

近海水体悬浮物 HJ-1 号小卫星 CCD 定量反演研究

肖艳芳, 赵文吉, 朱琳

(首都师范大学 三维信息获取与应用教育部重点实验室, 北京 100048)

摘要: 基于 HJ-1 号小卫星 CCD 数据, 开展近海水体悬浮物含量监测研究。采用邻近清洁水体和同日 MODIS 气溶胶产品的方法对 CCD 辐亮度数据进行较精准的大气校正; 利用得到的水体遥感反射率, 结合地面准同步实测悬浮物含量数据建立悬浮物反演模型, 获得研究区悬浮物的空间分布。模型的相关系数 R^2 为 0.849, 平均误差为 33.0%, 反演结果较为理想。结果表明, HJ-1 号小卫星作为中国首个灾害监测小卫星星座, 能够实现定量反演近海水体的悬浮物含量, 对中国近海水体水质的监测和治理具有重要意义。

关键词: HJ-1 号小卫星 CCD; 近海水体; 大气校正; 悬浮物

中图分类号: TP79

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2012)08-0059-05

悬浮物浓度是衡量近海水体水质的重要参数之一, 受涨落潮流、波浪、沿岸流、地形等的共同作用, 近海水体悬浮物含量的时空分布变化十分复杂^[1]。目前遥感技术是进行系统的、大面积的水文泥沙监测, 以及研究悬浮物时空分布和变化特征的最重要手段, 国内外学者针对不同传感器开展了大量的研究工作^[2-12]。中国于 2008 年 9 月成功发射 HJ-1 号 A、B 两颗光学小卫星, 两星上都装有宽覆盖多光谱 CCD 可见光相机, 单台相机幅宽 360 km, 两台相机拼幅后幅宽大于 700 km, 可以形成对监测区域的大范围覆盖, 设置有 4 个谱段 (0.43~0.52, 0.52~0.60, 0.63~0.69, 0.76~0.90 μm), 地面像元分辨率优于 30 m; 两颗星组网可在 48 h 内对同一地区重访; 超大幅宽和较高的时间分辨率满足了环境监测实时、快速和大范围的需求。

本研究以渤海湾曹妃甸附近海域为研究区, 结合野外悬浮物采样数据和实测水体光谱数据, 探讨 HJ-1 号小卫星 CCD 数据监测近海水体悬浮物浓度的方法, 为推进国产卫星在近海水环境中的应用提供一定的理论技术支撑。

1 数据来源及处理

曹妃甸位于河北省东北部, 处于渤海湾西北侧海域, 该海域主要受渤海潮波系统控制, 属不规则半日潮。海域沉积物类型主要由砂、中砂、细砂、粉砂和粉砂质黏土、黏土质粉砂组成, 其中以黏土质粉砂与细粉砂为主^[13]。分别于 2009 年 6 月 13 日、22 日、23 日和 25 日在渤海湾的曹妃甸附近海域进

行了 4 个断面的观测, 得到 4 个断面共 44 个观测点的悬浮物浓度和实测光谱数据(图 1)。

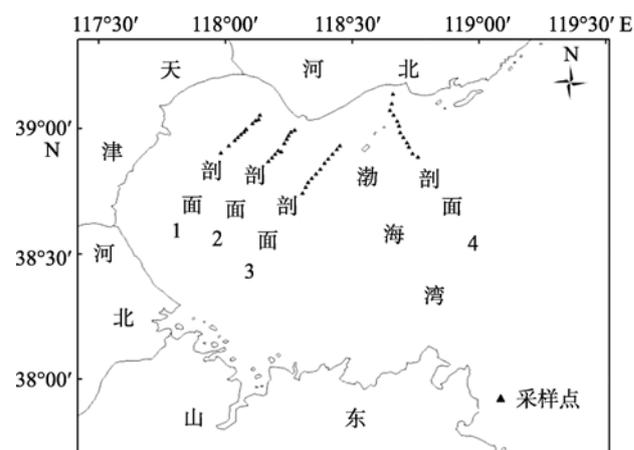


图 1 研究区位置及实验样点布置

Fig. 1 Study area and sampling locations

1.1 悬浮物质量浓度数据

取表层水样, 在实验室中按照《海洋调查规范》采用滤膜法测量悬浮物质量浓度。所用滤膜为孔径 0.45 μm 的醋酸纤维膜, 在真空过滤器中过滤悬浮物水样, 将滤膜高温烘干后称质量得到悬浮物质量浓度。悬浮物质量浓度范围在 2.2 ~ 208.7 mg/L 之间, 梯度变化较大, 其中 58% 样点的悬浮物质量浓度低于

