

# 江苏近岸海域 HJ CCD 影像悬浮泥沙遥感反演

王 林<sup>1</sup>, 杨建洪<sup>2</sup>, 李冠男<sup>1,3</sup>, 陈艳拢<sup>1</sup>, 孟庆辉<sup>1</sup>

(1. 国家海洋环境监测中心 海域监管中心, 辽宁 大连 116023; 2. 深圳市朗诚科技股份有限公司, 广东 深圳 518029; 3. 大连海事大学 环境科学与工程学院, 辽宁 大连 116026)

**摘要:** 基于 2012~2014 年期间江苏近岸海域实测遥感反射率、悬浮泥沙浓度及 HJ CCD 数据, 建立该海域 HJ CCD 影像悬浮泥沙遥感反演模型。通过研究水体实测反射光谱特征, 确定对悬浮泥沙浓度变化的敏感波段, 并与悬浮泥沙浓度进行函数拟合分析。结果表明: 将 HJ CCD Band3 的等效遥感反射率、HJ CCD Band3 与 Band2 等效遥感反射率的比值分别作为敏感因子, 并采用对数函数模拟低值区、指数函数模拟高值区获得的叠加模型表现最为突出。通过卫星应用发现, 第 2、3 波段比值模型的遥感反演结果与实际情况相符, 可有效削弱大气校正、表观反射率到遥感反射率的转换方法以及 HJ CCD 辐射分辨率较低等一系列问题的干扰, 为江苏近岸海域 HJ CCD 悬浮泥沙遥感反演的最优模型。

**关键词:** 悬浮泥沙; 遥感反演; HJ CCD 影像; 江苏近海

中图分类号: P76 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2016)02-0077-07

doi: 10.11759/hyqx20141028001

江苏近岸海域由北至南包括海州湾、废黄河口、辐射沙洲与长江口北支口外海域, 领海面积  $3.2 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 国土面积  $3.25 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 约占全省国土面积的 31.6%<sup>[1-2]</sup>。受长江口径流、苏北浅滩等自然因素的影响, 高悬浮泥沙含量成为江苏近岸海域的主要水体特征之一, 而其分布、扩散特征对沿岸沉积环境、河口岸滩塑造、海水物理化学性质等研究均具有重要的理论和现实意义。传统的悬浮泥沙监测方法需要耗费较多的人力、物力与财力, 而且采样点布设的数量有限, 监测周期较长, 难以有效的对整体水域进行大尺度、动态的监测。海洋水色遥感技术以独特的优势为悬浮泥沙监测开辟了新的途径, 它可以实现对水体快速、大范围、低成本、周期性的动态监测, 具有不可替代的优越性。目前, 国内外学者对悬浮泥沙的遥感反演已开展了大量研究工作, 反演方法主要分为 3 类: 经验算法<sup>[3-5]</sup>、物理算法<sup>[6]</sup>以及半分析算法<sup>[7-8]</sup>, 其中后两种算法具有一定的物理机理, 但需要输入大量现场实测数据(如吸收系数、后向散射系数、遥感反射率、各水色组分浓度等), 难以普遍应用, 相反经验算法虽无物理机理, 但仅需要实测的遥感反射率与悬浮泥沙数据, 且形式简单, 因此应用较广; 选用的卫星传感器主要包括: 水色卫星传感器(CZCS、SeaWiFS、MERIS、MODIS、GOCI 等)<sup>[9-13]</sup>、陆地卫星传感器(TM、ALI、HJ CCD、GF CCD 等)<sup>[14-17]</sup>, 两者具有不同的光谱和

时空分辨率; 此外, 已有的研究海域主要包括辽东湾、曹妃甸近海、黄河口、射阳河口、长江口、杭州湾、珠江口、渤海、黄东海等<sup>[5, 12, 18-24]</sup>。作者将利用 2012~2014 年期间的实测数据, 建立基于 HJ CCD 影像的江苏近岸海域悬浮泥沙遥感反演模型。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区域与站位分布

研究区域选择在中国江苏近岸海域。调查于 2012 年 10 月、2013 年 10 月及 2014 年 5 月期间完成, 其中, 2012 年获取数据 24 组、2013 年 24 组、2014 年 17 组, 具体站位分布如图 1 所示。

