

文章编号: 1672-8785(2012)04-0031-07

# 光谱响应函数和带宽对光学复杂II类 水体离水辐射反射率的影响

沈 宏 沈 芳

(华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062)

**摘 要:** 在海洋水色遥感研究中, II类水体由于具有复杂的光学属性并受多种物质的共同影响, 会使水色遥感数据的应用水平和反演精度降低。从中分辨率成像光谱仪 (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS) 和主题绘图仪 (Thematic Mapper, TM) 光谱通道的光谱响应函数和带宽的角度出发, 分析了其对光学复杂II类水体离水辐射反射率的影响。结果表明, MODIS的光谱响应函数和带宽对离水辐射反射率的影响远小于TM相应通道对离水辐射反射率的影响。通过进一步定量分析发现, 光谱响应函数和带宽在不同通道和水体下对离水辐射反射率的影响程度不同。针对长江河口三种不同的典型水体类型, 利用TM通道的离水辐射反射率模拟了整个通道上的反射率。这样可以更明显地表征出通道内的水体光谱特性, 消除光谱响应函数和带宽的影响。

**关键词:** 光谱响应函数; 光谱带宽; II类水体; 离水辐射反射率

**中图分类号:** TP751 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2012.04.006

## Effect of Relative Spectral Response and Bandwidth on Water-Leaving Reflectance of Optically Complex Case II Waters

SHEN Hong, SHEN Fang

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

**Abstract:** Due to the complex optical properties of case II water, the application and inversion accuracy of water color remote sensing data can be reduced in the study of ocean water color remote sensing. The effect of relative spectral response and bandwidth of MODIS and TM channels on the water-leaving reflectance of optically complex case II water is analyzed. The analysis result shows that the effect of the relative spectral response and bandwidth of MODIS channels on water-leaving reflectance is much less than that of the corresponding TM channels. In addition, the quantitative analysis result shows that the relative spectral response and the bandwidth have their different effect on the water-leaving reflectance of different channels and water types. According to three typical types of water at the mouth of Yangtze River, the water-leaving reflectance of the TM channels is used to simulate the reflectance of the entire

**收稿日期:** 2012-02-22

**基金项目:** 海洋公益性科研专项(200905001-9); 全球变化研究国家重大科学研究计划项目(2010CB951204); 国家自然科学基金项目(50939003); 国家自然科学基金创新群体项目(41021064)

**作者简介:** 沈宏(1986-), 男, 上海人, 硕士研究生, 主要研究方向为海洋水色遥感。E-mail: shenhongisky@gmail.com

channels. Thus, the spectral properties of case II water are characterized more obviously and the effect of the spectral response function and bandwidth is removed.

**Key words:** relative spectral response; spectral bandwidth; case II water; water-leaving reflectance

## 0 引言

目前, 利用水色遥感技术可以定量反演水体中的各项要素, 监测各要素的空间分布和动态变化, 并分析水质的透明度、混浊度和水色等光学性质<sup>[1]</sup>。然而随着海洋水色遥感应需求不断扩展与深入, 遥感数据的高精度定量化已经成为人们关注的热点<sup>[2]</sup>。以长江河口典型 II 类水体为例, 其光学特性复杂<sup>[3-4]</sup>, 并受浮游植物、无机悬浮物和有机黄色物质等的共同影响<sup>[5-6]</sup>。II 类水体的不同波长对水体的响应也不一样, 而且在许多情况下 II 类水体对入射光具有较强的散射作用, 因此对遥感数据的精度要求特别高。分析传感器光谱通道的光谱响应函数和带宽的影响是提高遥感数据精度的方法之一<sup>[7]</sup>。

本文通过将 MODIS 中分辨率成像光谱仪和 TM 多光谱辐射计两种卫星传感器获得的数据相结合来开展海洋水色时间序列变化研究, 对于全球变化监测具有十分重要的意义。然而, TM 与 MODIS 在通道数量、带宽以及光谱响应函数

