

文章编号: 1007-4619(2006)03-0381-06

神舟三号 CMODIS 数据获取长江口 悬浮泥沙含量的时空分布

韩 震¹, 金亚秋¹, 恽才兴²

(1. 复旦大学 波散射与遥感信息国家教育部重点实验室, 上海 200433;

2. 华东师范大学 河口海岸国家重点实验室, 上海 200062)

摘 要: 悬浮泥沙含量的时空分布是分析河口海岸冲淤变化、估算河流入海物质通量、研究海洋沉积速率和海洋环境的重要参数。成像光谱仪技术包含了丰富的空间、辐射和光谱三重信息。用中国神舟三号上 34 个波段的中等分辨率成像光谱仪 (CMODIS) 数据, 采用经验线性法对其辐射亮度值进行了反射率转换, 结合长江口现场调查资料, 对长江口悬浮泥沙含量时空分布进行了遥感定量反演, 取得了很好的效果。

关键词: “神舟”三号; CMODIS; 悬浮泥沙; 长江口

中图分类号: TP79/TP391

文献标识码: A

Spatial and Temporal Distributions of Suspended Sediment Contents in the Yangtze River Estuary Using the CMODIS Image Data from China's SZ-3 Spacecraft

HAN Zhen¹, JIN Ya-qiu¹, YUN Cai-xing²

(1. Key Laboratory of Wave Scattering and Remote Sensing Information (Ministry of Education)

Fudan University, Shanghai 200433, China;

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

Abstract: Spatial and temporal distributions of suspended sediment concentrations are greatly important for analyzing the deposition and erosion variety of the estuary and coast, evaluating the material fluxes from river to sea, and studying oceanic sediment velocity and environment. The spectrometry imagery technology includes three kinds of spatial, radiation and spectral information. The Chinese Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (CMODIS) with 34 bands was loaded on the China's SZ-3 spacecraft on March 25, 2002. Making use of the CMODIS data, this paper presents the retrievals of the suspended sediment concentrations and its spatial and temporal distributions in the Yangtze River estuary with the field measurements.

Key words: the SZ-3 spacecraft; CMODIS; suspended sediment; Yangtze River

1 引 言

长江河口是一条典型的三级分汊、四口入海的

多级分汊河口 (图 1)。由于受径流、潮汐、盐淡水混合及风浪作用等多种因素综合影响, 悬浮泥沙的时空分布、运动特性和沉积部位经常发生变化, 一般常规观测方法难以掌握其变化规律^[1]。卫星遥感具

收稿日期: 2004-12-29; **修订日期:** 2005-05-26

基金项目: 国家重点基础研究项目 (2001CB309401), 上海光科技专项 (36105012), 中国载人航天工程 II 级子课题 (921-2-15-II-4), 国家海洋局海洋动力过程与卫星海洋学重点实验室开放研究基金 (LCPSO200402), 中国博士后科学基金 (2004036096) 资助。

作者简介: 韩 震 (1969—), 男, 博士后, 毕业于华东师范大学自然地理学专业 (理学博士)。现主要从事遥感技术应用研究, 已发表论文 40 余篇, 著作 2 部。