### 1.2 数据获取与分析

#### 1.2.1 光谱数据

现场光谱测量采用水面之上法<sup>[25]</sup>, 实验仪器为美国 ASD 公司生产的双通道光谱辐射计。仪器观测平面与太阳入射平面的夹角为  $135^\circ$ , 仪器与海面法线方向的夹角为  $40^\circ$ , 以避免绝大部分的太阳直射反

收稿日期: 2014-10-28; 修回日期: 2014-12-03

基金项目: 国家海洋公益性行业科研专项经费项目(201205005)

[Foundation: National Marine Public Welfare Research Project of China, No.201205005]

作者简介: 王林(1981-), 男, 河北沧州人, 助理研究员, 硕士, 主要从事海洋光学和水质遥感研究, 电话: 0411-84781400, E-mail: lwang@nmemc.org.cn

射,并减少船舶阴影的影响。遥感反射率  $R_{rs}$  按如下公式计算:

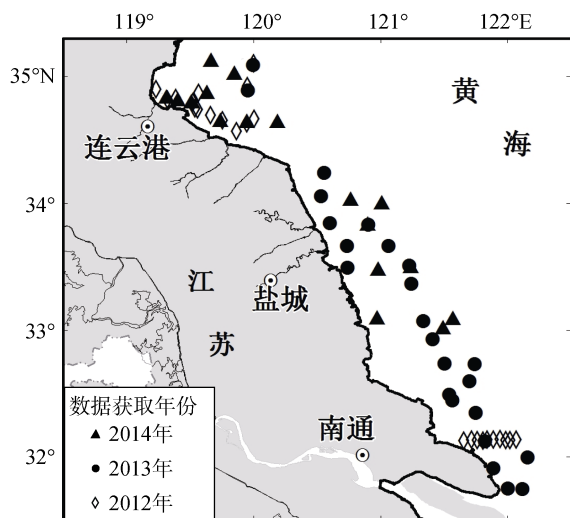


图 1 江苏近岸海域外业调查站位

Fig. 1 Research cruise stations in Jiangsu coastal sea

$$R_{rs} = \left[ L_{sw} - rL_{sky} \right] \rho_p / L_p \pi \quad (1)$$

式中,  $L_{sw}$  为测量水体的辐亮度;  $r$  为气-水界面天空漫散射光的反射率, 一般情况可取 0.028, 平静海面时取 0.026<sup>[26]</sup>;  $L_{sky}$  为天空漫散射光的辐亮度;  $\rho_p$  为标准灰板的反射率;  $L_p$  为测量标准板的辐亮度。

获取现场水体 ASD 光谱遥感反射率后, 根据 HJ CCD 的光谱响应函数进行实测  $R_{rs}(\lambda)$  的波段等效处理, 具体公式如下:

$$R_{rs}(\text{Bandx}) = \frac{\int_{400nm}^{1000nm} R_{rs}(\lambda) F_s(\lambda) S_x(\lambda) d\lambda}{\int_{400nm}^{1000nm} F_s(\lambda) S_x(\lambda) d\lambda} \quad (2)$$

式中,  $R_{rs}(\text{Bandx})$  为 HJ 星 CCD 传感器 Bandx 波段的等效遥感反射率;  $R_{rs}(\lambda)$  为 ASD 光谱仪现场获取遥感反射率;  $F_s(\lambda)$  为日地平均距离处大气层外太阳辐照度;  $S_x(\lambda)$  为 Bandx 波段的光谱响应函数。

### 1.2.2 悬沙浓度数据

水样采集与光谱测量同步进行。悬浮泥沙的测量采用称重法, 玻璃纤维滤膜过滤水样后, 在 450℃ 条件下高温煅烧 4h 除去有机颗粒物后, 称重无机颗粒(即悬浮泥沙)的质量, 除以样品的体积即得到悬浮泥沙的浓度。

### 1.2.3 卫星数据

本研究选用 2014 年 5 月 28 日 01:46 成像的 HJ1B-CCD1 影像数据, 空间分辨率为 30 m, 重访周期为 2 d, 包括 0.43~0.52  $\mu\text{m}$ , 0.52~0.60  $\mu\text{m}$ , 0.63 ~

