

文章编号: 1004-8227(2009)11-1026-05

MERIS 卫星数据定量反演长江河口的悬沙浓度

刘小丽, 沈芳*, 朱伟健, 刘曦

(华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062)

摘要: 悬浮泥沙浓度是描述水质的重要参数, 获取其空间和时间上的分布, 有助于水环境监测及泥沙输运观测。首先介绍了欧空局(ESA)发射的 ENVISAT 上携带的中分辨率成像光谱仪(MERIS)基本特点, 其数据较 SeaWiFS、MODIS 在水色波段设置和灵敏度上具有一定优势, 然而在我国高浑浊河口如长江口, MERIS 二级产品如离水辐射率和总悬浮物浓度的反演结果与实测数据有较大的偏差。故直接利用其一级数据即传感器接收到的辐射率, 采用基于辐射传输模型的 MODTRAN 算法进行大气校正以获得水表遥感反射率。应用遥感反射率与悬沙浓度的关系模型, 反演了 2005 年夏季三个寻常潮(7月30日、8月3日、8月9日)悬沙浓度。通过对反演结果与实测数据进行分析, 得出反演偏差可由二级产品 90% 相对误差降低到 53% 左右。最后给出了 2005 年 8 月 15 日、9 月 16 日悬沙浓度分布图, 通过分析得出利用 MERIS 数据反演高浑浊河口悬沙浓度是可行的。

关键词: MERIS; 悬浮泥沙浓度; 遥感反射率

文献标识码: A

悬浮泥沙浓度大小决定了水体的透明度、浑浊度和水色等光学性质, 其分布格局对水质、地貌、生态环境方面的研究以及海岸工程、港口建设等具有重要意义, 它也是分析底质冲淤变化、估算河流入海物质通量和海洋环境的参数之一^[1, 2]。

国内学者对长江口泥沙研究比较多, 对其认识也越来越深刻^[3~5]。据陈沈良、李九发^[3~5]: 徐六泾悬沙浓度可视为长江径流所携带的悬沙浓度本底值, 年平均悬沙浓度仅 0.1289 kg/m^3 ; 徐六泾以下径流作用逐渐减弱, 而潮流作用逐渐增强, 水域悬沙浓度呈不断增加趋势, 口门外悬沙浓度增加到 0.3580 kg/m^3 , 杭州湾则达到 1.5558 kg/m^3 ^[3~4]。

由于长江口悬浮泥沙时空分布随季节、潮汐、风浪以及河流径流和海洋动力的对比动态变化, 常规船测既耗时、成本又高, 且难以获取悬浮泥沙时空分布上的大量连续数据。采用遥感定量, 可获取大面积水域悬浮泥沙浓度信息, 瞬间同步性好, 重复获取数据周期短, 有效地检测悬浮泥沙分布和动态变化^[3]。

本文拟采用欧空局 2002 年发射的 ENVISAT 卫星搭载的中分辨率成像光谱仪(MERIS)获取的数据产品获得长江口悬浮泥沙的浓度。由于 MER-

IS 二级产品的总悬浮物浓度, 所采用的反演算法更适合于欧洲海岸水体。在中国高浊度水域如长江口, 反演浓度与实测浓度有较大偏差。本研究拟采用 MERIS 1b 产品, 利用实测的遥感反射率及同步水样的采集, 建立悬沙浓度与遥感反射率之间的反演模型, 并将模型应用于 MERIS 遥感影像进行悬沙浓度反演, 获得长江口悬沙浓度分布图。

1 MERIS 传感器及数据

国际上星载水色仪以 SeaWiFS、MODIS 为代表, 其空间分辨率、波段设置及相应的算法更适合海洋一类水的应用。MERIS 在空间分辨率、水色波段设置、辐射灵敏度等方面具有超越 SeaWiFS、MODIS 的优越性(见表 1), 可满足海岸带复杂二类水甚至内陆水的应用要求^[6~8]。

表 2 列出 MERIS 传感器在可见光/近红外区域(309~1 040 nm)的 15 个水色波段, 其光谱带宽(可见光波段平均带宽为 10 nm)及中心波段位置更精细合理于海岸二类水体水色组分的反演。特别是 300 m 空间分辨率, 有助河口悬沙反演精度的提高。

收稿日期: 2008-10-09; 修回日期: 2008-12-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(40871165); 海洋公益性科研专项(9200705020)

