101920.
- [31] 叶涛焱. 杭州湾多时空尺度悬沙动力变化特征及与潮滩变化的互馈机理[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- Ye Taoyan. The multi-scale variations of suspended sediment dynamics in Hangzhou Bay and its interaction with tidal flat variations[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [32] 谢东风, 潘存鸿, 曹颖, 等. 近50 a来杭州湾冲淤变化规律与机制研究[J]. *海洋学报*, 2013, 35(4): 121–128.
- Xie Dongfeng, Pan Cunhong, Cao Ying, et al. Decadal variations in the erosion/deposition pattern of the Hangzhou Bay and their mechanism in recent 50 a[J]. *Haiyang Xuebao*, 2013, 35(4): 121–128.
- [33] 李军, 朱建华, 高飞, 等. MODIS和GOCI卫星遥感反射率产品在浑浊海区交叉检验分析[J]. *海洋技术学报*, 2015, 34(1): 15–20.
- Li Jun, Zhu Jianhua, Gao Fei, et al. Cross-check analysis on MODIS and GOCI satellite remote sensing reflectances in turbid sea areas[J]. *Journal of Ocean Technology*, 2015, 34(1): 15–20.

Remote sensing monitoring of suspended sediment concentration based on GF-4 satellite in the Hangzhou Bay

Shao Yujie^{1,6}, Hu Yuekai², Zhou Bin^{1,6}, Chen Fang³, He Xianqiang⁴,
Wang Guojun⁵, Yuan Xiaohong^{1,6}, Zhou Yali^{1,6}, Yu Zhifeng^{1,5,6}

(1. *Institute of Remote Sensing and Earth Sciences, Hangzhou Normal University, Hangzhou 311121, China*; 2. *State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200241, China*; 3. *State Key Laboratory of Surveying, Mapping and Remote Sensing Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China*; 4. *Fisheries Big Data Center of South China Sea, Zhanjiang 524006, China*; 5. *Laboratory of Target Microwave Properties, Deqing Academy of Satellite Applications, Deqing 313200, China*; 6. *Zhejiang Provincial Key Laboratory of Urban Wetlands and Regional Change, Hangzhou 311121, China*)

Abstract: As an important water quality parameter, the distribution and dynamic change of suspended sediment have a profound impact on the ecology, environment and material circulation of the estuary and the near shore. GF-4 satellite has the ability to observe at any time, can quickly provide a large number of observation data, and has the application potential in water color remote sensing. In order to explore the monitoring effect of GF-4 satellite on suspended sediment in water, takes the Hangzhou Bay as the research area in this paper, constructs suspended sediment concentration inversion model, and uses GOCI satellite to cross verify. The results show that the index model established by using the ratio of remote sensing reflectance of the 5th and 4th band of GF-4 as the remote sensing factor has a high inversion accuracy, with a determination coefficient of 0.92, a root mean square error of 273.6 mg/L and an mean relative error of 17.2%. The cross-validation results show that GF-4 satellite data, as a new remote sensing data source, is similar to the distribution of GOCI satellite inversion suspended sediment concentration in the low concentration region, but the difference increases with the increase of concentration in the high concentration region. The research shows that GF-4 satellite is suitable for high precision inversion in the waters with low suspended sediment concentration and can be applied in most marine areas of China.

Key words: suspended sediment; Hangzhou Bay; GF-4 satellite; GOCI satellite; index model