

# 基于 GF-1 号的舟山近岸悬浮泥沙浓度反演研究

章敏超, 郭碧云

(浙江海洋大学海洋科学与技术学院 舟山 316022)

**摘要:** 文章利用舟山近岸实测光谱数据和国产卫星 GF-1 号宽视场成像仪(WFV)遥感数据,反演该海域悬浮泥沙浓度。结果表明:① 线性模型和二次模型相比,二次模型的精确度略高于线性模型,但对于悬沙低浓度区,反演误差过大,故线性模型更适用于舟山近岸水体悬浮泥沙浓度反演;② GF-1 号 B2 和 B3 是悬沙浓度变化的敏感波段,B3/B2 波段组合的线性模型反演效果较好;③ GF-1 号遥感数据能够较理想地实现定量反演近岸水体的悬浮物。

**关键词:** 悬浮泥沙;模型构建;高分一号;反演;舟山近岸

中图分类号:P733.3;P734.2+3

文献标志码:A

文章编号:1005-9857(2018)01-0126-06

## Retrieval of Suspended Sediment Concentration in Zhoushan Coastal Area Satellite Based on GF-1

ZHANG Minchao, GUO Biyun

(College of Marine Science and Technology, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China)

**Abstract:** In this paper, the retrieval of suspended sediment concentration in Zhoushan coastal area was studied by using the measured data and the wide field of view (WFV) imaging instrument of the domestic satellite GF-1. Results showed that: (1) The accuracy of the two model is slightly higher than that of the linear model, compared with the two model. But for the low concentration region, the inversion error is too large, so the linear model is more suitable for the inversion of Zhoushan coastal water. (2) Band 2 and band 3 are sensitive to the change of suspended sediment concentration, and the linear model of B3/B2 band combination has better effect on GF-1 band combination. (3) GF-1 remote sensing data can be used to quantitatively estimate suspended solids in coastal waters.

**Key words:** Suspended sediment, Model building, GF-1, Retrieval, Zhoushan Coastal Area

悬浮物浓度是最重要的水质参数之一,对研究近岸海域水流泥沙输运以及海岸工程建设具有重

要作用<sup>[1]</sup>。基于船舶的海洋调查方法进行悬浮物的研究,需消耗大量人力和物资,还存在一定空间和

收稿日期:2017-04-06;修订日期:2017-11-27

基金项目:国家自然科学基金项目(51479179);浙江海洋大学科研配套经费项目(21109004614P);浙江海洋大学科研启动经费项目(21105011713)。

作者简介:章敏超,硕士研究生,研究方向为海洋遥感

通信作者:郭碧云,副教授,博士,研究方向为遥感信息技术

时间上的局限性。近年来,海洋遥感技术日新月异,遥感反演各种参数的精度越来越高,具有快速、同步、大范围检测能力。

目前的研究工作主要是基于实测数据和遥感数据,统计分析进行建模。李京<sup>[2]</sup>基于准同步实测数据以及 AVHRR 数据,发现 AVHRR 适用于测定杭州湾悬浮泥沙浓度且精度较高。李四海等<sup>[3]</sup>进一步利用 AVHRR 数据分别以灰度法、斜率法、泥沙指数法建立长江口悬浮泥沙定量模式,结果表明,泥沙指数法更适合高浓度泥沙区。陈晓翔等<sup>[4]</sup>结合 FY-1D 遥感数据与准同步珠江口实测悬浮泥沙值,建立遥感估算模型,验证 FY-1D 对于近海泥沙监测的适用性。刘王兵等<sup>[5]</sup>通过杭州湾实测光谱数据和悬浮泥沙浓度的相关性分析,建立基于 HJ-CCD B4 和 B3 比值的指数模型。程乾等<sup>[6]</sup>根据实测数据模拟高分一号卫星数据并应用于杭州湾泥沙反演,得到的模型相关性高达 0.8,且反演效果良好。尽管目前泥沙反演技术已经比较成熟,但由于近岸水体光谱的复杂性,建立的模型都具有区域性,缺乏普适性。本研究利用现场实测数据,结合我国自行研发的高分一号卫星,建立基于高分一号 WFV3 传感器的适合舟山近岸海域悬浮泥沙浓度的反演模型,来监测舟山近岸泥沙分布情况。