作者简介: 刘小丽(1984~), 女, 江西省萍乡人, 硕士, 主要从事海岸带环境遥感方向研究。E-mail: xiaoliu1984@163.com

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

表 1 MERIS 与 MODIS, SeaWiFS 比较

Tab. 1 Comparisons Among MERIS, MODIS and SeaWiFS

传感器	MERIS	MODIS	SeaWiFS
空间分辨率(m)	300 (1 200)	250, 500, 1 000	1 100
光谱分辨率(nm)	3.5~20	15~20	20
水色波段数	15	9	8
波段范围 (nm)	390~1 040	405~877	402~885
重返周期 (d)	2~3	1	1
信噪比	1 700(均值)	57~1 087	442~674
扫描宽度(km)	1 150	2 330 * 10	2 810

表 2 MERIS 波段设计

Tab. 2 Spectral Bands of MERIS

波段	中心波长(nm)	带宽(nm)	应用
1	412.5	10	黄色物质与碎屑
2	442.5	10	叶绿素吸收最大值
3	490	10	叶绿素、其他色素
4	510	10	悬浮泥沙、赤潮
5	560	10	叶绿素吸收最小值
6	620	10	悬浮泥沙
7	665	10	叶绿素吸收与荧光性
8	681.25	7.5	叶绿素荧光峰
9	708.75	10	荧光性、大气校正
10	753.75	7.5	植被、云
11	760.625	3.75	O ₂ 吸收带
12	778.75	15	大气校正
13	862	20	植被、水汽
14	885	20	大气校正
15	900	10	水汽、陆地

2 MERIS 数据处理

MERIS 1b 数据为大气层顶部的辐射率(TOA), 包含了大气层外太阳光谱辐照度、大气及其与地面相互作用的各贡献^[7]。故从其数据反演获得悬沙浓度, 必须去除大气的贡献, 获得离水辐射率。目前大气校正的方法主要有 3 种: 大气辐射传输方程计算、暗像元校正和借助地面实测反射光谱校正^[8~12]。

本文采用了基于辐射传输模型的 MODTRAN 算法。由于长江口地处海-陆交互过渡带, 该区域的气溶胶类型可能较为复杂, 故采用多种可能的类型进行模拟计算。如在 MODTRAN 程序中设 aerosol type = Maritime、Tropospheric、Rural、Urban、Desert、Visibility = 5、10、20、40 km, 对观测几何条件 sun zenith、view zenith 采用 5° 步长、relative azimuth 采用 45° 步长分别进行模拟计算, 建立大气参数查找表^①。根据查找表计算获得的模拟值与实测

值最匹配的结果是最有效的。例如对于 2005 年 8 月 15 日的 MERIS 影像, 经匹配得出: aerosol type = Maritime, Visibility = 5 km 的模拟结果符合最好。图 1 显示了 MERIS 第 12 波段大气校正前后的图像。图 1 可见, 大气校正后, 减小了大气的影 响, 影像对比度增加, 悬沙锋面比原始图像清晰, 图像质量有明显改善。

