

文章编号: 1672-8785(2016)04-0038-06

用波段比值参数提升水体悬浮颗粒物浓度反演模型稳健性的分析

陈晓东 蒋雪中 *

(华东师范大学河口海岸国家重点实验室, 上海 200062)

摘要: 为了得到更加稳健的水体悬浮颗粒物 (Suspended Particular Matters, SPM) 的反演模型, 减少建模数据误差对算法精度的影响, 将单波段和对应波段比值的六种经验模型和半经验、半分析模型分别应用于长江口高浊度水域不同航次不同测量仪器测得的实测数据集中, 分析了波段比值参数对于提高 SPM 反演模型稳健性和稳定性的作用。结果表明, 采用波段比值参数的模型的精度都远高于相应的单波段模型。在 2014 年 5 月和 2014 年 12 月航次的数据集中, 有的单波段模型失效, 总体的最高精度不超过 0.5。而相对应的波段比值的建模精度都在 0.8 左右。另外, 将各模型应用于 Landsat 8 卫星的 OLI 传感器的遥感数据时, 同样, 波段比值模型的反演精度高于单波段模型。结果证明, 在高浊度的水体中反演 SPM 浓度时, 波段比值遥感参数的应用可以加强反演模型的稳健性。

关键词: 悬浮颗粒物; 反演模型; 波段比值; 河口

中图分类号: TP751 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2016.04.007

Analysis of Robustness Improvement of SPM Inversion Models Using Band Ratio Parameters

CHEN Xiao-dong, JIANG Xue-zhong *

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

Abstract: To obtain more robust inversion models of Suspended Particular Matters (SPM) in water and reduce the influence of the modeling data error on the accuracy of an algorithm, six empirical, semi-empirical and semi-analysis models of single-band and corresponding band ratio parameters are used in the data sets measured in high turbidity water at Yangtze River estuary by different instruments in different cruises. The role of band ratio parameters in robustness improvement of the SPM inversion model is analyzed. The results show that the models using band ratio parameters have much higher accuracy than the corresponding single-band model. In the data sets obtained in May and December 2014, some single-band models are invalid with the highest accuracy no more than 0.5. However, the modeling accuracy of the corresponding band ratio models is about 0.8. In addition, when the models are used in the OLI images from Landsat 8, the validation accuracy of band ratio models is higher than that of the single-band models as well. The results confirm that the use of the band ratio parameters can enhance the robustness of inversion models when the SPM concentration is inverted in high turbidity water.

收稿日期: 2016-03-14

作者简介: 陈晓东 (1991-), 女, 山东济宁人, 硕士研究生, 主要从事浑浊水域水色遥感研究。

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

Key words: suspended particular matter; inversion model; band ratio; estuary

0 引言

水体中的 SPM 会直接影响光在水体中的衰减和垂直分布^[1], 从而影响浮游植物的生产力^[2] 和沉水植物的分布和生长^[3]。此外, SPM 也会影响养分的动态变化和微量元素、重金属以及其它物质的量^[4]。在近岸二类水体中, 尤其是在长江河口的高浊度水体中, SPM 是其主要的组成部分, 也是描述水质的关键参数^[5]。

SPM 遥感反演的算法可以分为经验模型和分析模型, 遥感参数多为单波段和波段的比值。2005 年, Doxaran 曾经尝试利用波段比值法建立线性模型从而反演 Tamar 河口的 SPM 浓度^[6], 取得了良好效果。后来波段比值参数被应用到二次多项式模型^[7]、二次函数模型^[8,9] 和指数模型^[10,11] 中。虽然人们采用的具体波段不同, 研究区域也不同, 但波段比值参数都能体现出很大的优势。研究者认为波段比值可以降低由于光照条件不稳定和 SPM 类型不均一带来的误差^[12]。

为了更深入理解遥感因子对反演算法的影响, 我们利用两组长江口实测高光谱数据分析了单波段和波段比值在不同模型中的表现, 检验了波段比值法在不同河口水体中的优点是否具有普适性, 并将精度较高的模型应用到了 Landsat OLI 遥感影像, 获取了较高精度的 SPM 反演结果, 为快速准确获取高浊度水体 SPM 含量及其变化提供了途径。