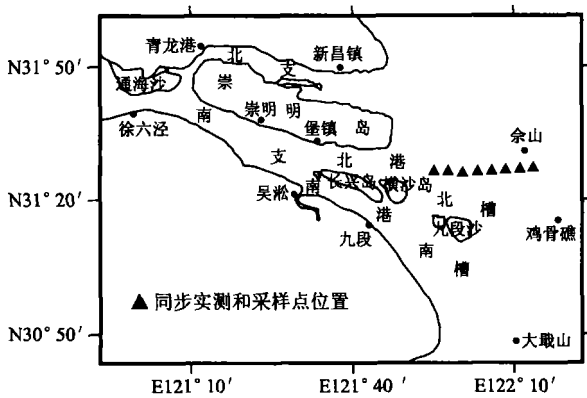


图 1 长江口分汉形势图

Fig 1 Map of the Yangtze River estuary

有宏观、同步、快速等优势,开展长江口悬浮泥沙的遥感专题应用研究,可动态监测该地区悬浮泥沙时空分布规律,为其资源与环境的合理开发利用和管理提供科学依据。

李炎等^[2]曾利用 NOAA 卫星的 AVHRR 数据进行长江口悬浮泥沙含量的反演。Ouillon 等^[3]也利用 SPOT 数据对 Rhone 河悬浮物进行了研究。2000 年以前,悬浮泥沙遥感使用的数据源主要来自 Landsat MSS 和 TM、SPOT、NOAA、AVHRR 等传统的传感器。1999-12-28 美国成功地发射了极地轨道环境遥感卫星 Terra (EOS-AM1)。这颗卫星载有中分辨率成像光谱仪 MODIS 它为悬浮泥沙遥感应用开辟了一条新途径。在神舟三号飞船上搭载的对地观察中分辨率成像光谱仪 (CMODIS) 是中国第一台空间载成像光谱仪,于

2002-03-25 发射升空。CMODIS 在 0.403-12.5 μ m 之间具有 34 个通道,地面分辨率为 400-500m,是世界上继美国 MODIS 和欧空局 MERIS 后的又一个空间载成像光谱仪。我们首次利用 CMODIS 数据进行了长江口悬浮泥沙信息的定量遥感反演研究,对长江口悬浮泥沙含量的时空分布进行了分析。

在长江口悬浮泥沙遥感数据中,由于各种因素的重叠干扰,对于悬浮泥沙物质和能量解释具有不确定性和时空可变性。成像光谱仪可获得目标物的诊断性光谱特性,实现遥感模型参数或条件约束的确定。成像光谱仪技术是当前遥感技术的前沿领域之一,在可见光、近红外、中红外和热红外波段可获得大量窄波段连续光谱图像数据^[4]。

由于 CMODIS 数据在地面二维信息的基础上,增加了第三维(光谱)信息,即将图像维信息和光谱维信息融为一体,而光谱信息与目标物质结构紧密相关,所以,它可以依据地物光谱特征,进行地物成分信息反演和地物的识别,从而大大提高了从 CMODIS 数据判别并获取长江口悬浮泥沙信息的能力^[5]。

2 CMODIS 数据处理

2.1 长江口悬浮泥沙的特点

长江河口的悬浮泥沙主要来自长江流域,洪季 6 个月的输沙量占年输沙总量的 87.2%。长江流域来沙在各汉道的输沙量各不相同,而且不断变化,表 1 给出了长江河口多年平均含沙量的特征

表 1 长江河口多年平均含沙量特征值统计表 (单位: kg/m³)

Table 1 Statistics of multi-year averaged suspended sediment concentrations in the Yangtze River estuary (unit kg/m³)

河槽	季节	涨 潮						落 潮					
		大潮			小潮			大潮			小潮		
		平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值
南支	洪季	0.43	0.92	0.17	0.24	0.39	0.13	0.46	1.16	0.20	0.30	0.46	0.16
	枯季	0.21	0.33	0.12	0.07	0.11	0.04	0.21	0.32	0.13	0.07	0.09	0.05
南港	洪季	0.72	1.40	0.49	0.44	0.72	0.19	0.82	2.18	0.44	0.45	0.84	0.22
	枯季	0.61	1.23	0.39	0.41	0.66	0.27	0.48	0.76	0.30	0.37	0.53	0.19
南槽	洪季	1.43	2.28	0.88	0.60	0.98	0.26	1.19	1.77	0.83	0.47	1.41	0.11
	枯季	0.84	1.26	0.39	0.68	1.12	0.32	0.72	1.46	0.35	0.59	0.97	0.22
北槽	洪季	1.28	1.65	0.88	0.38	0.46	0.26	1.39	1.72	0.30	0.57	0.85	0.38
	枯季	0.59	1.02	0.26	0.39	0.44	0.35	0.69	1.01	0.44	0.58	0.63	0.55
口门外	洪季	0.88	1.81	0.34	0.48	0.75	0.30	0.94	1.73	0.31	0.46	0.59	0.31
	枯季	0.31	0.53	0.04	0.11	0.14	0.06	0.16	0.31	0.11	0.11	0.11	0.08

