

文章编号: 1672-8785(2014)04-0031-07

多种卫星传感器反演长江口悬浮 泥沙浓度的对比分析

彭翔翼 沈 芳*

(华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062)

摘 要: 通过用 Shen 等^[1]的方法对 Terra/MODIS、FY-3A/MERSI、COMS/GOCI 传感器入瞳处的辐射亮度即天顶辐射亮度进行反演计算, 得出了遥感反射率 R_{rs} 与悬浮颗粒物 (Suspended Particulate Matter, SPM) 浓度的数据, 并将上述反演与 Envisat/MERIS 反演进行了对比。结果表明, MODIS、MERSI、GOCI 传感器的天顶辐射亮度与 MERIS 的线性相关性均较好; GOCI、MODIS 与 MERIS 的 R_{rs} 一致, MERSI 与 MERIS 的 R_{rs} 相差较大, 尤其在近红外区域。MODIS、MERSI 和 GOCI 反演的 SPM 数据与 MERIS 反演的绝对偏差分别为 36%、31% 和 26%。对于长江口、杭州湾及江苏沿岸的高浊度水体, 3 种传感器反演的 SPM 均与 MERIS 反演的 SPM 相近。对于离岸较远的低浊度水体, 仅 GOCI 能很好地体现。

关键词: FY-3A/MERSI; Terra/MODIS; COMS/GOCI; 河口海岸; 悬浮泥沙浓度; 遥感反演

中图分类号: TP751 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2014.04.006

Comparative Analysis of Suspended Particulate Matter Concentration in Yangtze Estuary Derived by Several Satellite Sensors

PENG Xiang-yi, SHEN Fang

(State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China
Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract: Inverse calculation of top-of-atmosphere (TOA) radiation at the pupils of sensors onboard Terra/MODIS, FY-3A/MERSI, COMS/GOCI is carried out by using the method of Shen et al. The data on remote sensing reflectance (R_{rs}) and suspended particulate matter (SPM) concentration are estimated. They are compared with those derived from Envisat/MERIS. The results show that TOA radiation values obtained from MODIS, MERSI and GOCI sensors have a good linear relationship with that of MERIS. The R_{rs} values obtained from GOCI and MODIS are consistent with that obtained from MERIS. The R_{rs} value obtained from MERSI is quite different from that obtained from MERIS, particularly in the near infrared region. The absolute deviations of the SPM inverted by MODIS, MERSI

收稿日期: 2014-03-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41271375); 教育部博士点基金项目 (20120076110009); 河口海岸学国家重点实验室科研业务项目 (2012KYYW02)

作者简介: 彭翔翼 (1990-), 男, 江西新余人, 硕士研究生, 主要研究方向为河口海岸遥感与地理信息系统。

E-mail: lankeypeng@me.com * 通讯作者: E-mail: fshen@sklec.ecnu.edu.cn

and GOCI from that inverted by MERIS are 36%, 31% and 26% respectively. For the high turbid water around Tangtze Estury, Hangzhou Bay and Jiangsu coast, the SPM values inverted by above three sensors are all close to that inverted by MERIS. For the low turbidity water far from coast, only the data inverted by GOCI perform well.

Key words: FY-3A/MERSI; Terra/MODIS; COMS/GOCI; estuary and coast; suspended particulate matter; remote sensing inversion

0 引言

水色遥感能在大尺度甚至全球范围内提供重要的海洋信息,这是常规调查所不能替代的。SeaWiFS、MODIS 和 MERIS 等传感器的水色产品已经被成功地应用到了多个海洋学领域,如海洋初级生产力的估算、悬浮颗粒物动力学、赤潮监测以及物理海洋学。开阔大洋及海岸带海域卫星产品的计算和真实性检验对水色任务至关重要^[1,2]。科学家们对不同卫星不同海域的水色产品进行了大量真实性检验,包括 SeaWiFS、MODIS、MERIS 和 GOCI 等^[3-5]。然而,由于受河口海岸光学复杂二类水体大气校正算法和反演模型的限制,上述多个传感器的水色产品并不完全适用于长江口。