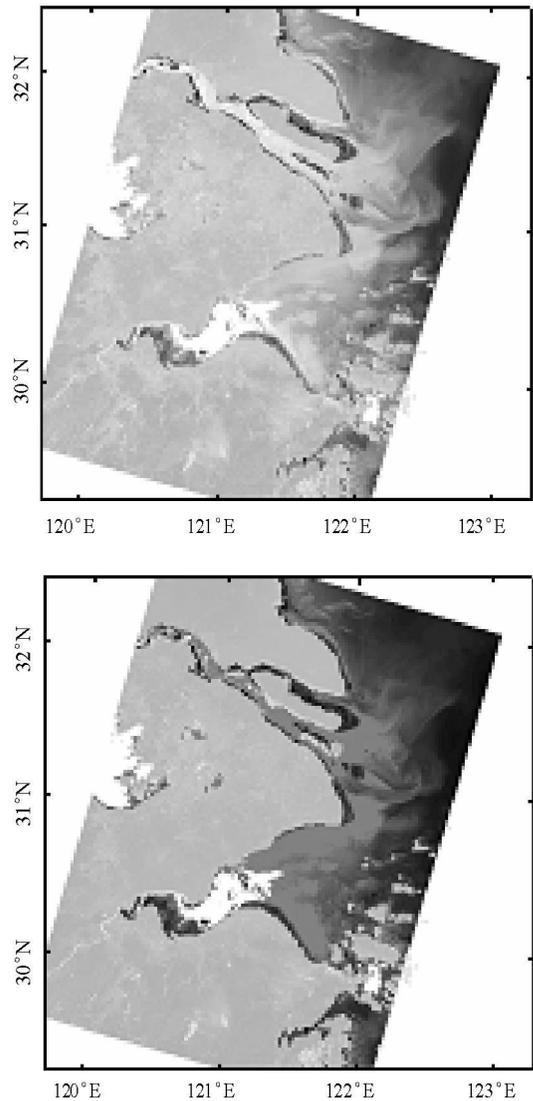


图 1 MERIS Band-12 大气校正前后图像(2005 年 8 月 15 日)

Fig. 1 Images Before and After Atmosphere Correction

3 悬沙反演模型的建立

利用 2004~2006 年野外船测数据(30 个)以及 2006 年 7 月晴朗天气室外桶测光谱数据(74 个)建立悬沙浓度(SSC)与遥感反射率(Rrs)的统计关系。

① SHEN Fang, VERHOEF Wouter, ZHOU Yunxuan, et al. Dynamics of suspended sediment concentration from MERIS data in extremely turbid waters, a case study of the Yangtze River estuary, 2008. In press.

桶测光谱实验^[13]所用黑色桶高 1.5 m, 底部直径 1.4 m, 开口直径 1.5 m。利用 ASD 公司的 FieldSpec JR 便携式地物光谱仪, 按照水面以上光谱测量方法^[13~15], 分别测量水体辐照度 $L_u(\lambda)$ 、反射率为 20% 的标准灰板的辐亮度 $L_d(\lambda)$ 以及天空光的辐亮度 $L_s(\lambda)$, 每次连续采集 5 条记录, 同时采集水样 600 mL。测量完毕, 每次往桶内添加 25 g 准备好的泥沙, 待桶内水样搅拌均匀一重复测量。实验室悬沙浓度测定通过 0.45 μm 醋酸纤维过滤, 烘干称重得到悬浮泥沙浓度重量。

遥感反射率的计算采用公式: $R_{rs}(\lambda) = L_w(\lambda) / E_d(\lambda)$ 。式中: $E_d(\lambda)$ 为太阳光在水面的总辐照度, 可以通过实测值 $L_d(\lambda)$ 计算得到: $E_d(\lambda) = L_d(\lambda) \times \pi / R_p(\lambda)$, $R_p(\lambda)$ 为标准板反射率 20%。

离水辐射率 $L_w(\lambda) = L_t(\lambda) - \rho \times L_s(\lambda)$, ρ 为气-水界面对天空光的菲涅尔反射系数, 取值范围 0.002 1 ~ 0.05^[10]。实测时天气条件较好, 风速小于 4 m/s, 按照参考文献有薄云取 $\rho = 0.028$ 、晴空时取 0.033 7;

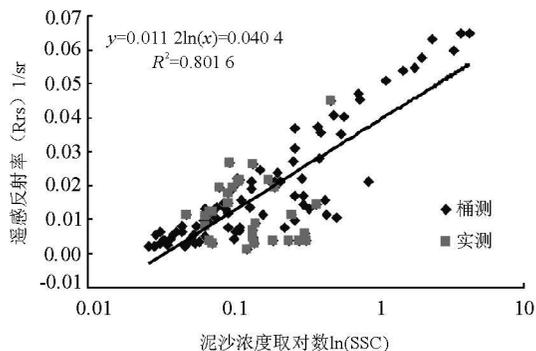


图 2 MERIS 778 nm 处的遥感反射率与悬沙浓度之间的关系

Fig. 2 Relationship Between Remote-Sensing Reflectance and SSC

图 2 显示遥感反射率随着悬沙浓度的增加而呈对数增长, 基本服从线性关系式: $Y = a \ln(\text{SSC}) + b$ 。表 3 为 MERIS 15 个波段遥感反射率与实测悬沙浓度的对数关系参数以及相关系数。