收稿日期: 2010-10-20; 修回日期: 2012-02-27

基金项目: 国家科技支撑计划重点项目(2007BAH15B02)

作者简介: 肖艳芳(1985-), 女, 山东潍坊人, 博士研究生, 主要从事生态遥感研究, E-mail: xiaoyanfang2006@126.com

20 mg/L, 仅有 12%样点的悬浮物质量浓度高于 100 mg/L, 图 2 为悬浮物质量浓度的直方图分布。

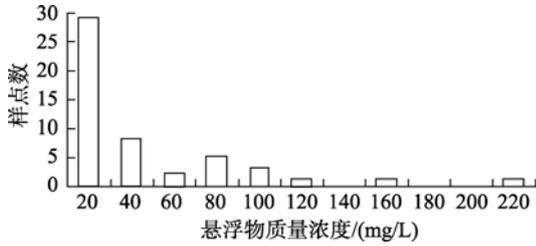


图 2 悬浮物质量浓度直方图

Fig. 2 Histogram of concentrations of suspended sediment

1.2 现场光谱数据

利用美国 ASD 公司生产的光谱仪, 采用水面上测量法^[14]在每个采样点依次采集标准板、水体、天空光的光谱曲线, 其中每个样点水体的光谱曲线采集 20 条。

为了尽量减少天空光直射反射和白帽的影响, 在数据的后期处理中, 舍弃数值较高的曲线, 利用较低的几条曲线进行计算。遥感反射率的计算公式为:

$$R_{rs} = [S_{sw} - rS_{sky}] \rho_p / \pi S_p \quad (1)$$

其中, S_{sw} , S_{sky} , S_p 分别为光谱仪朝向水体、天空和标准板所获得的辐亮度测量值; r 为海表反射率, 根据测量当天的风速情况, 取 $r=0.026$ ^[14]; ρ_p 为标准板反射率。

虽然测量过程中尽量避免无效数据的产生, 但是由于天气原因, 仍有一些样点无法获得有效的水体反射率。最终得到 33 个样点的水体反射率如图 3 所示。

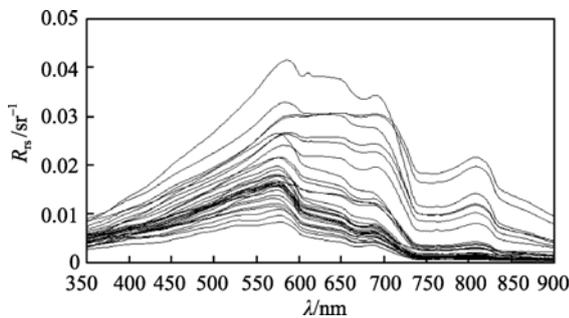


图 3 样点水体实测遥感反射光谱曲线

Fig. 3 Remote sensing reflectance spectra of samples

图 3 表现了近海水体光谱的典型特征: 总体上看, 水体在每个波段的反射率都较低, 除在高浓度

泥沙水体, 反射率的最大值一般不会超过 0.05; 随着悬浮物质量浓度的升高, 光谱反射率不断增加。550~700 nm 有一较宽的反射峰, 峰值位置出现在 580 nm 左右, 在这一波段内, 水体反射率相对较高且减小相对平缓; 700 nm 后反射率急剧下降, 波谷位置出现在 750 nm 附近; 810 nm 处出现第二个反射峰。

1.3 HJ-1 号小卫星 CCD 数据及其大气校正处理

由于水色信息只占卫星接收到信号的很小一部分, 因此, 水色信息遥感定量反演的基础是要进行精确的大气校正。本文首先得到 HJ-1 号 A 星 CCD 影像的辐亮度数据, 基于 MODIS 的同日气溶胶产品和选取邻近清洁水体离水辐射为 0 的方法得到 HJ-1 号 A 星 CCD 影像的水体反射率数据^[2,15-16]。

不考虑太阳直射反射和海面白帽信号, 卫星接收到的总辐亮度为:

$$L_t(\lambda) = L_r(\lambda) + L_a(\lambda) + t(\lambda)L_w(\lambda) \quad (2)$$

其中, L_r 为大气分子 Rayleigh 散射; L_a 为大气气溶胶散射; L_w 为离水辐亮度; t 为大气漫射透过率; λ 为波长。

L_r 可通过下式计算^[17]:

$$L_r(\theta, \phi, \theta_0, \phi_0, \lambda) = \frac{F_0(\lambda)\omega_0(\lambda)\tau_r(\lambda)}{\cos \theta} (P_r(\alpha_-) + [\rho(\theta) + \rho(\theta_0)]P_r(\alpha_+)) \quad (3)$$