(据沈焕庭、潘安定, 2001年)

值^[6]。长江流域来沙约有 50% 以上在口门(九段沙附近)附近沉积, 形成宽阔的水下三角洲和拦门沙^[6-8]。

2.2 CMOD IS 数据分析

CMOD IS 获取的数据量较大, 不同波段对悬浮泥沙信息响应不同。通过对长江口地区 CMOD IS 数据的分析, 发现其直方图分布范围较宽, 并且各地物灰度峰分布的离散性良好, 图像的层次较丰富, 清晰度较高。图 2 为 2002-06-01 长江口地区 CMOD IS 5、19、20 波段的合成图像。

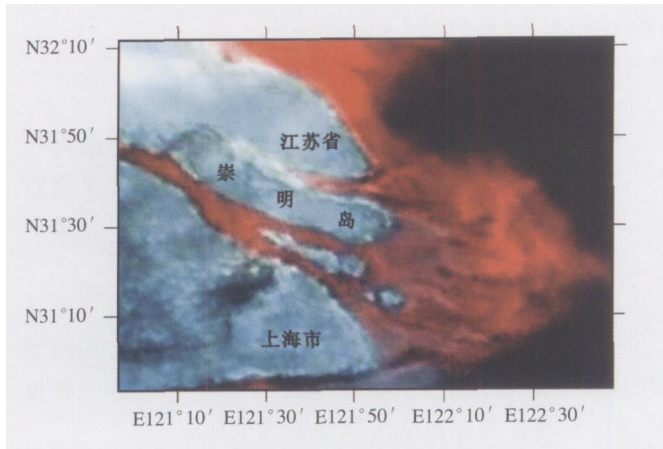


图 2 2002-06-01 长江口地区 CMOD IS 5、19、20 波段合成图像
Fig 2 A composite image of the CMOD IS at the bands 5, 19 and 20 in the Yangtze River estuary. 2002-06-01

从合成效果来看, 图像的层次较丰富, 清晰度良好, 含沙量不同的水体层次明显, 长江口泥沙高浓度区、浑水舌、羽状流等特征都有良好的反映。通过对 CMOD IS 图像的悬浮泥沙浓度和地物类型与实测资料以及其他卫星测得的结果对比分析, 发现它们的分布趋势存在可比性。从各单波段图像显示综合分析, 4-20 波段, 图像质量良好, 地物特征明显。其余波段存在不同程度的噪声, 有的波段相当明显; 5、8-14 波段, 相对于短波长波段, 大气干扰减小, 图像更加清晰, 泥沙低、中浓度区有良好反映; 12-14 波段、19-20 波段, 高浓度泥沙区有良好反映, 水陆边界易于识别, 图像条带噪声小, 质量好。CMOD IS 图像在可见光波段的效果要好于红外波段, 主要表现在条带噪声较低, 信噪比和图像对比度较高。结合长江口悬浮泥沙光谱特性^[1]和 CMOD IS 数据特点综合分析, 得到了对悬浮泥沙信息响应敏感的 CMOD IS 波段, 见表 2。

表 2 CMOD IS 悬浮泥沙特征明显的波段

Table 2 Sensitive bands for the features of suspended sediments in CMOD IS data

波段	波长范围 /nm	悬浮泥沙特征评价
5	483-503	低含量泥沙信息明显
8	543-563	低含量泥沙信息明显
9	563-583	低含量泥沙信息明显
10	583-603	低含量泥沙信息明显
11	603-623	低、中含量泥沙信息明显
12	623-643	中、高含量泥沙信息明显
13	643-663	中、高含量泥沙信息明显
14	663-683	中、高含量泥沙信息明显
19	763-783	高含量泥沙信息明显
20	783-803	高含量泥沙信息明显