0.69  $\mu\text{m}$ , 0.76~0.90  $\mu\text{m}$  4 个波段。影像的预处理主要有: 辐射校正、几何校正和大气校正。

辐射校正: 利用中国资源卫星应用中心官网提供的《2014 年国产陆地观测卫星绝对辐射定标系数》<sup>[27]</sup>将 CCD 影像 DN 值转换为辐亮度数据。

几何校正: 选用经过空间配准的底图为参考图像, 在 ENVI 4.7 软件支持下对 HJ1B-CCD1 影像进行几何校正, 图像重采样采用最近邻点法, 总误差控制在 0.5 个像元内。

大气校正: 采用 ENVI 4.7 软件下的 FLAASH 大气校正模块对 HJ1B-CCD1 数据进行大气校正, 输入相关参数, 计算得到大气校正后的表观反射率数据。

表观反射率数据转化为遥感反射率的方法包括两种, 其一<sup>[28]</sup>为:

$$R_{rs} = \rho_w / \pi \tau_0 \quad (3)$$

$$\tau_0 = \exp(-\tau_r \cos \theta_0 / 2) \quad (4)$$

式中,  $\rho_w$  为表观反射率;  $\tau_0$  为太阳光漫射透射率;  $\tau_r$  为瑞利光学厚度, 可根据模型计算得到;  $\theta_0$  为太阳天顶角。然而, 研究者出于简化考虑, 通常将  $\tau_0$  忽略。

其二<sup>[29]</sup>为:

$$R_{rs} = \frac{(1-\rho)(1-\bar{\rho})\rho_w}{n^2 Q(1-r\rho_w)} \quad (5)$$

式中,  $\rho$  为气-水界面的菲涅耳反射率;  $\bar{\rho}$  为海表面对总辐照度的漫反照率, 其均值为 0.043;  $n$  为水的折射指数;  $Q$  取 4.5(依赖于水体光场分布); 分母中的  $(1-r\rho_w)$  为对表面下向上辐射的内部反射的修正,  $r \approx 0.48$ , 它随  $\rho_w$  的不同有些许变化。

## 2 结果与分析

### 2.1 反射光谱特性

江苏近岸海域实测遥感反射率光谱曲线和 HJ CCD 波段范围设置如图 2 所示, 可发现研究区实测光谱存在明显的双峰特征: 主峰位置在 550~730 nm, 次峰位于 760~830 nm。悬浮泥沙浓度较低时, 主峰位于 570~600 nm, 峰型相对尖锐, 次峰则非常低, 主峰远高于次峰; 随着悬浮泥沙浓度的增大, 主峰出现红移, 且峰型加宽, 峰值波长可达 710 nm, 次峰清晰可见, 但位置基本不变, 峰高逐渐接近主峰。此外, 随着悬浮泥沙浓度的增大, 各波段的遥感反射率都普遍增大, 但其增幅并不相同。Band 1 范围内, 谱线高低变化较小, 尤其高悬浮泥沙时很难区分, 该波段对悬浮泥沙浓度的变化并不敏感。Band 2 次之, Band 4 较佳, 而 Band 3 最优。

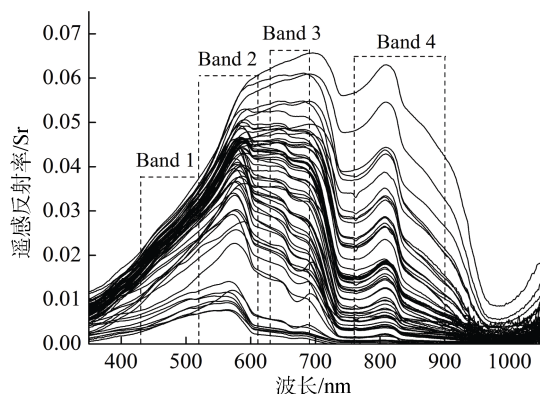


图2 江苏近岸海域实测遥感反射率曲线和 HJ CCD 波段范围

Fig. 2 Field spectral reflectance curves of Jiangsu coastal sea and HJ-CCD band settings