其中, $\cos(\alpha_{\pm}) = \pm \cos \theta \cos \theta_0 + \sin \theta \sin \theta_0 \cos(\phi - \phi_0)$, θ, ϕ 分别为对应像元到传感器之间连线所构成的向量的天顶角和方位角, θ_0, ϕ_0 分别为对应像元与太阳之间连线所构成的向量的天顶角和方位角, α 为两个向量之间的夹角; 在避开水汽和氧气吸收波段的条件下 ω_0 近似等于 1; τ_r 为大气分子散射光学厚度, 可由地面实际大气压直接计算得到; ρ 为水-气界面反射率; F_0 为经过臭氧吸收订正的大气层外太阳辐照度; $P_r(\alpha) = (3/16\pi)(1 + \cos^2 \alpha)$ 为分子散射相函数。

L_a 可通过下式计算: 在邻近海域选取清洁水体, 可近似认为 $L_w(\lambda_4)$ 为 0, 该波段的分子散射 L_r 可通过上文计算得到, 忽略太阳直射反射, 白帽已修正或忽略, 则有:

$$L_a(\lambda_4) = L_t(\lambda_4) - L_r(\lambda_4) \quad (4)$$

根据前人的研究结果^[18], 包含多次散射的 L_a 之间具有以下关系:

$$\frac{L_a(\lambda_i)/F_0(\lambda_i)}{L_a(\lambda_j)/F_0(\lambda_j)} = \varepsilon(\lambda_i, \lambda_j) = \exp[c(\lambda_j - \lambda_i)] \quad (5)$$

选取 MODIS 的两个近红外波段(第 5 和第 6 波段)计算得到常数 c , 进一步可求得其他波段的气溶胶散射。

t 的计算:

$$t(\lambda) = \exp\left[-\left(\frac{\tau_r(\lambda)}{2} + \tau_{oz}(\lambda)\right) / \cos\theta\right] t_a(\lambda) \quad (6)$$

其中, τ_{oz} 为臭氧层光学厚度; t_a 为气溶胶散射与吸收的透过率, 由于其弱吸收和强烈的前向散射特性, 本文取 $t_a=1.0$ 。

归一化离水辐亮度 L_{wn} :

$$L_{wn}(\lambda_i) = L_w(\lambda_i) / [t_0(\lambda_i) \cos\theta_0] \quad (7)$$

其中, $t_0 = \exp[-(\tau_r/2 + \tau_{oz}) / \cos\theta_0]$ 为太阳方向的漫射透过率。

遥感反射率 R_{rs} :

$$R_{rs}(\lambda_i) = L_{wn}(\lambda_i) / \langle F_0 \rangle \quad (8)$$

其中, $\langle F_0 \rangle$ 为平均日地距离大气层外太阳辐照度。

2 近海水体成分反演算法的建立

影像获取时间为 2009 年 6 月 23 日, 选取 6 月 22 日、23 日和 25 日三条剖面的 33 个采样点用于建立模型, 悬浮物质量浓度较低时, 水体的反射率受到其他组分的影响也较大, 因此, 选用悬浮物质量浓度大于 5 mg/L 的 26 个采样点。随机从中抽取 6 组数据用于模型验证, 剩余 20 组数据用于模型构建。经对比分析, 选取 HJ-1 号小卫星 CCD 影像的第二波段(0.52 ~ 0.60 μm)和第三波段(0.63 ~ 0.69 μm)作为悬浮物质量浓度反演的主要波段。建立反演模型: $S = \exp(10\,944.06b_2b_3 + 0.843\,923\,2)$, S 为悬浮物质量浓度, 单位: mg/L, 相关系数 $R^2=0.849$ 。图 4 显示了悬浮物质量浓度与水体反射率的关系, 表 1 为

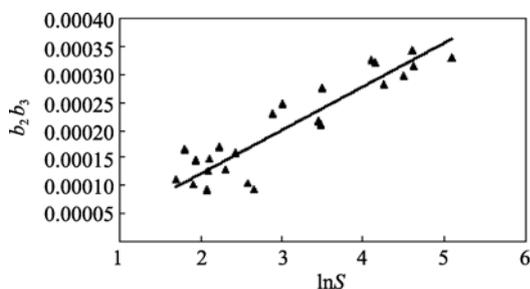


图 4 悬浮物质量浓度对数值 $\ln S$ 与水体反射率的关系曲线
Fig. 4 Relationship spectra between $\ln S$ and reflectance