1 数据和方法

1.1 现场采集数据

现场光谱测量和水文采样分四期进行, 在 2013 年 5 月、2014 年 1 月、5 月和 12 月各测量一次。测点 1412S1 (121.117°E, 31.750°N) 位于长江口南支上段, 测点 1412S2 (122.067°E, 31.367°N)、1405S2 (122.083°E, 31.367°N) 位于北港拦门沙河段, 测点 1412S3 (122.333°E, 31.367°N) 位于北港口外, 测点 1305 (121.933°E, 31.167°N)、1405S1 (121.933°E,

31.167°N) 和 1401(1) (122.083°E, 31.083°N)、1401(2) (122.333°E, 30.917°N) 分别位于南槽及南槽口外。测量站点均位于长江口入海主汊, 具有典型河口水体的特性。

2013 年 5 月和 2014 年 1 月的光谱数据利用 ASD 公司的 Field Spec Pro 便携式地物光谱仪测得。2014 年 5 月和 2015 年 1 月的光谱测量采用 Satlantic 公司生产的海面高光谱仪 HyperSAS 进行。探头测量的几何设置参照唐军武的水面以上测量法^[13], 仪器观测平面与太阳入射平面的夹角为 90°~135°, 仪器与海面方向的夹角为 30°~45°, 以避免绝大部分太阳的直射反射, 同时减少船舶阴影的影响。

光谱测量期间同步采集 600 ml 表层水样, 将其装入玻璃样瓶, 并运回实验室, 使用 0.45 μm 滤膜真空抽吸过滤, 烘干后利用电子天平秤 (其精度为万分之一克) 称重, 测定含沙量。

遥感反射率的计算参照公式^[14]:

$$R_{rs}(\lambda, \theta_0, W) = \frac{L_t(\lambda, \theta_0, W) - \rho_{sky}(\lambda, \theta_0, W)L_i(\lambda, \theta_0)}{E_s(\lambda, \theta_0)} \quad (1)$$

式中, $\rho_{sky}(\lambda, \theta_0, W)$ 是天空光的反射率, 取经验值 0.024。为了保证实测光谱的有效性, 仅取光照条件比较好的 9:00~15:00 时段的光谱数据, 并匹配同步的表层悬浮物浓度数据, 组成光谱-悬沙数据对。经筛选后, 四期测量共获得 142 组与光谱数据匹配的含沙量数据, 其中 Field Spec Pro 数据集 42 组, HyperSAS 数据集 100 组。

1.2 影像数据处理

卫星影像选用 2013 年发射的 Landsat-8 上搭载的 OLI 传感器获取的数据。和之前的 Landsat 系列多光谱传感器相比, OLI 传感器有较高的信噪比和辐射量化^[15]; 与常规的水色遥感器 (SeaWiFS、MODIS、MERIS 等) 相比, OLI 传感器有更高的空间分辨率, 适用于河口海岸较高空间分辨率的观测新载荷。

影像的辐射定标根据 NASA 推荐的公式进行^[15]; 大气校正选用 6S 太阳波谱

范围卫星信号模拟第二版辐射传输模型 (<http://6s.ltdri.org/pages/downloads.html>)。

传感器的天顶角和方位角、太阳的天顶角和方位角、影像获取日期和波段范围从遥感影像的头文件获得，光谱通道的光谱响应函数从 NASA 官网获得，大气能见度数据来自气象数据共享网站 (<http://www.wunderground.com/history/>)。

2 分析和讨论

2.1 波段选择

为了选择合适的建模波段，首先对数据进行相关性分析。两组数据集的皮尔逊相关系数如图 1 所示。Field Spec Pro 的数据集比 HyperSAS 数据集的遥感反射率和悬浮颗粒物浓度的相关性更好。