## 2.2 反演模型建立与验证

根据 HJ CCD 波段响应函数计算对应波段的等效遥感反射率, 并构建单波段、波段比值及多波段悬

浮泥沙反演敏感因子。这里, 以数据梯度分布均匀为前提, 随机选取实测数据中 50 组用于建模, 剩余 15 组用于模型验证。模型形式采用对数函数和指数函数两种, 模型优劣采用拟合决定系数和平均相对误差评价, 结果如表 1 所示。可发现, 单波段模型中, 第 3 波段作为敏感因子, 采用对数模型拟合的决定系数较高, 为 0.90, 其反演结果的平均相对误差也较小, 为 26.3%; 波段比值模型中, 选择第 4 与第 2 或第 3 波段的比值作为敏感因子, 采用指数模型拟合的决定系数最高, 可达 0.96, 但其反演结果的平均相对误差非常大, 而第 3 与第 2 波段的比值作为敏感因子, 对数函数作为模型形式, 其反演结果的平均相对误差最小, 低于 20%, 模型拟合的决定系数也非常高, 为 0.92; 多波段模型中, 两种函数形式拟合的决定系数均较高, 但其反演结果的平均相对误差非常大。因此, 选择第 3 波段、第 3 与第 2 波段比值作为敏感因子, 并采用对数函数拟合所得的模型较佳。

表 1 江苏近岸海域悬浮泥沙反演模型及验证结果

Tab. 1 SSC retrieval models and validation results in Jiangsu coastal sea

敏感因子( $R$ )	对数模型( $SSC=10^{a+b \times R}$ )		指数模型( $SSC=a \times e^{b \times R}$ )	
	拟合决定系数	平均相对误差(%)	拟合决定系数	平均相对误差(%)
$R_{rs}(B1)$	0.60	74.9	0.39	131.1
$R_{rs}(B2)$	0.67	46.1	0.52	75.2
$R_{rs}(B3)$	0.90	26.3	0.73	57.5
$R_{rs}(B4)$	0.78	67.8	0.88	255.5
$R_{rs}(B2)/R_{rs}(B1)$	0.30	55.1	—	—
$R_{rs}(B3)/R_{rs}(B1)$	0.89	24.4	0.79	31.3
$R_{rs}(B4)/R_{rs}(B1)$	0.80	70.2	0.94	208.2
$R_{rs}(B3)/R_{rs}(B2)$	0.92	19.0	0.89	47.2
$R_{rs}(B4)/R_{rs}(B2)$	0.81	69.8	0.96	192.7
$R_{rs}(B4)/R_{rs}(B3)$	0.76	101.9	0.96	216.8
$R_{rs}(B4)/(R_{rs}(B1)+R_{rs}(B2)+R_{rs}(B3))$	0.82	68.1	0.96	184.1

然而, 进一步分析表现较佳的两敏感因子与悬浮泥沙浓度的散点图(图 3, 图 4)可看出:  $R_{rs}(B3)/R_{rs}(B2)$ 作为敏感因子时, 对数模型对悬浮泥沙高值区存在低估, 低值区拟合一致性良好; 而指数模型对悬浮泥沙低值区则存在严重低估, 高值区拟合一致性良好。因此, 将两拟合曲线交点作为临界值, 低于临界值采用对数模型, 高于临界值采用指数模型, 从而得到优化的叠加模型。而  $R_{rs}(B3)$ 作为敏感因子时, 不存在上述现象。

为验证模型的稳定性, 以所有站位的实测数据为验证对象, 将单波段对数模型和比值叠加模型的敏感因子加入 5%的随机误差, 验证模型的反演能力。结果显示, 单波段对数模型的最小相对误差为 0.13%, 最大相对误差为 29.77%, 平均相对误差为 9.14%; 比值叠加模型的最小相对误差为 0.33%, 最大相对误差为 42.33%, 平均相对误差为 12.93%。两种模型的整体稳定性较好, 单波段对数模型略优于比值叠加模型。