上均有很大差异。这种差异是否会影响水色遥感建模及反演的精度还有待于研究。因此, 本文从 MODIS 和 TM 传感器光谱通道的光谱响应函数和带宽出发, 以光学复杂 II 类水体 (以长江河口为例) 野外实测的高光谱数据为基础, 分析传感器光谱通道的光谱响应函数和带宽对光学复杂 II 类水体离水辐射反射率的影响。

## 1 卫星传感器

表 1 列出了 MODIS 和 TM 水色通道的对比情况。MODIS 的光谱分辨率很高, 其 405 ~ 420 nm 和 862 ~ 877 nm 通道的带宽为 15 nm, 其他通道的带宽达到 10 nm, 而且通道设置比较精细, 可反演水体中的不同要素。TM 从可见光至近红外有 4 个通道。各通道的光谱分辨率较低, 带宽较大。其中, 近红外通道的光谱带宽为 129 nm。

由图 1 所示的 MODIS 和 TM 通道的光谱响应函数可知, TM 通道的覆盖范围比较平均, 但光谱带宽较大, 同一通道内的光谱响应略有变化; 除了 MODIS 的 405 ~ 420 nm 通道的光谱响

表 1 MODIS 和 TM 通道的对比

传感器	光谱范围 /nm	有效波长 /nm	带宽 /nm	主要应用
MODIS	405 ~ 420	413	15	黄色物质
	438 ~ 448	443	10	叶绿素吸收
	483 ~ 493	488	10	叶绿素
	526 ~ 536	531	10	叶绿素
	546 ~ 556	549	10	沉淀物
	662 ~ 672	666	10	叶绿素荧光性
	673 ~ 683	678	10	叶绿素荧光峰
	743 ~ 753	747	10	气溶胶性
	862 ~ 877	868	15	气溶胶性
TM	452 ~ 518	486	66	植被分辨
	529 ~ 609	571	80	植被分辨
	624 ~ 693	660	69	植被种类
	776 ~ 905	840	129	生物量、水汽

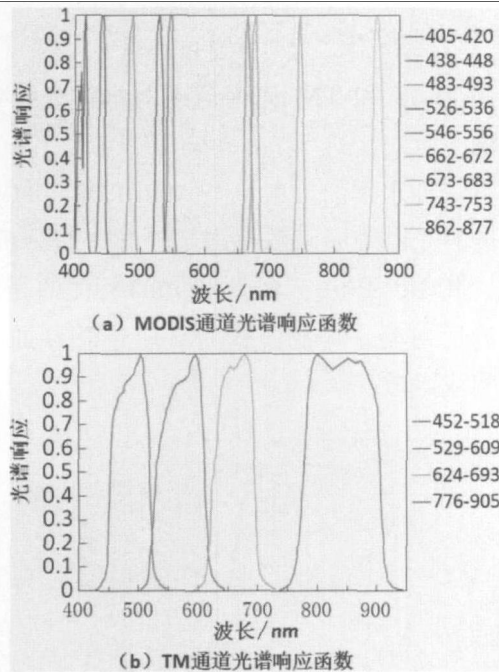


图 1 MODIS 和 TM 传感器通道的光谱响应函数

应变化较大和有噪声之外, 其他 8 个通道的光谱响应都比较规则, 即通道中心处的光谱响应最大, 两侧的光谱响应逐渐减小<sup>[8]</sup>。

## 2 方法原理

离水辐射反射率  $R_{rs}(\lambda)$  (以下简称反射率) 是海洋水色遥感中很重要的一个物理量。它是水面以上离水辐亮度  $L_w(\lambda)$  与下行太阳光入射水面的总辐照度  $E_d(\lambda)$  之间的比值, 即

$$R_{rs}(\lambda) = \frac{L_w(\lambda)}{E_d(\lambda)} \quad (1)$$

在水色遥感研究中, 建模往往是基于野外实测的高光谱数据。例如, ASD 地物光谱仪可现场实测获得光谱带宽为 1 nm 的“连续”的高光谱反射率, 而现行多光谱卫星传感器为低等或中等光谱分辨率的传感器, 具有一定波长范围的光谱通道, 而且各通道内的光谱辐射响应能力不同。将基于实测数据所建的模型直接应用到遥感数据中是不妥的。假设卫星传感器某通道  $\lambda_m$  的光谱范围为  $[\lambda_f, \lambda_t]$ , 通道光谱响应函数为  $f(\lambda)$ , 则可以利用在野外实测的高光谱数据来模拟卫星传感器通道的离水辐射反射率