针对长江口,Shen 等^[1]通过用基于查找表的方法进行大气校正获取了遥感反射率(R_{rs}),并研制了一个基于半经验辐射传输模型的悬沙遥感反演算法,用于 Envisat/MERIS 悬沙浓度的反演。真实性检验结果表明,该方法具有较高的精度和可行性^[6]。本文以长江口光学复杂二类水体为例,采用 4 个卫星传感器 Terra/MODIS、FY-3A/MERSI、COMS/GOCI、Envisat/MERIS 的准同步数据,利用 Shen 等^[1]的方法进行悬沙反演;再将传感器入瞳处的辐射亮度(天顶辐射亮度)、离水辐射反射率(遥感反射率)和 SPM 的结果进行对比分析。目的在于检验 Shen 等方法对多传感器卫星反演的适用性和兼容性,检验多传感器反演悬沙浓度产品的一致性,增加本区域卫星的访问频率,弥补离轨卫星观测中断的损失。

1 研究区域

自 1979 年,以徐六泾为起点长约 167 km 的长江口分为南支和北支两段,其水体常年为黄

色,呈现高悬沙、高浊度的特征,是典型的河口海岸二类水体。

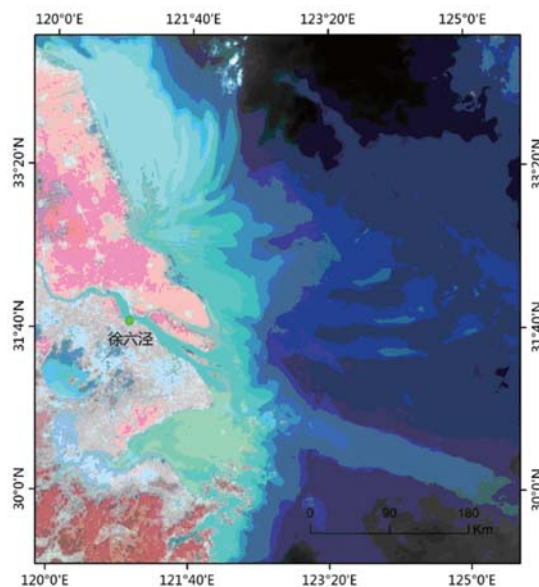


图 1 2012 年 3 月 26 日长江口的 GOCI 假彩色影像

2 数据和方法

2.1 卫星数据

本文使用的数据来自近极地太阳同步轨道的 Envisat/MERIS、Terra/MODIS、FY-3A/MERSI 以及静止轨道的 COMS/GOCI 卫星传感器。2012 年 3 月 26 日(图 1)天空较为晴朗,4 种卫星传感器各记录了一幅图像。由于 MODIS L1B 的 1 km 空间分辨率产品的多个水色波段在长江口及周边海域均出现信号饱和现象,故本文采用的是 250 m 分辨率产品。

Envisat/MERIS、Terra/MODIS 和 FY-3A/MERSI 传感器记录的极轨卫星过境时间(GMT+8)分别为 10:31am、11:00am 和 9:55am;静止轨道卫星传感器 COMS/GOCI 一日成 8 幅像^[7],扫描

范围以朝鲜半岛为中心, 覆盖中国东部沿海直至台湾海峡。本文选用扫描时间中点为 10:30am 的影像。因此, 所有卫星数据的时间窗口不超过 1 小时。

MERIS、MODIS、MERSI 和 GOCI 数据分别由欧空局、美国国家航空航天局、中国国家卫星气象中心和韩国海洋卫星中心提供; 进行对比的各个卫星的水色产品包括天顶辐射亮度、遥感反射率 R_{rs} 和悬沙浓度。表 1 为各传感器部分波段的参数对比^[7-9]。