表 1 悬浮物质量浓度实测值、预测值及误差

Tab. 1 Actual values, predictive values and errors

悬浮物质量浓度 (mg/L)		绝对误差 (mg/L)	相对误差 (%)
实测值	预测值		
161.8	86.3	75.5	46.6
100.7	73.0	27.7	27.5
100.0	99.4	0.7	0.7
89.1	60.7	28.4	31.8
70.1	51.3	18.8	26.8
63.1	78.2	15.1	24.0
60.6	83.0	22.4	37.0
33.0	47.9	14.9	45.2
32.2	23.3	8.9	27.8
31.5	24.7	6.8	21.5
21.9	13.0	8.9	40.8
20.3	35.0	14.7	72.7
17.8	29.0	11.2	62.7
14.3	6.5	7.8	54.7
13.3	7.3	6.0	45.5
11.4	13.5	2.1	18.3
11.3	13.0	1.7	14.7
10.1	9.5	0.6	6.3
9.3	15.0	5.7	61.6
8.3	11.9	3.6	43.3
8.1	9.3	1.2	14.8
7.6	7.8	0.2	3.2
7.6	13.5	5.9	77.5
7.5	7.3	0.2	3.3
6.8	7.2	0.4	6.2
5.5	7.8	2.3	42.6

模型的验证结果。平均相对误差 33.0%, 最小相对误差 0.65%, 最大相对误差 77.5%。

3 悬浮物质量浓度反演及空间分布分析

利用上述模型计算每个像元的悬浮物含量, 将悬浮物含量按照高低分级, 得到曹妃甸附近海域的悬浮物质量浓度的分级图(图 5)。

由图 5 可以看出, (1)总体上看, 悬浮物含量呈现距离海岸越远含量越低的趋势, 高悬浮物含量水域主要位于近岸边滩。绝大部分海域的悬浮物质量浓度不超过 20 mg/L。(2)曹妃甸附近海域悬浮物含量普遍不高, 这是因为曹妃甸港区的大面积围垦阻挡了波浪向浅滩传播, 减少了对底质泥沙的扰动, 使得

近岸水体的悬浮物浓度大幅降低。

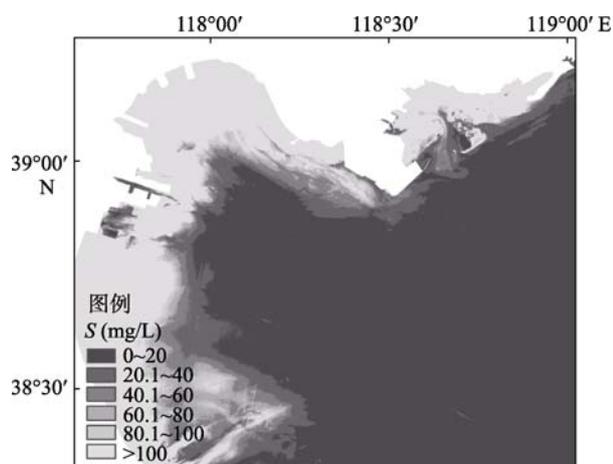


图 5 2009 年 6 月 25 日悬浮物质量浓度分级图

Fig. 5 Grading map of suspended sediment concentration on June 25, 2009

4 结论

本文通过较为精确的大气校正,初步尝试利用 HJ-1 号小卫星 CCD 相机数据定量反演近海水体悬浮物含量,基于实测数据所建立的悬浮物反演模型能够较准确地反映研究区悬浮物含量的分布情况,模型具有一定的精度,反演结果与实测数据基本吻合。HJ-号小卫星 CCD 数据相对于海洋卫星数据具有较高的空间分辨率,有利于监测较小范围内的悬浮物的分布。同时其较高的时间分辨率在动态监测近海悬浮物空间分布格局变化、天气原因造成的短期扰动及季节性差异等方面具有很强的优势。在今后的研究中,需要进一步改进反演算法,提高模型的适用性;同时,加强利用 HJ-号小卫星 CCD 数据监测近海水体其他重要水质参数,如叶绿素 a、黄色物质等的研究。

致谢:在野外数据获取工作中,天津地质调查中心柳福田等人在光谱测量、水质参数获取方面做了大量指导工作,同时为本研究提供了悬浮物质量浓度数据,在此表示衷心的感谢!