$R_{rs}(\lambda_m)$  :

$$R_{rs}(\lambda_m) = \frac{\int_{\lambda_f}^{\lambda_t} L_w(\lambda) f(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_f}^{\lambda_t} E_d(\lambda) f(\lambda) d\lambda} \quad (2)$$

此外, Jimenez-Munoz 提出了传感器通道有效波长 ( $\lambda_e$ ) 的概念, 其计算方式为<sup>[9]</sup>

$$\lambda_e = \frac{\int_{\lambda_f}^{\lambda_t} \lambda f(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_f}^{\lambda_t} f(\lambda) d\lambda} \quad (3)$$

设  $R_{rs}(\lambda_e)$  为传感器通道有效波长  $\lambda_e$  的反射率, 由数学原理可知,  $R_{rs}(\lambda_e) \neq R_{rs}(\lambda_m)$ , 即卫星传感器通道的  $R_{rs}(\lambda_m)$  与高光谱  $R_{rs}(\lambda_e)$  不相等。因此, 直接把根据高光谱建立的反演模型应用到多光谱卫星数据必然会产生误差, 从而影响定量反演的精度。

本文假定忽略卫星传感器的性质、大气条件以及空间分辨率等因素对反演的影响, 仅考虑卫星传感器的光谱响应函数和带宽的影响。以 Pin1、Pin2 和 Pin3 所代表的三种长江口典型 II 类水体为例, 选取在野外实测的三种水体的高光谱反射率进行分析 (见图 2)。其中, Pin1 水体为双峰特征 (第一个峰在 590 ~ 710 nm, 第二个峰在 820 nm 左右), 该处的悬浮泥沙浓度为 157.9 mg/L, 叶绿素浓度为 1.17 mg/m<sup>3</sup>, 水体较浑浊; Pin2 水体为单峰特征 (峰在 570 nm 左右), 该处的悬浮泥沙浓度为 13.4 mg/L, 叶绿素浓度为 8.73 mg/m<sup>3</sup>, 水体较清; Pin3 水体也为双峰特征 (第一个峰在 570 nm, 第二个峰在 690 nm 左右), 该处的悬浮泥沙浓度为 28.3 mg/L, 叶绿素浓度为 15.58 mg/m<sup>3</sup>, 水体呈褐色。利用三种水体的高光谱反射率分析 MODIS 和 TM 对应通道在光学复杂 II 类水体中对水体光谱特性的影响, 进一步通过式 (2) 模拟传感器通道  $R_{rs}(\lambda_m)$ , 对比通道的有效波长处的高光谱  $R_{rs}(\lambda_e)$ , 分析光谱响应函数和带宽对反射率的影响。最后, 利用传感器通道的反射率模拟整个通道上的反射率, 从而表征通道内水体的光谱特性, 消除光谱响应函数和带宽的影响。

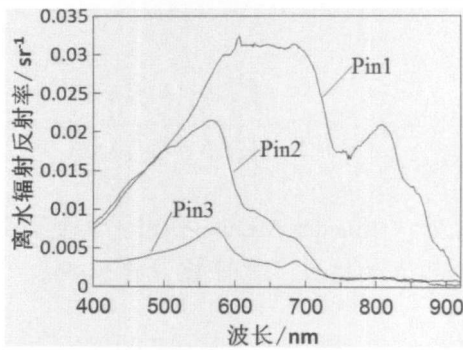


图 2 长江口三种水体类型的野外实测反射率

### 3 结果与分析

#### 3.1 MODIS 和 TM 光谱通道对水体光谱特性的影响

将三种水体的反射率与 MODIS 和 TM 传感器通道的光谱响应函数叠加到一起进行分析 (见图 3)。其中, Pin1、Pin2 和 Pin3 标注的是对应水体的反射率, 其他曲线为对应传感器通道的光谱响应函数。