从表 3 中可以看出, 在波段 778 nm, 悬沙浓度与遥感反射率之间的相关系数最高 R^2 为 0.802。在统计软件 SPSS 中计算得出: 样本数目 $n = 104$, 回归方程在显著水平 0.01 具有显著意义, 回归系数标准误 0.799, $F = 323.204$ 。故采用 778 nm 处对数反演模型进行悬沙浓度反演 (Y 为遥感反射率):

$$Y = 0.0112 \times \ln(\text{SSC}) + 0.0404$$

表 3 MERIS 悬沙浓度反演模型

Tab. 3 Suspended Sediment Concentration Retrieval Model of MERIS

中心波长(nm)	a	b	相关系数 R ²
412	0.002 4	0.016 3	0.673 1
442	0.003	0.020 9	0.669 4
490	0.004	0.026 2	0.640
510	0.004 6	0.029 3	0.633 6
560	0.007	0.040 7	0.623 7
620	0.009 9	0.049	0.685 4
680	0.011	0.051	0.721
708	0.011 5	0.049 3	0.756 3
753	0.010 7	0.038 5	0.794 2
760	0.010 8	0.038 6	0.798 5
778	0.011 2	0.040 4	0.801 6
862	0.009 7	0.032 6	0.777 6
865	0.009 5	0.032 2	0.783 1
885	0.008 9	0.029 4	0.769 2
900	0.008 4	0.027 3	0.767 4

4 结果与分析

4.1 结果验证

收集了 2005 年 7 月 30 日、8 月 3 日、8 月 9 日 10:30 过境的 MERIS 卫星数据与 10 点、11 点的整点时刻现场同步实测的数据进行反演验证。先对三景 MERIS 1b 影像进行大气校正, 再根据模型对研究区进行悬浮泥沙浓度的反演。实测点位置及反演的浓度与实测悬沙浓度的对比如图 3、4 所示。

图 4 中, x 轴表示实测悬沙浓度值, 上图 y 轴表示反演得到的悬沙浓度值, 下图 y 轴则表示 MERIS 二级产品中的悬沙浓度值。我们可以看出, 05 年夏季三个寻常潮洪季, 利用反演模型得出的悬沙浓度值比直接采用二级产品悬沙浓度值更符合实际。经过计算二级产品悬沙浓度值、反演悬沙浓度值与实测悬沙浓度数据绝对误差及相对误差, 可以得出平均相对误差可由 90% 减小到 53%, 在 2005 年 8 月 9 号实测点上反演值接近实测值, 提高了 MERIS 数据在长江口近岸浑浊二类水悬沙浓度反演精度。

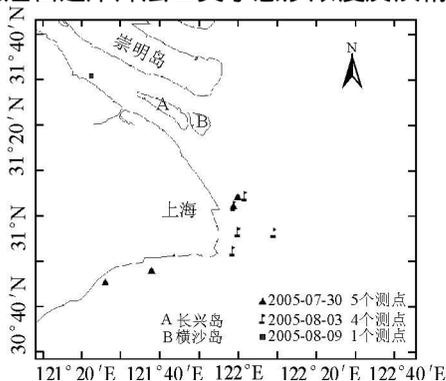


图 3 实测点位置分布图

Fig. 3 In-situ Site Distribution Map

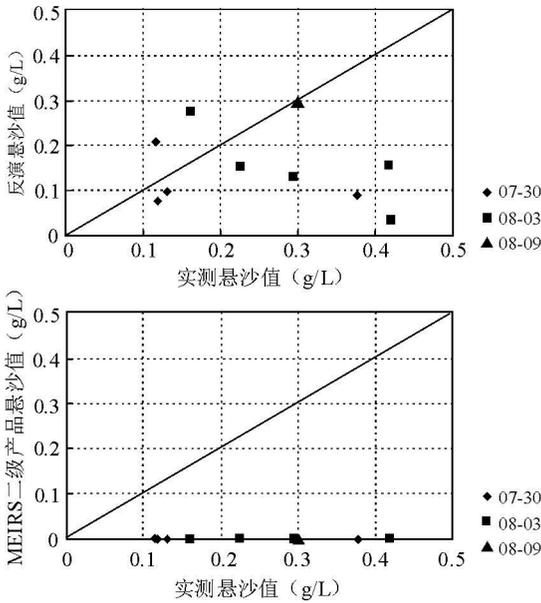


图 4 反演的表层悬沙值、MERIS 二级产品悬沙值与实测值之间的比较

Fig. 4 Comparison Between Retrieval Value, Level 2 Products and In-situ Values

4.2 悬浮泥沙浓度时空分析

利用建立的反演模型,对长江口 2005 年 8 月 15 日、9 月 16 日大气校正后的影像进行悬浮泥沙反演,见图 5。

2005 年 8 月 15 日成像时刻 10:33 时潮情为寻常潮,口内落急、口外为落急后期。从 MERIS 反演的悬浮泥沙浓度分布图可以看出,由于长江口内受云和周边陆地的影响,反演得到的悬沙浓度偏高,与实际情况相差较大,这可能是大气校正的问题;从图像上我们还可以看到浑浊长江水沿着深水航道流入东海,受夏季盛行偏南风的影响,入海路径发生改变,浑浊水体随风向海扩散。