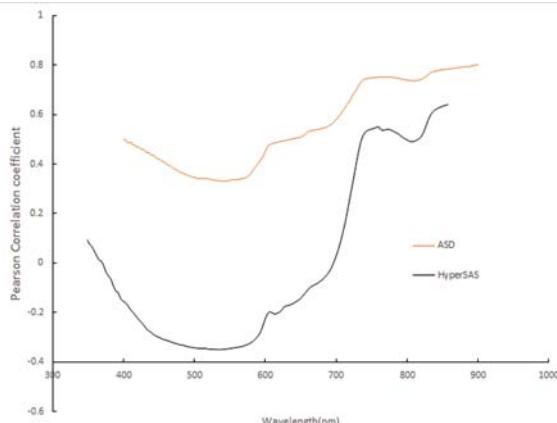


图 1 遥感反射率和悬浮颗粒物浓度的 Pearson 相关系数

由图 1 可知，在红外和近红外波段，遥感反射率和悬浮颗粒物浓度的皮尔逊相关较强。这种现象可以从光吸收和散射的角度来解释^[16]：当悬浮颗粒物浓度很大时，后向散射和吸收的比值以及遥感反射率仅和悬浮颗粒物的性质有关，而和其浓度无关，也就是所谓的饱和现象。为了避免这种现象的发生，在反演高浓度的 SPM 时，要选择水体吸收强的波段，如红外或者近红外波段。另外，为了降低非颗粒物的吸收随时间和空间的变化，也要尽量选取水体吸收量大的波段。

因此，考虑到后续将把算法用于 OLI 传感器影像，依据 OLI 传感器的波段设置，选取近红外波段以及红波段来建立 SPM 的反演模型。用传感器的中心波长来代替传感器的波段光谱响应函数的积分。测得的数据集实测光谱数据的最大波长为 858 nm，因此用 858 nm 处的光谱信号来代替 865 nm 处的光谱信号。采用 858 nm、655 nm 波长处的光谱信号分别代表 OLI 传感器的 band5、band4 通道的光谱信号。

2.2 单波段和多波段比值的对比

建立了单波段 (858 nm) 和波段比值 (858 nm/655 nm) 的反演模型。所用的模型包括经验模型 (线性关系式 $R' = a \times C_{SPM} + b$ 、对数关系式 $R' = a \times \ln(C_{SPM}) + b$ 等) 和半分析模型 (Gordon 关系式 $R' = c + C_{SPM}/(a + b \times C_{SPM})$ 、负指数关系式 $R' = a + b \times (1 + e^{-d \times C_{SPM}})$ 、SERT^[17]、Nechad)^[15]，SERT 基于 Kubelka-Munk 水体二流近似辐射传输理论，其公式为

$$R_{rs} = \frac{\alpha \beta C_{spm}}{1 + \beta C_{spm} + \sqrt{1 + 2\beta C_{spm}}} \quad (2)$$

式中， α 会受光照条件和水体类型的影响； β 为后向散射系数和吸收系数的比值，可用实测光谱 – 悬沙数据拟合得到。半分析模型的公式如下：

$$S = \frac{A^R \times R_{rs}}{1 - R_{rs}/C^R} + B^R \quad (3)$$

式中， R' 是遥感参数，包括单波段的遥感反射率和遥感反射率的比值， a 、 b 、 c 和 d 是系数。

建模精度用调整后的决定系数 \tilde{R}^2 和反演精度用均方根误差 RMSE 来衡量：

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n-1}} \quad (3)$$

$$\tilde{R}^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2 / (n-2)}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 / (n-1)} \quad (4)$$

式中， \hat{y}_i 是第 i 个样本的模型预测值， y_i 是第 i 个样本的实际测量值， \bar{y} 是所有样本的实际测量值的平均值， n 是样本总量。先用 HyperSAS 数据集的 100 组数据进行分析。