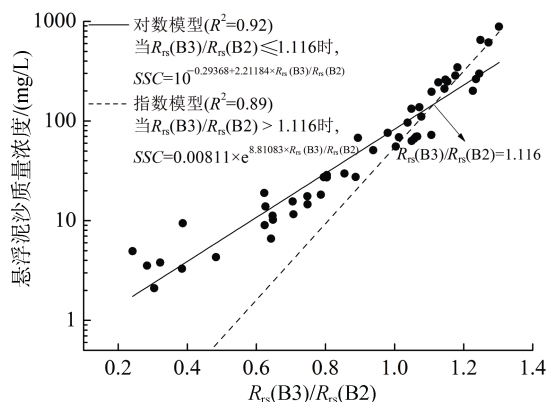


图3 HJ CCD Band3 和 Band2 波段等效遥感反射率的比值与悬浮泥沙质量浓度的拟合曲线

Fig. 3 Regression curves of suspended sediment concentration as a function of  $R_{rs}(B3)/R_{rs}(B2)$

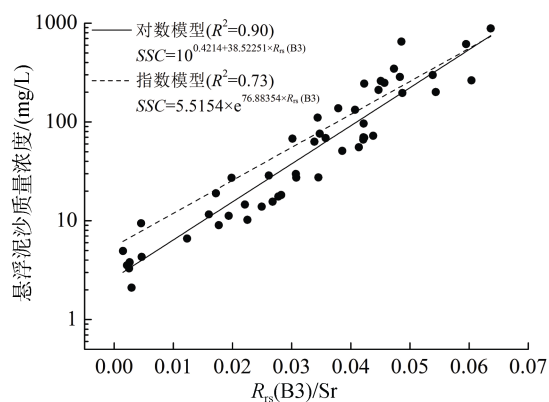


图4 HJ CCD Band3 波段等效遥感反射率与悬浮泥沙质量浓度的拟合曲线

Fig. 4 Regression curves of suspended sediment concentration as a function of  $R_{rs}(B3)$

### 2.3 卫星应用

对于水色卫星传感器(如 MODIS 等)而言, 大气校正是遥感产品反演的最关键环节。然而, 对于主要应用于陆地遥感的卫星传感器(如 HJ CCD)而言, 除大气校正外, 从表观反射率转换到遥感反射率是另一重要环节。研究表明, 模型形式对解决以上问题至关重要。

利用 ENVI 4.7 软件下 FLAASH 大气校正模块对 HJ CCD 数据进行大气校正, 发现能见度是校正精度的主要控制因子, 而其他输入因子影响相对较小。因此, 在输入准确的能见度数据前提下, 可认为大气校正结果准确。以下主要讨论表观反射率转换到遥感反射率和模型形式对悬浮泥沙遥感反演结果的影响。

从表观反射率转换到遥感反射率, 在相关文献中均提及较少, 对不同转换方法的差异分析尚未见报道。事实上, 采用 1.2.3 节中两种方法的转换结果差异非常大, 其中方法一转换结果出现明显高估, 方法二则恰恰相反。采用基于 HJ CCD Band3 的单波段对数模型会明显发现该问题的影响, 如图 5 所示, 与实际情况存在非常大的差异。除此之外, 陆地卫星传感器辐射分辨率较低, 致使其反演的悬浮泥沙浓度变化相对较小, 对于悬浮泥沙变化较大的海域, 反演误差非常大。

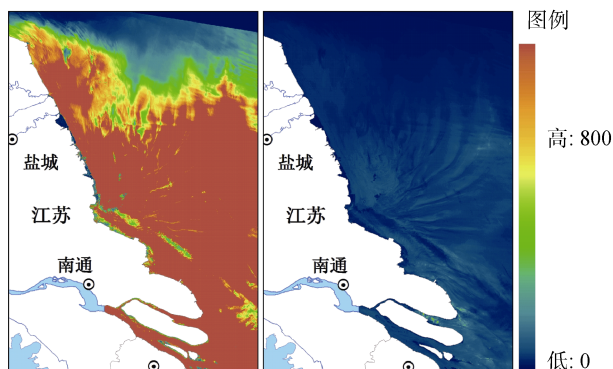


图5 表观反射率到遥感反射率转换方法对单波段对数模型反演结果的影响(左: 方法一; 右: 方法二)

Fig. 5 Effects on retrieval results of methods for converting apparent reflectance to remote sensing reflectance using single-band logarithmic model

相比而言, 无论采用法一或法二将表观反射率转换为遥感反射率, 对基于 HJ CCD Band3 与 Band2 波段比值的叠加模型反演结果的影响较小, 如图 6 所示, 反演结果与实际情况更为接近。与单波段对数