2.3 现场波谱测试

我们联合国家卫星海洋应用中心、国家海洋信息中心和国家气象局等单位有关人员, 于 2002-06-01 使用 ASD FieldSpec FR 便携式野外光谱辐射仪对长江口悬浮泥沙水体进行了和 CMOD IS 同步测量及采样(同步实测和采样具体位置见图 1)。这种光谱辐射仪是后色散光谱辐射仪, 样本在被单色光照射的同时, 只有与样本单色光照射相同波长的周围一小部分干扰光被记录下来, 误差较小。它采用 1m 长光导纤维直接输入, 便于逐点测量而不必整移全部仪器。以 0.1s 的速度记录一个光谱, 快速记录光谱能减少太阳光照下由于云和风变化而引起的误差, 同时又能保持较高的信噪比^[9]。图 3 为使用光谱辐射仪实测的长江口不同浓度悬浮泥沙水体的反射波谱曲线, 其中 63mg/L 的悬浮泥沙水体地理坐标位置为 N31°23'21", E121°50'20.2"; 257mg/L 的悬浮泥沙水体地理坐标位置为 N31°22'35", E122°10'10"; 847mg/L 的悬浮泥沙水体地理坐标位置为 N31°22'18.3", E122°05'11"。

2.4 CMOD IS 数据辐射亮度值向反射率的转换

2.4.1 理论基础

空中运行传感器入瞳处光谱辐亮度是大气外太阳光谱辐照度、大气及其与地面相互作用的总贡献。在本应用中, 忽略大气的折射、湍流和偏振, 并假设天空是均朗伯体散射, 地表面为均质平坦的朗伯体^[10]。

根据遥感方程, 地面的太阳辐亮度是太阳辐照度和表面反射率的函数^[11]:

$$L_{g\lambda} = (\rho_{g\lambda} / \pi) [E_{0(\lambda)} \cdot \cos\theta_z \cdot \exp(-\alpha_\lambda \cdot \sec\theta_z) + E_{d\lambda} \cdot \nu] \quad (1)$$

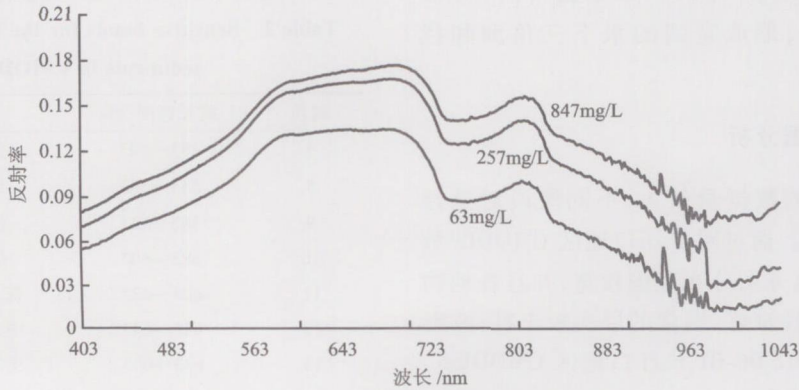


图 3 ASD FieldSpec FR 波谱仪实测的长江口不同浓度悬浮泥沙水体的反射波谱曲线
 Fig 3 Field measurements of the reflected spectrum of the suspended sediment waters in the Yangtze River estuary using ASD FieldSpec FR

式中, $L_{g\lambda}$ 为地物表面反射辐射亮度; $\rho_{g\lambda}$ 为地物表面反射率; $E_{0(\lambda)}$ 为大气层外相应波长的太阳光谱辐照度; θ_z 为太阳天顶角; δ_λ 为相应波长的光学厚度; $E_{d\lambda\downarrow}$ 为由天空光漫射到地表面的光谱辐照度。

传感器接收到的表面辐射亮度 $L_{s\lambda}$ 是地面辐射亮度 $L_{g\lambda}$ 、大气透过率和由大气散射造成的向上大气光谱辐射亮度 $L_{d\lambda\uparrow}$ (即程辐射) 的函数:

$$L_{s\lambda} = L_{g\lambda} \cdot \exp(-\delta_\lambda \cdot \sec\theta_v) + L_{d\lambda\uparrow} \quad (2)$$

式中, θ_v 为传感器观测角。

由 (1) 和 (2) 式, 得到:

$$L_{s\lambda} = \rho_{g\lambda} \cdot [E_{0(\lambda)} \cdot \cos\theta_z \cdot \exp(-\delta_\lambda \cdot \sec\theta_z) + E_{d\lambda\downarrow}] \cdot \exp(-\delta_\lambda \cdot \sec\theta_v) / \pi + L_{d\lambda\uparrow}$$