本文以 MERIS 为参考, 对各传感器悬沙反演的特征波段等进行对比分析。由于 MERIS 中并无与 565 nm、685 nm、765 nm(MERSI), 645 nm、858nm(MODIS) 以及 555 nm、660 nm、745 nm(GOCI) 完全对应的波段, 故采用邻近波段代替, 即采用 560 nm、680 nm、760 nm(MERSI), 665 nm、865 nm(MODIS) 以及 560 nm、665 nm、754 nm(GOCI)。MERSI、MERIS 和 GOCI 的波段带宽均不大于 20 nm, 其中心波长差异对反射率的影响甚微^[10], MODIS 250 m 两个通道带宽亦在 50 nm 以内。

表 1 各传感器有关技术参数

卫星 / 传感器	中心波长 (nm)	波段宽度 (nm)	空间分 辨率 (m)
Envisat/MERIS	560	10	1200
	665	10	
	680	7.5	
	754	7.5	
	760	3.75	
	778	7.5	
FY-3A/MERSI	865	7.5	1000
	565	20	
	685	20	
Terra/MODIS	765	20	250
	645	50	
	858	35	
COMS/GOCI	745	20	500
	660	20	
	555	20	

2.2 数据处理方法

MERIS L1B 产品的天顶辐射亮度数据可用 BEAM 软件读取: MERSI L1 产品是以 .hdf 为后缀的 HDF5 格式文件, MODIS L1B 产品是以 .hdf 为后缀的 HDF4 格式文件, GOCI 数据是以 .he5 为后缀的 HDF5 格式文件。在 IDL 平台下, 对 3 个传感器的 HDF4/HDF5 格式文件进行 DN 值调整恢复和辐射定标等预处理, 得到各波段的大气顶层反射率和天顶辐射亮度数据^[11,12]。再利用 Shen 等^[1]的方法对各传感器的天顶辐射亮度数据进行计算, 得到 R_{rs} 和 SPM。

对不同传感器进行对比分析需要准确的地理信息。MERIS L1B 文件中包含了定位数据; MERSI L1B 文件中的定位数据与 MERIS 的相差较大, 需要进行图像配准; MODIS 产品的定位数据需要从相应的 MOD03 文件中读取, 由原始尺寸 1354×2030 用双线性插值法得到与 250 m 产品相匹配的 5416×8120 的定位数据; GOCI 搭载于静止轨道卫星上, 任意景的定位数据均相同, 文件由 KOSC 提供。由于各传感器数据的地面分辨率不相同, 对比分析时以 MERIS 1200 m 数据为基准, 利用最邻近像元法对其他传感器数据进行重采样。

对比分析所采用的偏差统计参数包括均方根偏差 (Root mean square deviation, RMS)、相关系数 R^2 、绝对偏差百分比 (Absolute deviation percentage, APD) 平均值、相对偏差百分比 (Relative percentage deviation, RPD) 平均值、MERSI、MODIS、GOCI 数据与 MERIS 数据之比的中值 MRatio。计算方法如下:

$$APD = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|y_i - x_i|}{x_i} \times 100\% \quad (1)$$

$$RPD = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{y_i - x_i}{x_i} \times 100\% \quad (2)$$

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2}{N}} \quad (3)$$

式中, y_i 为 MERSI 或 MODIS 的卫星数据值, x_i 为 MERIS, N 是有效像元数量。计算有效像

元的准则为: 遥感反射率 R_{rs} 大于 0 且小于 1, SPM 浓度在 0 至 3 g/L 之间, 其余均视为异常点。

3 结果分析与讨论

本文采用并处理了 2009 年 5 月 11 日和 2012 年 3 月 26 日两天内总计 7 景卫星数据。限于篇幅, 仅列举了 2012 年 3 月 26 日的对比结果, 2009 年 5 月 11 日 3 景所有波段对比散点图的趋势与 2012 年 3 月 26 日大致相同。

3.1 天顶辐射亮度的对比分析

对于海洋水色遥感, 天顶辐射亮度是传感器直接接收到的海水信号的强度, 包含了大气贡献值。图 2 为 MERSI、MODIS 和 GOCI 天顶辐射亮度在各个波段与 MERIS 的对比散点图, 图中给出了各个波段的线性拟合结果。表 2 为对应的偏差统计信息, 包括 APD、RPD、RMS、MERSI 与 MODIS 与 GOCI 与 MERIS 之比的中值 MRatio。