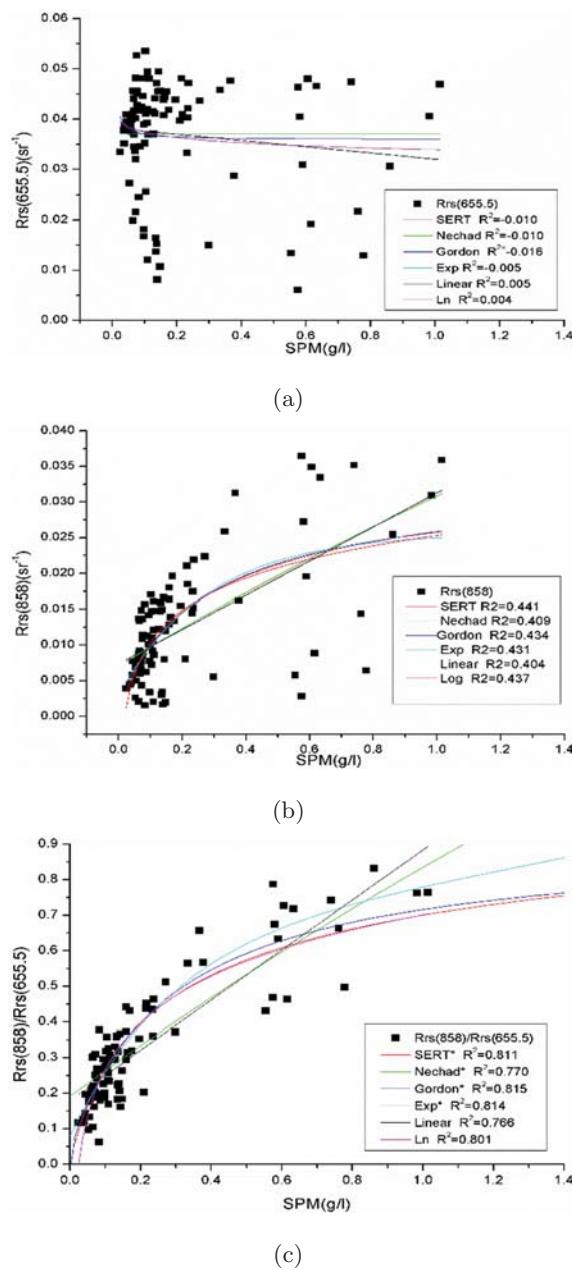


图 2 各个模型的拟合及其拟合精度。图例中, SERT、Nechad、Gordon、Exp、Linear 和 Ln 分别代表 SERT 模型、Nechad 的半分析模型、Gordon 模型、负指数模型、线性模型和对数模型。(a)、(b)、(c) 分别为 655.5 nm 波段、858 nm 波段和比值波段的情况

对比结果可知,各个模型波段比值的建模精度远远大于单波段的精度。对于此数据集,所有单波段模型中最佳的建模精度不超过 0.5,但是运用波段比值 $R_{rs}(858)/R_{rs}(655.5)$ 后,建模精度都有提高,最低精度也大于 0.7。

2.3 Landsat OLI 遥感反演

进一步检验反演的有效性,将算法用在了 OLI 影像的 SPM 的反演上。因为对于 2014 年 1 月 1 日 ~ 2014 年 1 月 11 日的实测 SPM 浓度数据没有同步的卫星影像数据,我们选取了潮情相似的影像进行代替。图 3 为 2014 年 1 月 1 日和 2014 年 12 月 22 日的吴淞站潮位曲线图。这两天的潮位曲线几乎重合,而且都属于同一年份,同为枯季大潮,因此我们用 2014 年 12 月 22 日的影像代替了 2014 年 1 月 1 日的影像,并用 2014 年 1 月 1 日的实测 SPM 浓度进行了验证。

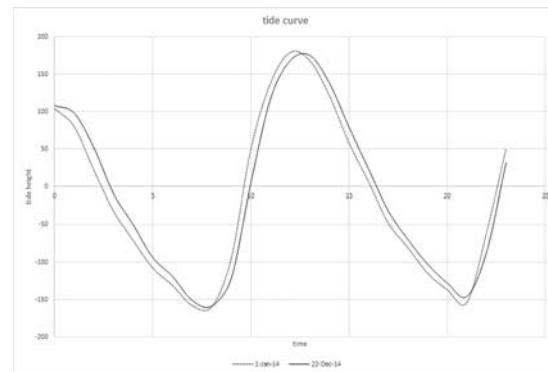


图 3 2014 年 1 月 1 日和 2014 年 12 月 22 日的吴淞站潮位曲线图

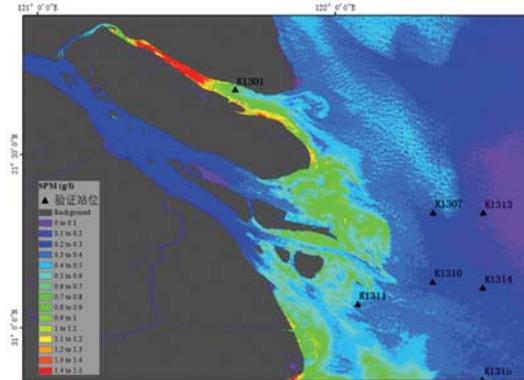


图 4 2014 年 12 月 22 日 OLI 传感器 Exp 波段比值的反演结果。三角标示的地点为近似同步的 2014 年 1 月 1 日的实测 SPM 站点