在 θ_z 和 θ_v 小于 70° 时, 针对大气散射和弱吸收的情况, 即在可见光和短波红外波段, $\exp(-\delta_\lambda \cdot \sec\theta_z)$ 和 $\exp(-\delta_\lambda \cdot \sec\theta_v)$ 可近似为向下大气透过率 $t_{\lambda\downarrow}$ 和向上大气透过率 $t_{\lambda\uparrow}$, 因此上式又可以表示为:

$$L_{s\lambda} = \rho_{g\lambda} \cdot [E_{0(\lambda)} \cdot \cos\theta_z \cdot t_{\lambda\downarrow} + E_{d\lambda\downarrow}] \cdot t_{\lambda\uparrow} / \pi + L_{d\lambda\uparrow} \quad (3)$$

像元间的多次散射影响在公式中没有考虑, 该作用可降低像元间的反差, 本文通过空间滤波处理, 可以减弱该作用的影响, 由于水面较平坦, 所以公式中未考虑地形因子^[10-13]。

2.4.2 辐射亮度值转换为反射率^[14]

为研究河口悬浮泥沙的光谱响应行为, 长期以来人们进行了大量的地面光谱测量, 通过光谱匹配技术, 使得从图像直接识别悬浮泥沙成为可能。由于遥感数据中包含大气的影响, 所以一般不能把地面的光谱辐射仪测量值直接应用于图像识别, 应先将传感器获得的辐射亮度值转换为反射率。

对于 CMODIS 数据, 大气的影响主要表现在程

辐射和交叉辐射。程辐射是全局效应, 在稳定大气条件下, 它均匀地叠加在整个图像之上; 而交叉辐射是局部效应, 它是临近像元相互影响造成的, 其结果是使图像的边缘变模糊。

传感器获得的辐射亮度值转换为反射率主要有三种形式: ①利用辐射传输方程进行校正; ②利用图像本身进行校正; ③借助地面实测反射光谱进行校正, 主要有混合光谱法和经验线性法。

本文利用经验线性法对 CMODIS 数据进行了反射率转换, 经验线性法的简化模型为:

$$L_{s\lambda} = k \cdot \rho_{g\lambda} + b \quad (4)$$

式中, $L_{s\lambda}$ 为传感器接收到的地表辐射亮度; $\rho_{g\lambda}$ 为地物表面反射率; k 、 b 为反射率转换因子。 k 、 b 值可以通过最小二乘法求解, 它们在物理意义上分别近似于最大太阳辐照度值和程辐射值。

反射率转换步骤如下:

(1) 根据 2002 年 6 月 1 日野外同步光谱定标测试点, 在 CMODIS 图像上选择对应的像元, 并分别求出它们的平均亮度值;

(2) 对野外实测反射率波谱进行重采样, 获得与 CMODIS 数据波段相对应的地面反射率值;

(3) 利用最小二乘法求解 k 、 b 其公式分别为 (5) 和 (6) 式:

$$k = \frac{N \sum (DN_i R_i) - \sum R_i \sum DN_i}{N \sum R_i^2 - \left| \sum R_i \right|^2} \quad (5)$$

$$b = \frac{\sum DN_i R_i - k \sum R_i^2}{\sum R_i} \quad (6)$$

式中, DN_i 为像元 i 的灰度值; R_i 为像元 i 的反射率; N 为选定的地物类型数。

2.4.3 CMODIS 数据含沙水体反射波谱曲线反演

对 CMODIS 数据进行反射率转换后, 结合长江口海图对长江口不同浓度悬浮泥沙水体进行了光谱反射率提取。采样点位置为 CMODIS 图像上典型的单一地物目标 (不同浓度悬浮泥沙水体) 样本区。通过光谱曲线对比和波形相似性分析 (图 3 与图 4), 可以看出, CMODIS 图像不同浓度悬浮泥沙水体的光谱曲线分布形态和峰值位置与实际测量得到的不同浓度悬浮泥沙水体的光谱曲线有很强的相似性, 能够比较正确地反映悬浮泥沙水体的反射光谱特性。