## 1 研究区概况与数据源

### 1.1 研究区概况

舟山群岛位于杭州湾口南部,背靠长江三角洲等广阔腹地,海域内岛屿众多,是我国沿海最大的岛群<sup>[7]</sup>。位于 121°31'E—123°25'E,29°32'N—31°04'N 之间,总面积 22 000 km<sup>2</sup>,其中海域面积为 20 800 km<sup>2</sup><sup>[8]</sup>。其近岸水体为典型二类水体<sup>[9]</sup>。研究区经纬度:29°49'N—30°08'N,121°57'E—122°26'E。

### 1.2 实测数据和方法

剖面测量法和水面测量法是较常用的两类现场表观光谱的测量方法<sup>[10]</sup>。本研究选用水面测量法<sup>[11]</sup>。使用 ISI921VF 系列野外地物光谱仪测量近岸的水体表面光谱值,天空光的辐亮度以及参考板的反射率。仪器观测平面与太阳入射平面的夹角为 135°,与海面法线方向夹角为 40°,这样可减少太

阳直射反射带来的误差<sup>[12]</sup>。采取水样与测量水体光谱同步进行,研究区域及采样站位与分布见图 1。

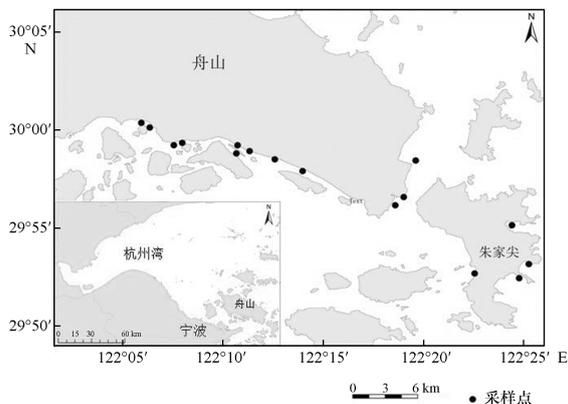


图 1 研究区域及采样分布

遥感反射率的计算公式为:

$$R_{rs} = \frac{(L_{sea} - r \times L_{sky}) \times R_p}{L_p \times \pi} \quad (1)$$

式中:  $L_{sea}$  为水面总辐射亮度;  $L_{sky}$  为天空光辐亮度;  $R_p$  为标准板反射率;  $L_p$  为标准板的辐射亮度;  $r$  为气水界面反射率,取经验值 0.021<sup>[13]</sup>。

悬浮泥沙浓度测量参照国家标准 (GB17378.4—2007) 采用称重法,用已烘干并称重的 0.45  $\mu\text{m}$  玻璃纤维滤膜过滤水样,恒温烘干 6 h 后再次称重,最后计算样品中悬浮物浓度。本次实验中的泥沙浓度范围为 0.145~1.043 g/L。

### 1.3 遥感数据

本研究主要数据是国产卫星高分一号 WFV3 多光谱相机影像数据,成像于 2016 年 9 月 3 号 11:25。分辨率为 16 m,幅宽 800 km,重访周期 2 d,高分一号的波段分为: B1(0.45~0.52  $\mu\text{m}$ ); B2(0.52~0.59  $\mu\text{m}$ ); B3(0.63~0.69  $\mu\text{m}$ ); B4(0.77~0.89  $\mu\text{m}$ ) 4 个波段。图 2 为 GF-1 号影像图。