所有模型的反演误差采用均方根误差 RMSE 标示,见表 1。可以看到,六种模型中五种模型的波段比值模型的均方根误差都小于单波段模型的均方根误差。仅有线性模型波段比值的均方根误差和单波段的相近,这可能和检验数据较少有一定关系。

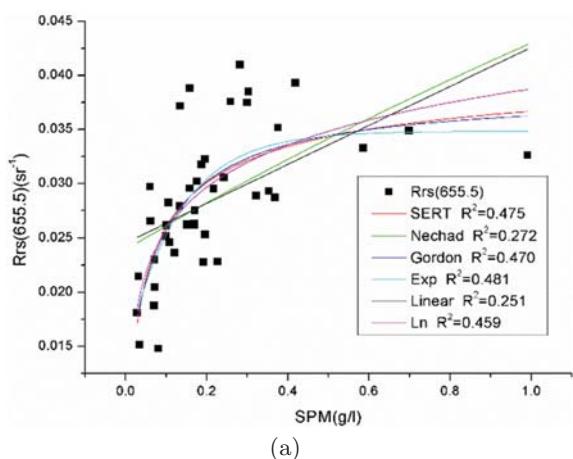
表1 所有模型波段比值和单波段验证的RMSE结果($n=7$)

	SERT	Nechad	Gordon	Exp	Linear	Ln
$R_{rs}(858)$	0.171	0.246	0.173	0.187	0.183	0.191
$R_{rs}(655.5)$	0.238	4934923.809	0.307	0.901	0.900	0.238
$R_{rs}(858)/R_{rs}(655.5)$	0.140	0.232	0.131	0.144	0.219	0.136

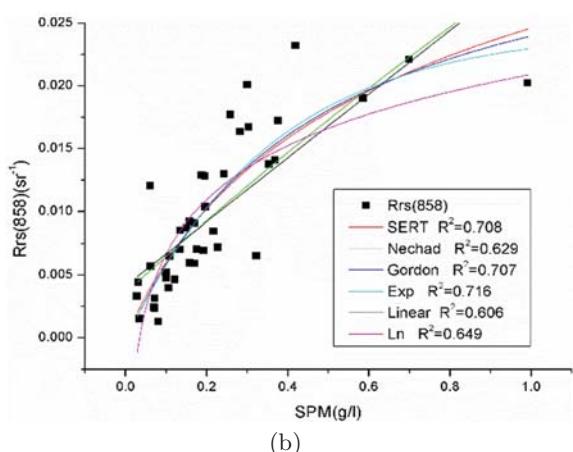
2.4 不同数据集的验证

为了检验波段比值模型的可靠性,不依赖于特定的数据集,我们在另一个数据集上进行了同样的分析。这个数据集的光谱数据是2013年5月和2014年1月采集的共42组光谱-SPM浓度数据对。

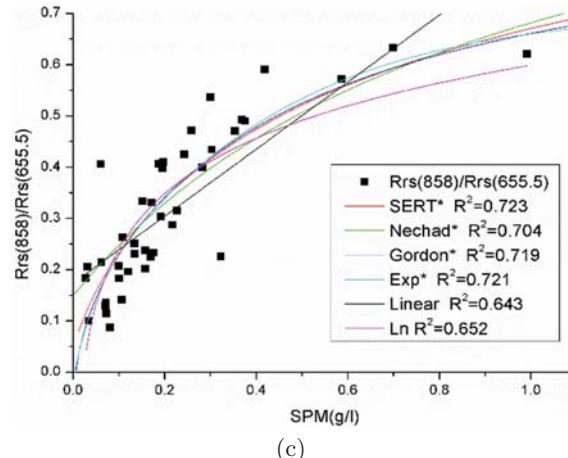
这一数据集的数据质量较好(见图1的相关性分析),在单波段遥感反射率和SPM浓度也有较好相关性的情况下,所有模型波段比值的建模精度依然大于单波段的建模精度。



(a)



(b)



(c)