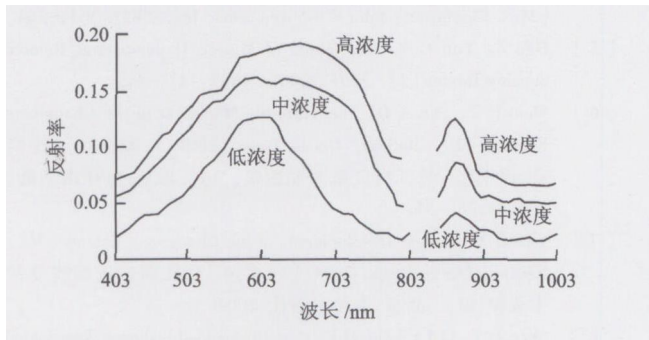


图 4 CMODIS 数据反演的长江口不同浓度悬浮泥沙水体的反射波谱曲线

Fig 4 Retrieval of the reflected spectrum of CMODIS suspended sediment waters in the Yangtze R iver estuary

3 CMODIS 数据悬浮泥沙遥感定量反演

本文的悬浮泥沙遥感反演公式, 采用我们在国家海洋技术中心泥沙配比试验中推导的长江口悬浮泥沙遥感定量分析统计相关模式^[1]:

$$\log_{10} S = 0.6036 + 21.058 \times X_s \quad (R^2 = 0.928) \quad (7)$$

式中, S 为含沙量; X_s 为泥沙遥感参数, $X_s = \frac{R(\lambda_5) + R(\lambda_6)}{R(\lambda_4)}$, 式中 R 为各波段的遥感反射率, 下标 4、5、6 分别对应 490nm、550nm、670nm 波段。

根据统计相关模式对 2002 年 6 月 1 日、6 月 5 日、7 月 14 日的长江口 CMODIS 影像进行了悬浮泥沙含量的反演, 得到了不同时相的长江口悬浮泥沙含量分布图像 (图 5—图 7)。

4 分析和结论

从 CMODIS 反演长江口悬浮泥含量分布图像可以看到, 由于长江口在不同潮情情况下的潮差和流速相差较大, 不同潮情情况下的悬浮泥沙浓度有明显差异。长江口外水域悬沙含量平面分布有西高东