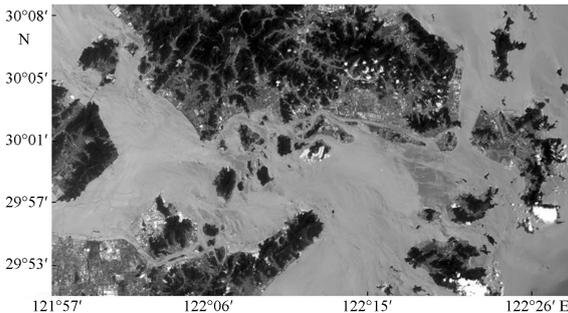


图 2 高分一号影像

## 2 结果与讨论

### 2.1 舟山近岸悬浮泥沙光谱特征

不同浓度的悬浮泥沙随遥感反射率的变化如图3所示,横轴为波长,纵轴为水体遥感反射率。可发现研究区反射率曲线均存在双峰,第一主峰出现在570 nm左右,呈“宽峰”形状,且有向红光波段(620~760 nm)移动的趋势,即具有所谓的“红移现象”<sup>[14-16]</sup>;次主峰位于近红外波段(800~820 nm),表现出明显的高散射特性,峰值大体位于810 nm,含沙量为0.105 g/L水体的第二主峰最低且与第一主峰的差值最大,但随着泥沙浓度的升高,其差值不断缩小;当含沙量大于0.666 g/L时,第二主峰最接近第一主峰,差值最小。另外,在400~550 nm波段内,遥感反射率对悬浮泥沙浓度的变化反应不敏感。在550~700 nm,水体遥感反射率随泥沙浓度升高而提高,但也存在泥沙浓度为177.50 mg/L水体的遥感光谱反射率高于泥沙浓度为418.25 mg/L水体的反射率现象。在750~900 nm处,随着悬浮泥沙浓度增大,反射率也整体抬升。

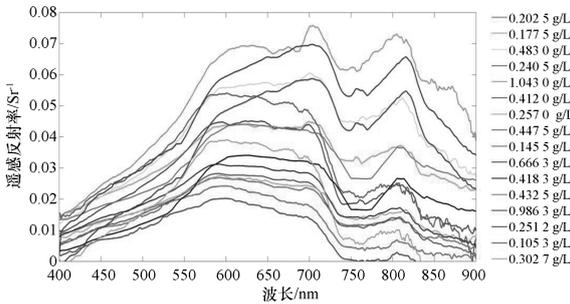


图3 不同质量浓度悬浮泥沙光谱曲线

### 2.2 舟山近岸悬浮泥沙反演模型构建

本研究从16组有效数据中选取11组进行模型构建,另外5组验证模型精度。本研究根据实际测得的光谱数据以及GF-1号WFV3传感器各波段的波谱响应函数(图4),模拟GF-1号各波段遥感数据,并由式(1)计算获取相应的遥感反射率。悬浮泥沙浓度定量反演的关键是建立悬浮泥沙浓度SSC与遥感反射率 $x$ 之间的关系,即 $SSC=f(X)$ ,并分析悬浮泥沙浓度与各个波长或者波段组合的遥感反射率的相关性。

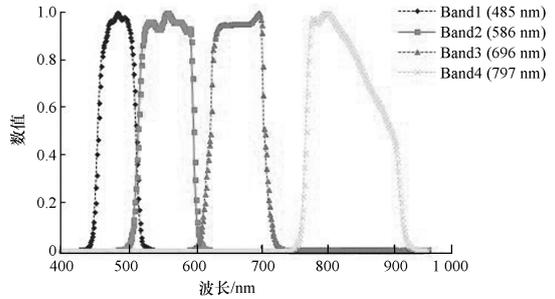


图4 高分一号波谱响应函数曲线<sup>[17]</sup>

#### 2.2.1 单波段模型建立

高分一号4个波段中心波长的遥感反射率数据由实测高光谱数据模拟得到,并统计与悬浮泥沙浓度相关分析依次建立回归方程,计算各波段遥感反射率和悬浮泥沙浓度间的相关系数 $R^2$ ,遥感监测敏感波段的选取则根据 $R^2$ , $R^2$ 越高,则表明该波段与悬浮泥沙浓度相关性越大。悬浮泥沙浓度SSC为因变量,以B1、B2、B3和B4的中心波段处的遥感反射率 $X$ 为自变量,分别建立线性、指数和二次形式的回归方程,进行相关分析(表1)。

表1 4个波段遥感反射率与悬浮泥沙浓度的相关性

波段	模型	相关系数 $R^2$	公式
B1	线性模型	0.397 0	$SSC=23.563X-0.0827$
	二次模型	0.684 2	$SSC=4.679.9X^2-166.62X+1.6385$
	指数模型	0.375 6	$SSC=0.1174e^{51.641x}$
B2	线性模型	0.504 6	$SSC=16.235X-0.1397$
	二次模型	0.741 5	$SSC=1.472.9X^2-84.253X+1.3952$
	指数模型	0.491 5	$SSC=0.1018e^{36.101x}$

续表

波段	模型	相关系数 R <sup>2</sup>	公式
B3	线性模型	0.700 4	SSC=11.918X-0.095 8
	二次模型	0.824 9	SSC=407.41X <sup>2</sup> -24.813x+0.600 3
	指数模型	0.688 8	SSC=0.111 7e <sup>26.627x</sup>
B4	线性模型	0.741 2	SSC=11.814X+0.029 7
	二次模型	0.830 9	SSC=325.45X <sup>2</sup> -14.658X+0.416 9
	指数模型	0.729 5	SSC=0.168e <sup>22.346x</sup>