由图 2 可知, MERSI 与 MERIS 的天顶辐射亮度在 765 nm、685 nm、565 nm 波长处的线性相关性非常好。在 565 nm 和 685 nm 波长处, MERSI 的天顶辐射亮度均较 MERIS 低, 而在 765 nm 处偏高。在 565 nm 和 685 nm 处, MERSI 天顶辐射亮度的 APD 在 30% 左右, 在 765 nm 处则高达 75%。在 685 nm 和 565 nm 波长处, MERSI 天顶辐射亮度的 RMS 自 18.03 逐渐减小至 8.29。

MODIS 与 MERIS 的天顶辐射亮度在 645 nm 和 858 nm 处也具有良好的线性相关性, 相关系数分别为 0.962 和 0.905, 但与 MERSI 和 MERIS 相比稍逊, 尤其是在 858 nm 波长处。MODIS 在 645 nm 和 858 nm 波长处的天顶辐射亮度整体上较 MERIS 均有所高估, 但 APD 不超过 35%, 两者的 RMS 分别为 11.66 和 6.0, MRatio 分别为 1.23 和 1.32。

GOCI 与 MERIS 的天顶辐射亮度在 745 nm、660 nm 和 555 nm 波长处的相关系数分别为 0.972、0.983 和 0.960, 结果总体上优于 MODIS, 劣于 MERSI。GOCI 的天顶辐射亮度

在所有波段较 MERIS 的均有所高估, 但 APD 仅为 12% 至 20%, MRatio 为 1.10 至 1.19。除 555 nm 波长的 RMS 外, GOCI 与 MERIS 的所有偏差数据均比 MODIS 的低。

综上, 除 MERSI 的天顶辐射亮度总体偏差较大外, 其余传感器均与 MERIS 一致, 尤其是 GOCI。造成 MERSI 与 MERIS 的天顶辐射亮度差异较大的原因可能是仪器的观测误差和传感器辐射定标误差。

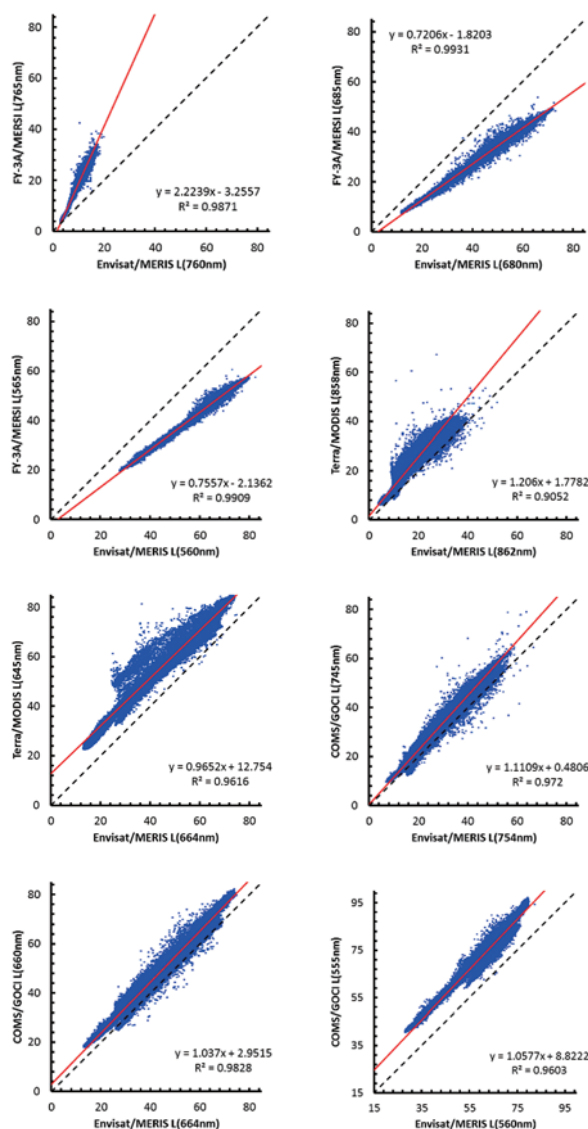


图 2 MERSI、MODIS、GOCI 各波段天顶辐射亮度 L ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$) 与 MERIS 的对比散点图, 红色实线为线性拟合线, 黑色虚线为 1:1 线, 附拟合公式, R^2 为相关系数。