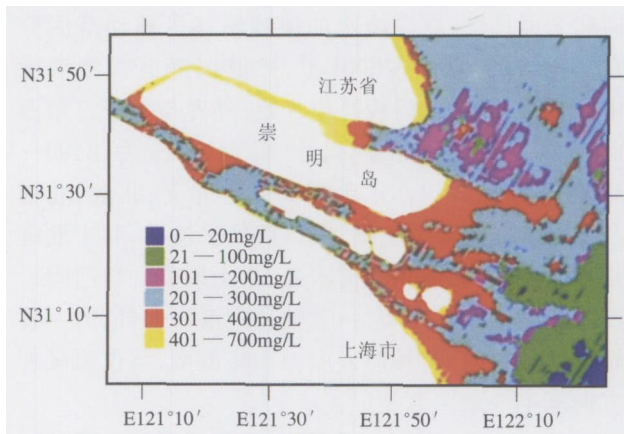


图 6 2002-06-05(小潮)长江口 CMODIS 影像悬浮泥沙含量分布图

Fig.6 Distribution of suspended sediment concentrations in June 5, 2002

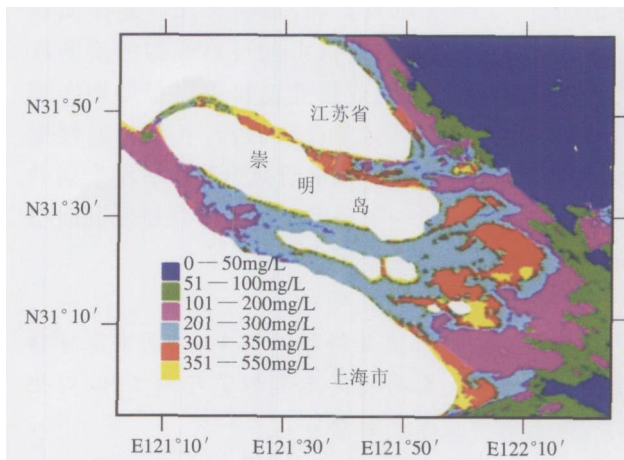


图 7 2002-07-14(中潮)长江口 CMODIS 影像悬浮泥沙含量分布图

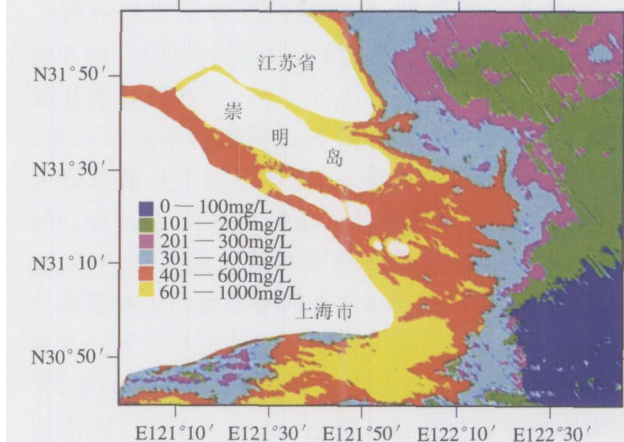


图 5 2002-06-01(中潮)长江口 CMODIS 影像悬浮泥沙含量分布图

Fig.5 Distribution of suspended sediment concentrations in June 1, 2002

低、南高北低的趋势,河口悬浮泥沙呈扇形向海扩散,水体的含沙浓度从口内向口外逐渐递减,泥沙输移区的含沙量与河口内基本一致,浑水输移受往复潮流控制。泥沙扩散沉降区已脱离河槽地形约束,在口外旋转潮流的影响下,泥沙运动以扩散沉降为主,表层含沙量显著降低。从影像上看,悬浮泥沙的扩散形态主要由浑水舌形态和喷射流形态,喷射流主要由长江河口浑浊水体在河槽地形约束和落潮动力轴运动惯量的影响下形成。泥沙漂移区泥沙含量很小,由于河口冲淡水的比重小于高盐度的海水,含沙水体呈浮脱层漂浮于海面,这层水体在风吹流作用下,运动方向很易改变,故其前缘呈羽毛状转折。长江口最大浑浊带主要发生在横沙至口外海滨之间长约 50km 的地段。由于长江河口属中等强度的潮汐河口,潮汐涨落可使不同含沙量的浑水区向海和向陆来回移动,高浑浊水的泥沙输移区移动范围分布面积约为 1200—2000 km²,扩散沉降区含沙浓度中等,其内界从拦门沙滩顶开始,外界与水下三角洲前缘坡折线大致吻合,分布面积约为 2400—3800 km²。输沙以浑水舌形式通过北支、北港、北槽及南槽四条汉道的主槽,向口门地区输移,其中北港是排洪主汉,北槽和南槽次之,北支最少。口门附近泥沙浓度呈双舌分布,一舌轴从南港口向外,另一舌轴从北港口向外,延伸方向为东略偏南,与汉道延伸方向基本一致^[6-8,15]。

神舟三号 CMODIS 数据对于悬浮泥沙含量的反演效果还是比较理想的,反演图像基本符合长江口悬浮泥沙含量平面分布和长江口悬浮泥沙运移的基本规律,不同浓度的含沙量数值范围也基本符合实际情况^[8,15]。本文研究表明,根据长江口悬浮泥沙光谱特性,以及成像光谱仪可获得目标物的诊断性光谱特性的特点,利用成像光谱仪可以很好地实现悬浮泥沙含量的遥感定量反演,进行长江口悬浮泥沙时空分布规律分析。该项研究为我国后续发射的星载成像光谱仪进一步研究悬浮泥沙含量及其时空分布反演提供了参考个例。