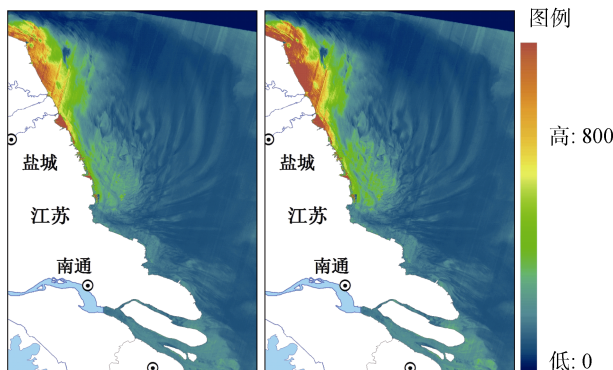


图6 表观反射率到遥感反射率转换方法对波段比值叠加模型反演结果的影响(左: 方法一; 右: 方法二)

Fig. 6 Effects on retrieval results of methods for converting apparent reflectance to remote sensing reflectance using band ratio superposition model

模型相比, 比值叠加模型可有效削弱大气校正、表观反射率到遥感反射率的转换方法以及卫星传感器辐射分辨率较低等一系列问题的干扰。因此, 可将比值叠加模型作为江苏近岸海域悬浮泥沙遥感反演的最优模型。

### 3 结论

随着悬浮泥沙浓度的增大, 各波段的遥感反射率都普遍增大, 但其增幅并不相同, 这为悬浮泥沙的遥感反演奠定了基础。通过不同波段组合的等效遥感反射率与悬浮泥沙浓度的拟合分析发现, 基于 HJ CCD Band 3 的单波段对数模型、HJ CCD Band 3 与 Band 2 的波段比值叠加模型均具有较高的拟合决定系数和较小的平均相对误差。然而, 经大气校正后得到的 HJ CCD 数据为表观反射率, 将其转换为遥感反射率的两种方法应用到 HJ CCD 时, 存在严重的高估或低估现象, 并且 HJ CCD 辐射分辨率较低, 所以单波段模型不适用于悬浮泥沙浓度变化非常大的江苏近岸海域。相比而言, Band 3 与 Band 2 的波段比值叠加模型对表观反射率到遥感反射率转换方法的依赖性大大降低, 遥感反演结果与实际情况一致性良好, 该模型还削弱了大气校正、卫星传感器辐射分辨率较低等问题的干扰, 有效提升了反演精度, 可作为江苏近岸海域 HJ CCD 悬浮泥沙遥感反演的最优模型。