表 2 MERSI、MODIS、GOCI 传感器入瞳处在各波长的辐射亮度与 MERIS 的偏差统计信息

传感器	波段 (nm)	APD	RPD	RMS($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$)	MRatio
MERSI	765	75%	75%	8.29	1.80
	685	33%	-33%	15.08	0.68
	565	28%	-28%	18.03	0.72
MODIS	858	35%	34%	6.00	1.32
	645	30%	30%	11.66	1.23
GOCI	745	15%	14%	4.38	1.13
	660	12%	12%	5.32	1.10
	555	20%	20%	12.77	1.19

3.2 遥感反射率的对比分析

表 3 MERSI、MODIS、GOCI 各波段的 R_{rs} 与 MERIS 的偏差统计信息

传感器	波段 (nm)	APD	RPD	RMS (sr^{-1})	MRatio	N
MERSI	765	218%	218%	0.0131	1.80	28947
	685	48%	-48%	0.0141	0.57	34186
	565	56%	-56%	0.0145	0.48	42388
MODIS	858	119%	101%	0.01	1.19	29920
	645	35%	27%	0.0044	1.07	39728
	745	40%	25%	0.0025	1.01	32828
GOCI	660	26%	16%	0.0024	0.99	41106
	555	19%	12%	0.0021	1.00	45606

遥感反射率 R_{rs} 由天顶辐射亮度经过大气校正计算得到, 以消除大气贡献。图 3 为 MERSI、MODIS、GOCI 与 MERIS 的 R_{rs} 对比散点图, 表 3 为偏差统计数据。由散点图可见, MERSI 与 MERIS 水面信号的线性相关保持良好, 其所有波段的 R_{rs} 的相关系数 R^2 均不低于 0.96。细节上, MERSI 在 565 nm 和 685 nm 波长处的 R_{rs} 整体偏低, 而在 765 nm 波长处仍然偏高; MODIS 与 GOCI 经过大气校正后, 信号均有改善。

进一步分析表 3 的偏差统计信息, MERSI 所有波段的 R_{rs} 的 RMS 均在 0.14 左右, APD 均大于 40%。其中, 765 nm 波长的 APD 高达 218%。MERSI 与 MERIS 的 R_{rs} 在所有波段 MRatio 均不接近 1; MODIS 在 645 nm 波长处

的 R_{rs} 的 APD 为 35%, 小于所有 MERSI 波段的 APD, 但在 858 nm 红外波长处的 APD 高达 119%。整体上, MODIS 的 R_{rs} 优于 MERSI 的 R_{rs} ; GOCI 在 555 nm、660 nm、745 nm 波长处的 R_{rs} 的 APD 分别为 19%、26%、40%, RMS 为 0.0021、0.0024 和 0.0025。GOCI 所有波段的 R_{rs} 的 MRatio 均十分接近 1。综上, 对于 R_{rs} , GOCI、MODIS 与 MERIS 具有较好的一致性, MERSI 与 MERIS 则具有较大的差异, 尤其在近红外区。