2005 年 9 月 16 日成像时刻 10:27 时潮情为寻常潮,口内涨急,口外开始落潮。从 MERIS 反演的悬浮泥沙浓度分布图可以看出,反演得到的悬沙浓度分布与实际情况相符;从两景不同时刻的遥感影像我们可以得出:由长兴岛至口外、杭州湾悬沙浓度呈现高-低-高变化,悬浮泥沙呈扇形向海扩散;在 121°50'E ~ 122°15'E,水体处于浑浊状态,并伴有高浓度含沙量出现。

5 结语

本文利用实测光谱、悬沙数据,结合 MERIS 传感器本身的特点,建立了悬浮泥沙浓度与 MERIS

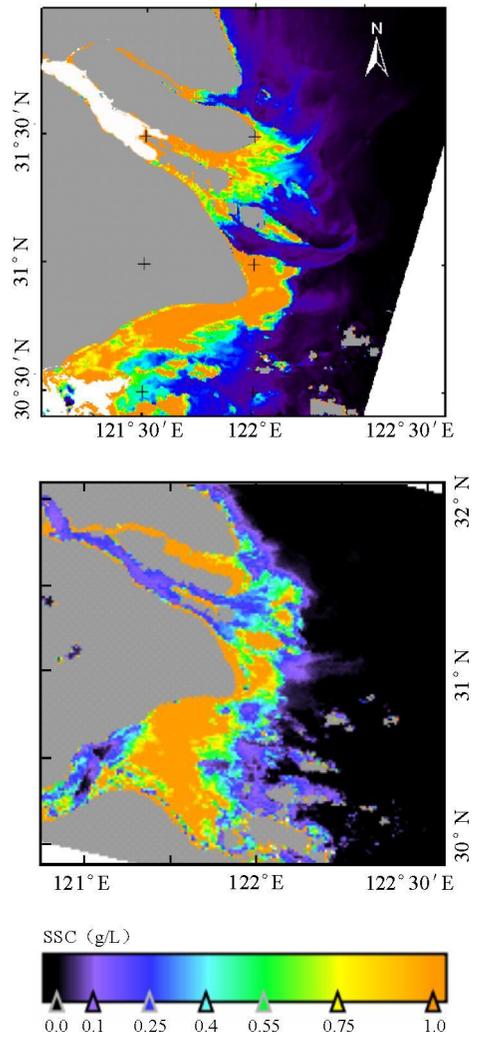


图 5 2005 年 8 月 15 日反演得到的悬浮泥沙浓度分布图
Fig. 5 Distribution of Suspended Sediment Concentration on Aug. 15th, 2008

注:白色区域为云影响的区域,不参加浓度分级 2005-08-15 寻常潮,落急后期。

第 12 波段遥感反射率之间的对数模型 $Y = 0.0112 \times \ln(SSC) + 0.0404$ 。

(1)通过对 2005 年 7 月 30 日、8 月 3 日以及 8 月 9 日悬沙值与实测数据比较,得出反演平均相对误差可以由 MERIS 数据二级产品 90%的误差下降到 53%,提高了利用 MERIS 数据反演河口近岸二类水体悬浮泥沙浓度的精度,尝试了 MERIS 数据应用于长江口二类水体反演;

(2)进一步分析,将这一模型应用于 2005 年 8 月 15 日和 9 月 16 日的遥感影像,分析 2005 年 8 月 15 日得到的悬沙浓度分布图,可以认为由于气卫星几何参数: Sun zenith = 25°, Sun azimuth = 127°, View zenith = 35°, View azimuth = 286°,即 Rela-

relative azimuth (相对方位角) 大于 150° , 可能使传感器接收到的信号受耀光影响的机会增大, 反演获得的悬浮泥沙分布在南支、南港偏高。而 2005 年 9 月 15 日, 卫星其 Relative azimuth (相对方位角) 小于 60° , 成像条件较好, 而去最后得到的悬沙浓度分布符合北支浓度高于南支、杭州湾高于长江口, 且近岸二类水体浓度高于离岸水体的趋势。但是也存在一些问题, 如大气校正不恰当使得长江口北支悬沙浓度反演偏高, 建立遥感反射率与悬沙浓度之间关系式时, 选择 MERIS 12 波段主要是基于室外桶测数据相关性最高, 没有考虑到叶绿素以及长江口二类水体中其他无机物质的对悬沙浓度反演的影响。