#### 参考文献:

- [1] 邢飞, 汪亚平, 高建华, 等. 江苏近岸海域悬沙浓度的时空分布特征[J]. 海洋与湖沼, 2010, 41(3): 459-468.  
Xing Fei, Wang Yaping, Gao Jianhua, et al. Seasonal distributions of the concentrations of suspended sediment along Jiangsu coastal sea[J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 2010, 41(3): 459-468.
- [2] 姜晟, 李俊龙, 李旭文, 等. 江苏近岸海域富营养化现状评价与成因分析[J]. 环境监测与管理技术, 2012, 24(4): 26-29.  
Jiang Sheng, Li Junlong, Li Xuwen, et al. The eutrophication evaluation and cause analysis in Jiangsu coastal sea area[J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2012, 24(4): 26-29.
- [3] Doxaran D, Froidefond J M, Castaing P. Remote sensing reflectance of turbid sediment dominated waters. Reduction of sediment type variations and changing illumination conditions effects by use of reflectance ratios[J]. Applied Optics, 2003, 42: 2623-2634.
- [4] Han Z, Jin Y Q, Yun C X. Suspended sediment concentrations in the Yangtze River estuary retrieved from the CMODIS data[J]. International Journal of Remote Sensing, 2006, 27: 4329-4336.
- [5] Wang L, Zhao D Z, Yang J H, et al. Retrieval of total suspended matter from MODIS 250 m imagery in the Bohai Sea of China[J]. Journal of Oceanography, 2012, 68: 719-725.
- [6] Doerffer R, Fischer J. Concentrations of chlorophyll, suspended matter, and gelbstoff in case 2 waters derived from satellite coastal zone color scanner data with inverse modeling methods[J]. Journal of Geophysical Research, 1994, 99: 7457-7466.
- [7] Carder K L, Chen F R, Cannizzaro J P, et al. Performance of the MODIS semi-analytical ocean color algorithm for chlorophyll-a[J]. Advances in Space Research, 2004, 33: 1152-1159.
- [8] Morel A, Huot Y, Gentili B, et al. Examining the consistency of products derived from various ocean color sensors in open ocean (case 1) waters in the perspective of a multi-sensor approach[J]. Remote Sensing of Environment, 2007, 111: 69-88.
- [9] Cui T W, 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: 2326-2336.
- [10] Deng M, Li Y. Use of SeaWiFS imagery to detect three-dimensional distribution of suspended sediment[J]. International Journal of Remote Sensing, 2003, 24(3): 519-534.
- [11] Wu G F, De Leeuw J, Skidmore A K, et al. Comparison of MODIS and Landsat TM5 images for mapping temporal dynamics of Secchi disk depths in Poyang Lake national nature reserve, China[J]. International Journal of Remote Sensing, 2008, 29(8): 2183-2198.
- [12] Zhang M W, Tang J W, Dong Q, et al. Retrieval of total suspended matter concentration in the Yellow and East China Seas from MODIS imagery[J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114: 392-403.
- [13] He X Q, Bai Y, Pan D L, 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.
- [14] Zhou W, Wang S, Zhou Y, et al. Mapping the concentrations of total suspended matter in Lake Taihu, China, using Landsat-5 TM data[J]. International Journal of Remote Sensing, 2006, 27(6): 1177-1191.
- [15] Chen J, Cui T W, Qiu Z F, et al. A three-band semi-analytical model for deriving total suspended sediment concentration from HJ-1A/CCD data in turbid coastal waters[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2014, 93: 1-13.
- [16] 肖艳芳, 赵文吉, 朱琳. 近海水体悬浮物 HJ-1 号小卫星 CCD 定量反演研究[J]. 海洋科学, 2012, 36(8): 59-63.  
Xiao Yanfang, Zhao Wenji, Zhu Lin. Quantitative retrieval model of suspended sediment concentration in estuary based on HJ-1 CCD image[J]. Marine Sciences, 2012, 36(8): 59-63.
- [17] 丛丕福, 牛铮, 曲丽梅, 等. 基于神经网络和 TM 图