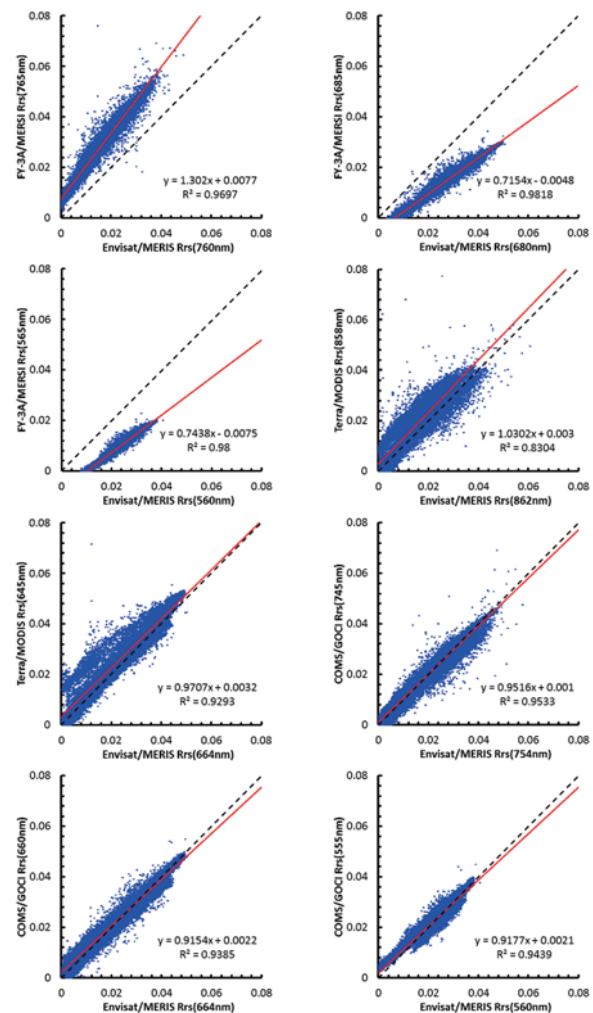


图 3 MERSI、MODIS、GOCI 各波段的遥感反射率 (sr^{-1}) 与 MERIS 的对比散点图红色实线为线性拟合线, 黑色虚线为 1:1 线, 附拟合公式, R^2 为相关系数。

3.3 悬沙浓度的对比分析

SPM 浓度由 R_{rs} 计算得出。图 5 为 MERSI、

MODIS、GOCI 反演的 SPM 与 MERIS 的散点图, 图 4 为 3 种传感器分别反演的 SPM 在长江口及周边海域的分布图, 表 4 为偏差统计信息。散点图中, 3 种传感器反演的 SPM 与 MERIS 的反演值均具有较好的线性相关性。相比之下, MODIS 和 GOCI 的 SPM 反演结果略优于 MERIS, 前两者的 R^2 分别为 0.892、0.872, 后者的为 0.7802。MERIS 与 MERIS 反演的 SPM 的 APD 为 31%, RPD 为 10%, RMS 为 0.2021 g/L, MRatio 为 1。由此可知, MERIS 反演的 SPM 较 MERIS 的反演值整体略有偏高; MODIS 反演的 SPM 的 APD 为 36%, RPD 为 -12%, Mratio 为 0.88, 说明 MODIS 反演的 SPM 整体较 MERIS 的反演值偏低; GOCI 反演的 SPM 与 MERIS 的反演值仍然最为接近, APD 为 26%, RPD 为 2%。

表 4 MERIS、MODIS、GOCI 反演的 SPM 与 MERIS 的偏差统计信息

传感器	APD	RPD	RMS(g/L)	MRatio	N
MERSI	31%	10%	0.2021	1.00	26054
MODIS	36%	-12%	0.1108	0.88	40112
GOCI	26%	2%	0.12	0.91	43076

由分析 MERIS 与 MERSI 真彩色影像(文中未给出)、太阳及传感器的天顶角和方位角可知,

这两个传感器在东经 124° 以东和北纬 32° 以南部分区域受太阳耀斑的影响(图中已掩膜), 不纳入有效像元, 而 MODIS 和 GOCI 均未受影响(GOCI 因传感器方位角和天顶角的设置, 受到耀斑的影响很小^[13])。另外, 所有传感器反演的 SPM 影像中, 长江口南支以东部分均有薄云条带(即被掩膜)。