图5 各个模型的拟合及其拟合精度。(a)、(b)和(c)分别为655.5nm波段、858nm波段和比值波段的情况

3 结论

通过将波段比值遥感参数应用于经验和半经验的六种不同算法,并将其建模和反演精度与单波段的进行对比,证实波段比值遥感参数模型的精度对不同的算法具有稳健性。在对另一数据集进行分析时,同样,波段比值遥感参数具有更高的精度。因此,波段比值模型的高精度性对于不同的数据集也是稳健的。

在野外采样时,由于实际条件有限,而且长江口的水动力较强,数据的测量误差比实验室测量可能大很多,这就要求反演算法具备一定的容错性。因此,我们在获取长江口高浊度水域的SPM浓度时,建立波段比值的反演模型或者将单波段模型转换成比值形式的模型,将能获得更高的精度。

本研究的模型反演的检验数据有限,有待与影像数据同步的更多实测数据的验证和微观实验观测,并从光在水体中的辐射传输机理方面对其原理进行深入分析。

参考文献

- [1] Zhang Y L, Zhang B, Ma R H, et al. Optically Active Substances and Their Contributions to the Underwater Light Climate in Lake Taihu, a Large Shallow Lake in China [J]. *Fundamental and Applied Limnology*, 2007, **170**: 11–19.
- [2] Liu X H, Zhang Y L, Yin Y, et al. Wind and Submerged Aquatic Vegetation Influence Bio-optical Properties in Large Shallow Lake Taihu, China [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2013, **118**: 713–727.
- [3] Miller R L, McKee B A. Using MODIS Terra 250 m Imagery to Map Concentrations of Total Suspended Matter in Coastal Waters [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, **93**: 259–266.
- [4] Neukermans G, Loisel H, Meriaux, et al. In Situ Variability of Mass-specific Beam Attenuation and Backscattering of Marine Particles with Respect to Particle Size, Density, and Composition [J]. *Limnology and Oceanography*, 2012, **57**(1): 124–144.
- [5] Pozdnyakov D, Shuchman R, Korosov A, et al. Operational Algorithm for the Retrieval of Water Quality in the Great Lakes [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, **97**: 352–370.
- [6] Curran P J, Novo E M M. The Relationship between Suspended Sediment Concentration and Remotely Sensed Spectral Radiance: A Review [J]. *Journal of Coastal Research*, 1988, **4**(3): 351–368.
- [7] Chen J, Quan W, Cui T, et al. Estimation of Total Suspended Matter Concentration from MODIS Data Using a Neural Network Model in the China Eastern Coastal Zone [J]. *Est Coast Shelf Sci*, 2015, **155**: 104–113.
- [8] Doxaran D, Ehn J, Belanger S, et al. Optical Characterization of Suspended Particles in the Mackenzie River Plume (Canadian Arctic Ocean) and Implications for Ocean Colour Remote Sensing [J]. *Biogeosciences*, 2012, **9**: 3213–3229.
- [9] Sravanthi N, Ramana I V, Yunus A P, et al. An Algorithm for Estimating Suspended Sediment Concentrations in the Coastal Waters of India Using Remotely Sensed Reflectance and its Application to Coastal Environments [J]. *Int J Envir Res*, 2013, **7**(4): 841–850.
- [10] He X, Bai Y, Pan D, 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.
- [11] Feng L, Hu C, Chen X, et al. Influence of the Three Gorges Dam on Total Suspended Matters in the Yangtze Estuary and its Adjacent Coastal Waters: Observations from MODIS [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, **140**: 779–788.
- [12] 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]. *Appl Opt*, 2003, **42**(15): 2623–2634.
- [13] 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, **8**(1): 37–44.
- [14] Mobley C D. Estimation of the Remote-sensing Reflectance from Above Surface Measurements [J]. *Appl Opt*, 1999, **38**(36): 7442–7255.
- [15] Schott J R, Gerace A, Pahlevan N. The Landsat Data Continuity Mission (LDCM): Landsat 8 Not Your Fathers Landsat [EB/OL]. http://www.ssec.wisc.edu/meetings/ciw/Workshop_Presentations/Wednesday_6_20_2012/1_Remote_Sensing_Products_Missions/ignite_mission_panel/4_Schott_water_workshop_2012.pdf, 2012.
- [16] Nechad B, Ruddick K G, Park Y. Calibration and Validation of a Generic Multisensor Algorithm for Mapping of Total Suspended Matter in Turbid Waters [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, **114**(4): 854–866.
- [17] 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.