- 像的大连湾海域悬浮物质量浓度的反演[J]. 海洋科学, 2005, 29(4): 31-35.
- Cong Pifu, Niu Zheng, Qu Limei, et al. Retrieval of suspended sediment concentration in Dalian Bay on basis of neural network model and TM imagery[J]. Marine Sciences. 2005, 29(4): 31-35.
- [18] 张明, 冯小香, 郝媛媛. 辽东湾北部海域悬浮泥沙时空变化遥感定量研究[J]. 泥沙研究, 2011, 4: 15-21.
- Zhang Ming, Feng Xiaoxiang, Hao Yuanyuan. Quantitative remote sensing study on spatio-temporal variation of suspended sediment in North Liaodong Bay[J]. Journal of Sediment Research, 2011, 4: 15-21.
- [19] 奥勇, 王晓峰, 孔金玲, 曹妃甸近海表层悬浮泥沙遥感定量监测研究[J]. 测绘科学, 2011, 36(1): 77-80.
- Ao Yong, Wang Xiaofeng, Kong Jinling. Study on remote sensing quantitative model of suspended sediments in the coastal waters of Caofeidian[J]. Science of Surveying and Mapping, 2011, 36(1): 77-80.
- [20] 黄海军, 李成治, 郭建军. 黄河口海域悬沙光谱特征的研究[J]. 海洋科学, 1994, 5: 40-44.
- Huang Haijun, Li Chengzhi, Guo Jianjun. A study on the spectral feature of suspended matter in the Huanghe river delta area[J]. Marine Sciences, 1994, 5: 40-44.
- [21] 潘洁, 张鹰, 谭子辉. 基于高光谱的射阳河口悬浮泥沙浓度定量反演研究[J]. 海洋科学, 2011, 35(9): 85-90.
- Pan Jie, Zhang Ying, Tan Zihui. Modeling the suspended sediment content in Sheyang Estuary based on hyperspectral data[J]. Marine Sciences, 2011, 35(9): 85-90.
- [22] 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.
- [23] 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.
- Liu Dazhao, Zhang Chenguang, Fu Dongyang, et al. Hyperspectral data-based remote-sensing inversion model for suspended sediment in surface waters at the Pearl River Estuary[J]. Marine Sciences, 2010, 34(7): 77-80.
- [24] 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.
- Cui Tingwei, Zhang Jie, Ma Yi, et al. The study on the distribution of suspended particulate matter in the Bohai Sea by remote sensing[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2009, 31(5): 10-18.
- [25] GB/T 12763.5-2007 海洋调查规范-海洋声、光要素调查[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- GB/T 12763.5-2007 Specifications for oceanographic survey-Survey of acoustical and optical parameters in the sea[S]. Beijing: China Standard Press, 2007.
- [26] Mobley C D. Estimation of the remote-sensing reflectance from above-surface measurements[J]. Applied Optics, 1999, 38: 7442-7455.
- [27] 中国资源卫星应用中心. 2014 年国产陆地观测卫星绝对辐射定标系数(GF-1, ZY-3, ZY-1 02C, SJ-9A, HJ-1A/B). <http://www.cresda.com/site1/Downloads/dbcs/3776.shtml>.
- China Centre for Resources Satellite Data and Application. Absolute radiometric calibration coefficient of land observation satellite in 2014 (GF-1, ZY-3, ZY-1 02C, SJ-9A, HJ-1A/B). <http://www.cresda.com/site1/Downloads/dbcs/3776.shtml>.
- [28] 孟庆辉. 海洋遥感水质评价方法研究[D]. 杭州: 国家海洋局第二海洋研究所, 2014.
- Meng Qinghui. Preliminary study on the application of remote sensing techniques to water quality assessment[D]. Hangzhou: Second Institute of Oceanography. SOA, 2014.
- [29] 唐军武, 田国良, 陈清莲. 离水辐射非朗伯特特性的 Monte Carlo 模拟及分析[J]. 海洋学报, 2000, 22(2): 48-57.
- Tang Junwu, Tian Guoliang, Chen Qinglian. Bidirectionality of water-leaving radiance: simulation results and its correction[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2000, 22(2): 48-57.

# Retrieval of suspended sediment concentration from HJ-CCD imagery in Jiangsu coastal sea

WANG Lin<sup>1</sup>, YANG Jian-hong<sup>2</sup>, LI Guan-nan<sup>1, 3</sup>, CHEN Yan-long<sup>1</sup>, MENG Qing-hui<sup>1</sup>

(1. National Marine Environmental Monitoring Center Marine Monitoring Center, Dalian 116023, China; 2. Shenzhen Langcheng Technology Corporation Limited, Shenzhen 518029, China; 3. College of Environment Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

**Received:** Oct., 28, 2014

**Key words:** Suspended sediment; remote sensing retrieval; HJ CCD image; Jiangsu coastal sea

**Abstract:** Based on in-situ measured remote sensing reflectance ( $R_{rs}$ ), suspended sediment concentration (SSC), and HJ-CCD imagery in the Jiangsu coastal sea, we established a remote sensing retrieval model for suspended sediment. By analyzing the measured spectral reflectance, we can determine the most sensitive of the SSC bands, and fit the SSC to different functional forms. The results indicate that the equivalent  $R_{rs}$  at HJ-CCD Band 3 and the ratio of the equivalent band-3  $R_{rs}$  to that at band 2, respectively, can be used as sensitivity factors. We simulated the SSC vs. sensitivity factor using the logarithm model in the low area, and the exponential model in the high area. The superposition model is optimal. By satellite application, we found that the retrieval results of the ratio model to be consistent with the actual situation, effectively weakening a series of interference factors, including, for example, the atmospheric correction, the method used for converting apparent reflectance to remote sensing reflectance, and the low radiation resolution on the HJ CCD. This is the optimal SSC retrieval model for the Jiangsu coastal sea.

(本文编辑: 谭雪静)