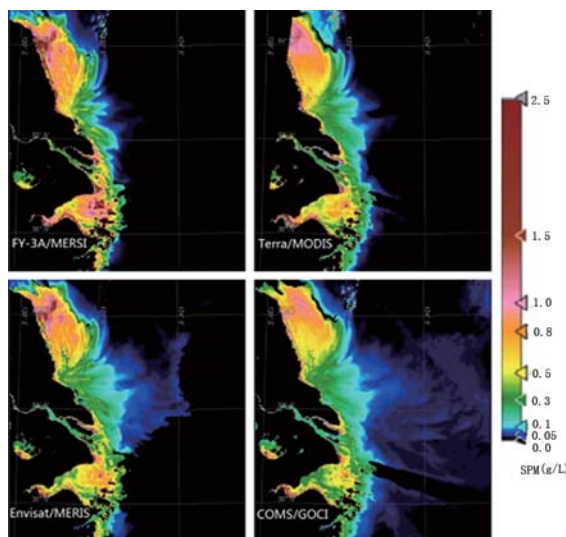


图 4 各传感器反演 SPM 的影像(2012 年 3 月 26 日) 黑色为陆地或被掩膜的无效像元, 如太阳耀斑、薄云

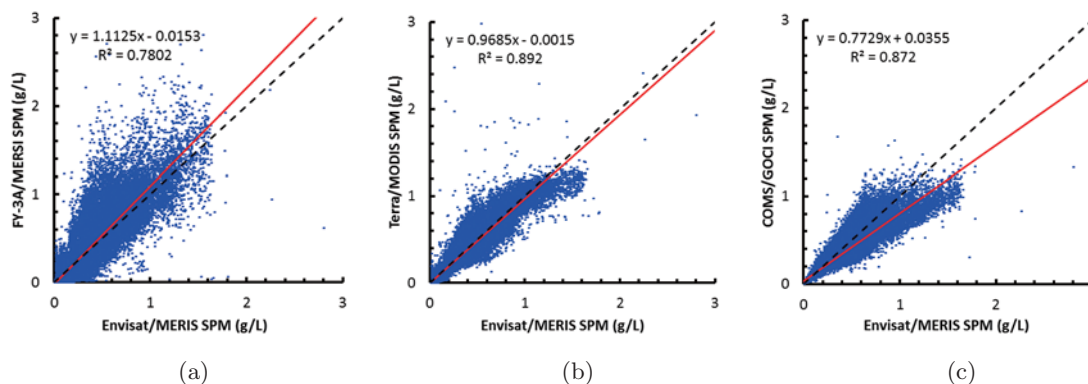


图 5 MERIS、MODIS、GOCI 与 MERIS 反演 SPM 的对比散点图红色实线为线性拟合线, 黑色虚线为 1:1 线, 附拟合公式, R^2 为相关系数

在长江口内, MERSI 和 MODIS 反演的 SPM 值较 MERIS 均略微偏高, 约为 0.3 g/L; 在杭州湾内, MODIS 反演的 SPM 与 MERIS 的较为接近, MERSI 的偏高 0.3 g/L 左右; 而对东经 122

度以东的 123 度左右的低浊度水体, MERSI 和 MODIS 的反演结果均比 MERIS 的偏低。而对这一区域低浊度水体, GOCI 的反演可得到很好的体现(由于未受到太阳耀斑的影响, 可反演出更

大面积的低浊度水体的 SPM)。究其原因,是因为泥沙反演模型中,短波长的可见光波段对低浓度的悬沙更敏感^[14],而 MODIS 250 m 产品恰恰缺少短波,仅有红外和红光两个波段;MERSI 在 685 nm 和 565 nm 波长处的 R_{rs} 比 MERIS 低 50% 左右;GOCI 在 555 nm 波长处的 R_{rs} 与 MERIS 的相差最小。

4 结 论

本文以 Envisat/MERIS 为基准,分析了 Terra/MODIS、FY-3A/MERSI、COMS/GOCI 的天顶辐射亮度、遥感反射率和悬沙浓度:

(1) 对于天顶辐射亮度,MODIS、MERSI、GOCI 与 MERIS 的线性相关性均较高,但总体仍有一定偏差,MODIS 和 MERSI 除在 765 nm 波长处的绝对偏差百分比达 75% 外,其余均为 30% 左右,而 GOCI 在三波段均在 20% 以内。总的来说,MODIS、GOCI 的天顶辐射亮度与 MERIS 的较一致,而 MERSI 则稍差。

(2) 对于遥感反射率,整体上 GOCI、MODIS 与 MERIS 较一致,而 MERSI 与 MERIS 的差异较大。但在近红外波段,MODIS、MERSI 均与 MERIS 有较大的差异,APD 分别达 119% 和 218%。

(3) 对于 SPM,MODIS、MERSI、GOCI 与 MERIS 的 APD 分别为 36%、31%、26%。由此可知,GOCI 反演最接近 MERIS,MODIS 与 MERSI 两者整体上差异不大,尤其对于长江口、杭州湾及江苏沿岸的高浊度水体;但对东经 122 度以东的 123 度左右的低浊度水体,3 种传感器中仅 GOCI 能够较好地表现。主要原因是,根据悬沙反演模型,短波段对低浓度的悬沙更敏感,但 MODIS 的 250 m 产品缺少短波范围,而 MERSI 的短波 (565 nm) 遥感反射率比 MERIS 的偏低 50% 左右。

参考文献

- [1] Shen F, Verhoef W, Zhou Y, 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.
- [2] Hooker S B, McClain C R. The Calibration and Validation of SeaWiFS Data[J]. *Progress in Oceanography*, 2000, **45**(3-4): 427–465.
- [3] 孙凌, 王晓梅, 郭茂华, 等. MODIS 水色产品在黄东海域的真实性检验 [J]. *湖泊科学*, 2009(02): 298–306.
- [4] Cui T, Zhang J, Groom S, et al. Validation of MERIS Ocean-color Products in the Bohai Sea: A Case Study for Turbid Coastal Waters[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, **114**(10): 2326–2336.
- [5] Ruddick K, Vanhellemont Q, Yan J, et al. Variability of Suspended Particulate Matter in the Bohai Sea from the Geostationary Ocean Color Imager (GOCI) [J]. *Ocean Science Journal*, 2012, **47**(3): 331–345.
- [6] 刘小丽, 沈芳, 朱伟健, 等. MERIS 卫星数据定量反演长江河口的悬沙浓度 [J]. *长江流域资源与环境*, 2009, **18**(11): 1026–1030.
- [7] Ryu J, Han H, Cho S, et al. Overview of Geostationary Ocean Color Imager (GOCI) and GOCI Data Processing System (GDPS)[J]. *Ocean Science Journal*, 2012, **47**(3): 223–233.
- [8] 高中灵, 汪小钦, 陈云芝. MERIS 遥感数据特性及应用 [J]. *海洋技术*, 2006, **25**(3): 61–65.
- [9] 黄家洁, 万幼川, 刘良明. MODIS 的特性及其应用 [J]. *地理空间信息*, 2003, **1**(4): 20–23.
- [10] 沈宏, 沈芳. 光谱响应函数和带宽对光学复杂 II 类水体离水辐射反射率的影响 [J]. *红外*, 2012, **33**(4): 31–37.
- [11] 相云. MODIS 1B 资料处理方法研究与软件实现 [D]. 北京: 中国农业大学, 2005.
- [12] 张茂鑫, 李国春. 基于 HDF5 文件格式的 MERSI 影像数据提取的研究与实现 [J]. *现代农业科学*, 2009, **16**(03): 189–191.
- [13] Ahn J, Park Y, Ryu J, et al. Development of Atmospheric Correction Algorithm for Geostationary Ocean Color Imager (GOCI)[J]. *Ocean Science Journal*, 2012, **47**(3): 247–259.
- [14] Shen F, Zhou Y, Li J, et al. Remotely Sensed Variability of the Suspended Sediment Concentration and its Response to Decreased River Discharge in the Yangtze Estuary and Adjacent Coast[J]. *Continental Shelf Research*, 2013, **69**: 52–61.