基于 MERIS 数据应用于长江口高浑浊河口进行悬浮泥沙浓度反演是具有一定适宜性、可行性的。但是由于实测数据受地理位置的限制, 这一算法在其它河口的适宜性, 可能需要进一步广泛验证。

致谢 感谢欧空局(ESA)提供本文中使用的 Envisat MERIS 数据。

参考文献:

- [1] 恽才兴. 海岸带及近海卫星遥感综合应用技术[M]. 北京: 海洋出版社, 2005: 29~34.
[2] 陈清莲, 王项南. 海洋水色遥感及 Landsat 5 TM 数据在海南岛东

- 部海域水色分析中的应用[J]. 海洋技术, 1995, 14(3): 47~50.
[3] 陈沈良, 张国安, 杨世伦, 等. 长江口水域悬沙浓度时空变化与泥沙再悬浮[J]. 地理学报, 2004, 59(2): 260~266.
[4] 李九发, 何青, 张琛. 长江河口拦门沙河床淤积和泥沙再悬浮过程[J]. 海洋与湖沼, 2000, 31(1): 101~109.
[5] 孔亚珍, 丁平兴, 贺松林, 等. 长江口外及其邻近海域含沙量时空变化特征分析[J]. 海洋科学进展, 2006, 24(4): 446~454.
[6] 匡燕, 李安, 李子杨, 等. ENVISAT 卫星综述[J]. 遥感信息, 2007(1): 90~92.
[7] 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.
[8] 冯士筭. 海洋科学导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999: 397~410.
[9] ROLAND D. Introduction into Ocean Color Remote Sensing using MERIS data. 2nd Advanced Training Course in Ocean Remote Sensing[R]. 2007, Hangzhou.
[10] CURTIS D. Mobley. Estimation of the remote-sensing reflectance from above surface measurements. APPLIED OPTICS, 1999, 38(36): 7442~7455.
[11] 韩震. 海岸带淤泥质潮滩和 II 类水体悬浮泥沙要干信息提取与定量反演研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2004: 80~84.
[12] 郑伟, 曾志远. 遥感图像大气校正方法[J]. 遥感信息, 2004, 4: 66~70.
[13] 沈芳, 周云轩, 李九发, 等. 河口悬沙粒径对遥感反射率影响的理论分析与实验观测[J]. 红外与毫米波学报, 2009, 28(3): 168~172.
[14] 刘志国, 周云轩, 蒋雪中, 等. 近岸 II 类水体表层悬浮泥沙浓度遥感模式研究进展[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(1): 321~326.
[15] 唐君武, 田国良, 汪小勇, 等. 水体光谱测量与分析 I: 水面上测量法[J]. 遥感学报, 2008, 8(1): 37~44.

QUANTITATIVE RETRIEVAL FOR SUSPENDED SEDIMENT CONCENTRATION BY USING MERIS SATELLITE DATA IN THE YANGTZE RIVER ESTUARY

LIU Xiao-li, SHEN Fang, ZHU Wei-jian, LIU Xi

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

Abstract: Suspended sediment concentration (SSC) is one of the most significant parameters of water quality. Acquiring spatial and temporal distribution of SSC is helpful in water environment monitoring and sediment distribution investigation. In this paper, a brief introduction of data format of Medium Resolution Imaging Spectrometer (MERIS) is firstly made before the comparison among MERIS, SeaWiFS and MODIS. It has great advantage of band setting and the radiometric sensitivity, and will contribute enormously to the ocean color research. As the error between the MERIS Level 2 and in-situ data is large in China high-turbid coastal water, the retrieval algorithm should be modified according to the characteristics of case II waters. And then the algorithm is applied to three summer normal tidal images in 2005 after atmosphere correction. The error between the retrieval and the in-situ data is descended to 53 percents, which is lower than the error between MERIS Level 2 and in-situ data. So the empirical model developed in this paper is superiority in the Yangtze River. At last, SSC distribution map of 15th. Aug. is given with some preliminary analysis.

Key words: medium resolution imaging spectrometer; suspended sediment concentration; remote sense reflectance