注:SSC 即为悬沙浓度,单位 g/L,B1、B2、B3、B4 分别为 GF-1 影像的第一、第二、第三、第四波段。

由表 1 可看出,B3 和 B4 的相关性较高,二次模型相关性均超过 0.8,符合高浓度悬沙特性<sup>[18-19]</sup>。故选择 B3 和 B4 作为敏感因子进行建模。

### 2.2.2 多波段模型的建立

为了提高反演精度,本研究通过建立多波段模型来减少环境因素的影响,以期找出相关系数较高

的波段组合建立精度较高的悬浮泥沙浓度模型。通过分析不同波段的模型组合可以发现,B3/B2 波段组合与悬浮泥沙拟合效果最好,线性模型和二次模型的相关系数均在 0.8 以上,且二次模型的相关系数最高,指数模型的相关系数最低。悬浮泥沙浓度多波段组合模型如表 2 所示。

表 2 悬浮泥沙反演模型

因变量	模型	关系式	相关系数 R <sup>2</sup>
B3/B1	线性模型	SSC=0.462 4X-0.525 1	0.504 4
	二次模型	SSC=-0.505 5X <sup>2</sup> +2.574 3X-2.651 6	0.562 9
	指数模型	SSC=0.033 4e <sup>1.156 5x</sup>	0.621 9
B3/B2	线性模型	SSC=1.485 6X-1.112 9	0.807 6
	二次模型	SSC=8.294 4X <sup>2</sup> -18.854X+10.932	0.813
	指数模型	SSC=0.020 3e <sup>2.947x</sup>	0.678 6
B4/B1	线性模型	SSC=0.225 1X+0.128 8	0.435 2
	二次模型	SSC=-0.153 6X <sup>2</sup> +0.666 7X-0.096 9	0.510 6
	指数模型	SSC=0.175e <sup>0.546 7x</sup>	0.505 6
B4/B2	线性模型	SSC=0.692 6X-0.043 4	0.552 9
	二次模型	SSC=1.234 7X <sup>2</sup> -1.026 4X+0.431 7	0.747 5
	指数模型	SSC=0.138 4e <sup>1.364 4x</sup>	0.535 9
B4/B3	线性模型	SSC=0.926 9X-0.076 1	0.583 4
	二次模型	SSC=2.649 2X <sup>2</sup> -1.765 4X+0.504 1	0.793 8
	指数模型	SSC=0.120 1e <sup>1.951 7x</sup>	0.449 3
B4/(B1+B2+B3)	线性模型	SSC=0.085 6X+0.047 1	0.657 7
	二次模型	SSC=0.012 2X <sup>2</sup> -0.055 3X+0.318	0.755 9
	指数模型	SSC=0.165 4e <sup>0.164x</sup>	0.683 5

注:SSC 即为悬沙浓度,单位 g/L,B1、B2、B3、B4 分别为 GF-1 影像的第一、第二、第三、第四波段。

### 2.3 精度验证及结果讨论

选择 5 个样本点对单波段 B4 和多波段组合 B3/B2 的线性模型和二次模型的精度进行验证。根据图 5(a)可以发现单波段线性模型的最大最小相对误差分别为 36.4%、8.1%;二次模型最大最小相

对误差分别为 56.5%、5.5%。进一步计算平均相对误差和均方根误差,分别为 24.6%和 26.5%,均方根误差为 0.137 g/L 和 0.132 g/L。图 5(b)表明多波段 B3/B2 线性模型最大最小相对误差分别为 31.4%、5.9%;二次模型最大最小相对误差分别为

62.9%、2.3%，平均相对误差分别为 16.1% 和 21.1%，均方根误差为 0.071 g/L 和 0.056 g/L。对比分析发现，样本悬浮泥沙浓度较低时（样本 2：0.105 g/L），二次模型误差值均较高，B4 单波段相对误差达到 56.5%，B3/B2 多波段二次模型相对误差达到 62.9%。由于样本有限，很难验证二次模型是否不适用于反演低浓度悬浮泥沙。但可发现二次模型在高浓度泥沙样本（样本 4：0.432 g/L，样本 5：0.986 g/L）中的精度值较高。通过研究发现多波段模型的二次模型相对误差和均方根误差都明显优于单波段，但就稳定性来说，线性模型误差波动较小，而二次模型个别误差极大，根据舟山近岸这类悬浮泥沙浓度变化较大的水体来说，线性模型更适用于该海域的反演，但这仍需更多数据的验证。