致 谢 国家卫星海洋应用中心、国家海洋信息中心和国家气象局的同志参加了野外工作,对他们所做出的贡献深表谢意。

参 考 文 献 (References)

- [1] Han Z Yun C X, Jiang X Z. Experimental Study on Reflected Spectrum of Suspended Sediment [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 327(12): 118—122 [韩震, 恽才兴, 蒋雪中. 悬浮泥沙反射光谱特性实验研究 [J]. 水利学报, 2003, 327(12): 118—122]

- [2] Li Y, Li J. An Retrieval Algorithm of the of Suspended Sediment from the Sea Surface Sensor Reflectance Slope Transfer [J]. Chinese Science Bulletin, 1999, 44(17): 1892—1897. [李炎, 李京. 基于海面遥感器光谱反射率斜率传递现象的悬浮泥沙遥感算法. 科学通报, 1999, 44(17): 1892—1897.]
- [3] Ouillon S, Forget P, Froidefond J M, et al. Estimating Suspended Matter Concentrations from SPOT Data and from Field Measurements in the Rhone River Plume [J]. Oceanographic Literature Review, 1998, 45(4): 712—720.
- [4] Thomas M, Ralph W. Remote sensing and image interpretation [M]. Chichester: John Wiley and Sons, Inc, 2000: 363—364.
- [5] Han Z Yun C X. Technique of Marine Hyperspectral Remote Sensing Review [J]. SPIE, 2003, 4897: 237—245.
- [6] Shen H T, Pan A D. The Turbidity Maximum in the Changjiang Estuary [M]. Beijing: Ocean Press, 2001: 1, 28—51. [沈焕庭, 潘安定. 长江河口最大浑浊带 [M]. 北京: 海洋出版社, 2001: 1, 28—51.]
- [7] Yun C X. Recent Developments of the Changjiang Estuary [M]. Beijing: Ocean Press, 2004. [恽才兴. 长江河口近期演变基本规律 [M]. 北京: 海洋出版社, 2004.]
- [8] Shen H T, Li J F, Zhu H F, et al. Suspended Sediment Transported Characteristics in the Yangtze River [J]. Journal of Sediment Research, 1986, (1): 1—12 [沈焕庭, 李九发, 朱慧芳等. 长江河口悬沙输移特性 [J]. 泥沙研究, 1986, (1): 1—12.]
- [9] Pu R L, Gong P. Hyperspectral Remote Sensing and its Application [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000 [浦瑞良, 宫鹏. 高光谱遥感及其应用 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.]
- [10] Chen S P, Tong Q X, Guo H D. Mechanism Research of Remote Sensing Information [M]. Beijing: Science Press, 1998 [陈述彭, 童庆禧, 郭华东. 遥感信息机理研究 [M]. 北京: 科学出版社, 1998.]
- [11] Slater P N. Remote Sensing Optics and Optical System [M]. Addison Wesley, Reading, MA, 1983.
- [12] Han L H, Rundquist D C. The Response of Both Surface Reflectance and the Underwater Light Field to Various Levels of Suspend Sediments. Preliminary Results [J]. Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 1994, 60(12): 1463—1471.
- [13] S Pat, Jr Chavez. Imaged-based Atmospheric Corrections—revisited and Improved [J]. Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 1996, 62(9): 1025—1036.
- [14] Liu J G, Wu C S, Zhang B, et al. Spectral Reflectance Retrieval of Image Data by Imaging Spectrometer PHI [J]. Journal of Remote Sensing, 1999, 3(4): 290—294. [刘建贵, 吴长山, 张兵等. PHI 成像光谱图像反射率转换 [J]. 遥感学报, 1999, 3(4): 290—294.]
- [15] Yun C X, Shi W R, He Q. A Dynamic Analysis of Sediment Field of Sea-entering Waterway in the Changjiang Estuary [J]. Journal of East China Normal University. Special Issue of the Deep Waterway Regulation and Ports Construction in Changjiang Estuary, 1995, 21(4): 50—79. [恽才兴, 时伟荣, 何青. 长江口通海航道泥沙场动态分析 [J]. 长江口深水航道治理与港口建设专辑. 华东师范大学学报, 1995, 21(4): 50—79.]