参考文献:

- [1] 戴志军,韩震,恽才兴,等. 茂名海域水体表层悬浮泥沙浓度时空分布特征的遥感分析[J]. 海洋科学进展, 2006, 24(4): 455-462.
- [2] 唐军武,马超飞,牛生丽,等. CBERS-02 卫星 CCD 相机资料量化反演水体成分初探[J]. 中国科学 E

辑, 2005, 35(增刊): 156-170.

- [3] 崔廷伟,张杰,马毅,等. 渤海悬浮物分布的遥感研究[J]. 海洋学报, 2009, 31(5): 10-18.
- [4] 李四海,恽才兴. 河口表层悬浮泥沙气象卫星遥感定量模式研究[J]. 遥感学报, 2001, 5(2): 154-160.
- [5] 温小乐,徐涵秋. 基于多源同步数据的闽江下游悬浮物定量遥感[J]. 环境科学, 2008, 29(9): 2441-2447.
- [6] Gordon H R, Morel A Y. Remote assessment of ocean color for interpretation of satellite visible imagery, A Review [R]. New York: Springer-Verlag, 1983.
- [7] Reddy M A. Remote sensing for mapping of suspended sediment in Krishna Bay estuary, Abdhra Praesh, India[J]. International Journal of Remote Sensing, 1993, 814(11): 2215-2221.
- [8] Li Yan, Wei Huang, Ming Fang. An algorithm for the retrieval of suspended sediment in coastal waters of China from AVHRR data [J]. Continental Shelf Research, 1998, 18: 487-500.
- [9] Doxaran D, Froidefond J. Spectral signature of highly turbid waters application with SPOT data to quantify suspended particulate matter concentrations [J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 81(1): 149-161.
- [10] Michael F, Bouchra N, Dries V E. An estimate of the suspended particulate matter(SPM) transport in the southern North Sea using SeaWiFS images, in situ measurements and numerical model results [J]. Continental Shelf Research, 2007, 27: 1568-1583.
- [11] Marieke A E, Reinold P, Hendrik J, et al. Remotely sensed seasonality in the spatial distribution of sea-surface suspended particulate matter in the southern North Sea [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2008, 80: 103-113.
- [12] 刘大召,张辰光,付东洋,等. 基于高光谱数据的珠江口表层水体悬浮泥沙遥感反演模式[J]. 海洋科学, 2010, 34(7): 77-80.
- [13] 李建国,孙晓明,康慧,等. 曹妃甸近海 II 类水体光谱反射率与悬浮泥沙浓度相关性研究[J]. 国土资源遥感, 2009, 3: 54-58.
- [14] 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, 1(8): 37-43.
- [15] 许勇,张鹰,刘吉堂,等. MODIS 辅助的北京一号卫星影像近海 II 类水体大气校正[J]. 海洋科学进展, 2009, 27(1): 66-73.
- [16] 于堃,陆殿梅. 二类水体的 MODIS 数据大气校正及

在渤海表层水体叶绿素浓度监测反演中的应用研究[J].
海洋通报, 2009, 28(5): 21-27.

- [17] Gordon H R. Radiative transfer in the atmosphere for correction of ocean color remote sensing[C]//Barale V, Schlittenhardt P M. Ocean Color: Theory and Applica-

tions in a Decade of CZCS Experience. London: Kluwer Academic Publishers, 1993: 33-77.

- [18] Wang M H, Gordon H R. A simple moderate accurate atmospheric correction algorithm for SeaWiFS[J]. Remote Sensing of Environment, 1994, 50: 231-239.

Quantitative retrieval model of suspended sediment concentration in estuary based on HJ-1 CCD image

XIAO Yan-fang, ZHAO Wen-ji, ZHU Lin

(Key Laboratory of Three Dimension Information Acquisition and Application of Ministry of Education, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

Received: Oct., 20, 2010

Key words: HJ-1 CCD image; estuary; atmospheric correction; suspended sediment

Abstract: On the basis of HJ-1 CCD image, remote sensing detection of suspended sediment concentration in estuary was carried out. A method using clean water nearby and the aerosol product relevant to the moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) data was adopted to carry out the accurate atmospheric correction. The calculated water reflectance and the measured suspended sediment concentration was used to establish the quantitative retrieval model and get the spatial distribution for suspended sediment concentration in study area. The R^2 of this model was 0.849, the mean error was 33.0%, and the result was satisfactory. The study showed that HJ-1 CCD image could be applied to detect the suspended sediment concentration in estuary.

(本文编辑: 刘珊珊)