表 3 表示最终构建的精度较高的单波段及多波段模型汇总，B4 及 B3/B2 模型效果较好。

表 3 模型误差分析

波段组合	模型	R <sup>2</sup>	公式	平均相对误差/%	均方根误差/(g·L <sup>-1</sup> )
B4	线性模型	0.741 2	SSC=11.814X+0.029 7	24.6	0.137
	二次模型	0.830 9	SSC=325.45X <sup>2</sup> -14.658X+0.416 9	26.6	0.132
B3/B2	线性模型	0.807 6	SSC=1.485 6X-1.112 9	16.1	0.071
	二次模型	0.813 0	SSC=8.294 4X <sup>2</sup> -18.854X+10.932	21.1	0.056

### 2.4 基于高分一号卫星影像的舟山近岸悬浮泥沙浓度反演

对 2016 年 9 月 3 号的高分一号影像进行预处理，辐射定标根据中国资源卫星应用中心提供的《2016 国产陆地观测卫星绝对辐射定标系数》<sup>[20]</sup> 将影像 DN 值转换为辐亮度数据。大气校正使用 Envi5.2 自带的 FLAASH 模块，结合高分一号的波谱响应函数以及头文件，设置一系列参数完成大气校正。

利用 Envi5.2 软件，观察校正完成后的图像的各个波段的反射率变化差异，发现 B2 和 B3，在浓度不同的悬沙以及清洁水体的反射率变化最明显，故用 B3/B2 波段组合建立的模型应用于反演。依次检验线性模型、二次模型和指数模型，发现线性模型和二次模型的反演效果较好，但二次模型对于清洁水体的反演较差，故选用线性模型。

$$SSC=1.485 6 \times (B3/B2) - 1.112 9 \quad (2)$$

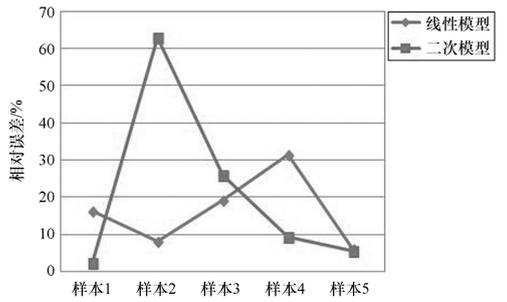
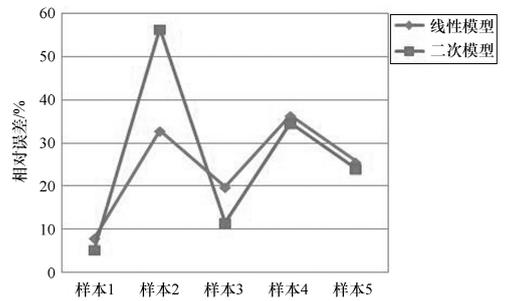


图 5 模型精度验证

得到反演图像(图 6)。

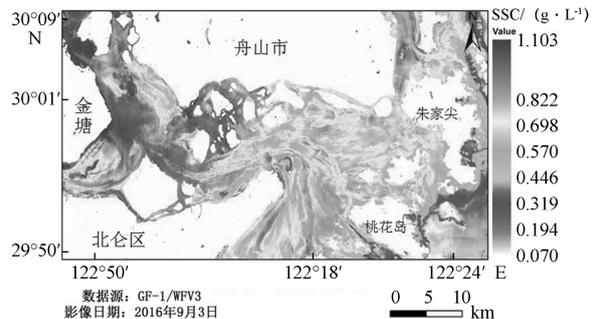


图 6 舟山近岸 SSC 反演图

根据图像可直观反映出 2016 年 9 月 3 号上午 11:25 时的悬浮泥沙分布图，舟山本岛的西北角的悬浮泥沙浓度最高，并在水流作用下向东南方西转移。经过舟山本岛西南部，其中岛屿星罗棋布，水道交错，地形复杂，海水在行进过程中受岛屿影响，

流速流向发生改变。部分泥沙在岛屿西面沉积,导致西面的泥沙浓度普遍高于东面。在岛屿周围的水体含沙量均高于开阔水面含沙量,两个主要岛屿——朱家尖和舟山本岛的悬沙浓度西侧普遍高于东侧。另外,朱家尖以东海域水体含沙量最低。总体来看,在本研究区域内,水体含沙量呈“西高东低”现象,且泥沙含量变化较大(0.070~1.103 g/L),这对建立高精度的反演模型带来一定难度。

### 3 结论

(1)模拟光谱反射率与实测悬浮泥沙浓度的相关分析表明,单波段 B3、B4 波相关性更高,以此作为敏感因子建模,发现 B3 和 B2 的比值与悬浮泥沙浓度 SSC 的相关性较高。经过反演效果的对比,线性模型略优于二次模型。舟山近岸线性反演模式为  $SSC=1.4856 \times (B3/B2) - 1.1129$ 。

(2)根据模型的相关系数  $R^2$  和反演结果,二次模型的相关系数最高,且在后面的精度验证中证实精度更优于线性模型,但在含沙量较低时,二次模型的误差较大,考虑到舟山近岸悬沙浓度变化特点,在以后的研究工作中,需要按其浓度进行低、中、高分类,分别进行建模以提高反演精度。

(3)考虑到本研究遥感影像反演时间序列的局限性,只能单一表现悬浮泥沙的空间分布,为进一步研究舟山近岸悬浮泥沙浓度的时空动态变化,需要高时间分辨率遥感数据进行分析验证。

### 参考文献

- [1] MILLER RL, MCKEE BA. Using MODIS Terra 250 m imagery to map concentrations of total suspended matter in coastal waters[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 93(1/2):259-266.
- [2] 李京.利用 NOAA 卫星的 AVHRR 数据监测杭州湾海域的悬浮泥沙含量[J].海洋学报(中文版),1987(1):132-135.
- [3] 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.
- [4] 陈晓翔,丁晓英.用 FY-1D 数据估算珠江口海域悬浮泥沙含量[J].中山大学学报(自然科学版),2004,43(增刊):194-196.
- [5] 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.
- [6] 程乾,刘波,李婷,等.基于高分一号杭州湾河口悬浮泥沙浓度遥感反演模型构建及应用[J].海洋环境科学,2015,34(4):558-563.
- [7] 李植斌.浙江省海岛区资源特征与开发研究:以舟山群岛为例[J].自然资源学报,1997,12(2):139-145.
- [8] 宋亚民.舟山群岛水文特性[J].水文,2001,21(6):59-62.
- [9] GORDON H R, BROWN O B, JACOBS M M. Computed relations between the inherent and apparent optical properties of a flat homogeneous ocean [J]. Applied Optics, 1975, 14, 417-427.
- [10] FARGION G S, MURLLER J L. Ocean optics protocols for satellite ocean color sensor validation [J]. British Journal of Surgert, 2003, 47(201):111-112.
- [11] 唐军武,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,2004,8(1):37-44.
- [12] HOOKER S B, LAZIN G, ZIBORDI G, et al. An Evaluation of above-and in-water methods for determining water-leaving radiances [J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 2010, 19(4):486-515.
- [13] MOBLEY C D. Estimation of the remote-sensing reflectance from above-surface measurements [J]. Applied Optics, 1999, 38:7442-7455.
- [14] 陈涛.悬浮泥沙浓度与光谱反射率峰值波长红移的相关关系 [J].海洋学报,1994,16(1):38-43.
- [15] DOXARAN D, FROIDEFOND J M, CASTAING P. A reflectance band ratio used to estimate suspended matter concentrations in sediment-dominated coastal waters [J]. International Journal of Remote Sensing, 2002, 23(23):5079-5085.
- [16] DOXARAN D, FROIDEFOND J M, LAVENDER S, et al. Spectral signature of highly turbid waters: application with SPOT data to quantify suspended particulate matter concentrations [J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 81(1):149-161.
- [17] 中国资源卫星应用中心. GF-1-16 m 多光谱相机 3-光谱响应函数 [EB/OL]. (2015-11-02) [2016-11-03]. <http://www.cresda.com/CN/Downloads/gpxyhs/index.shtm>.
- [18] 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(12):118-122.
- [19] 王繁,周斌,徐建明,等.基于实测光谱的杭州湾悬浮物浓度遥感反演模式 [J]. 环境科学,2008,29(11):3021-3026.
- [20] 中国资源卫星应用中心. 2016 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) [EB/OL]. (2016-10-10) [2016-11-03]. <http://www.cresda.com/CN/Downloads/dbcs/5845.shtml>.