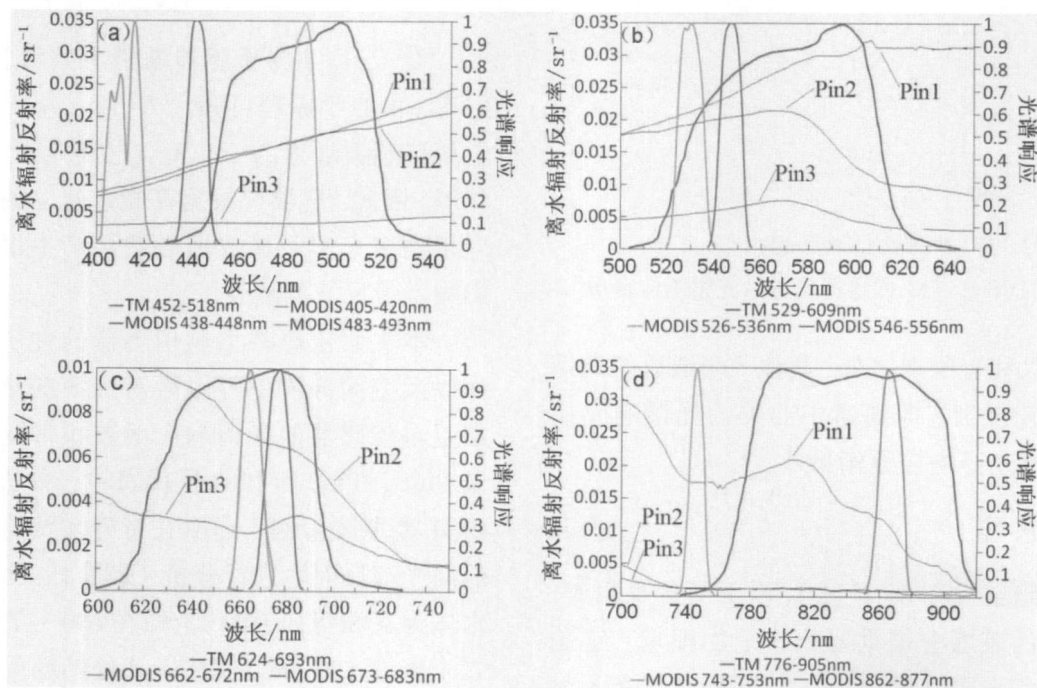


图 3 MODIS 和 TM 光谱响应函数与实测反射率

图 3(a) 中, 在 400 ~ 550 nm 之间, Pin1 和 Pin2 的反射率逐渐增大, Pin3 的反射率基本保持不变。MODIS 的 405 ~ 420 nm、438 ~ 448 nm、483 ~ 493 nm 通道以及 TM 的 452 ~ 518 nm 通道均可用来反映黄色物质。

图 3(b) 中, 在 500 ~ 650 nm 之间, TM 的 529 ~ 609 nm 通道的反射率可以反映 Pin1 的悬浮泥沙的变化。而由于带宽很大, 该通道在 Pin2 和 Pin3 的反射率不能反映 560 nm 左右的叶绿素吸收最小特征; MODIS 的 526 ~ 536 nm 通道和 546 ~ 556 nm 通道可以反映悬浮泥沙的变化。

图 3(c) 中, 在 600 ~ 750 nm 之间, MODIS 的 662 ~ 672 nm 通道的光谱响应在 667 nm 处达到

最大。该通道的 Pin3 的反射率可反映叶绿素吸收及荧光性 (667 nm 左右)。由于 MODIS 的 673 ~ 683 nm 通道的光谱响应最大值在 Pin3 的荧光峰的左侧, 该通道的 Pin3 的反射率不能反映荧光峰的特性 (683 nm 左右)。TM 的 624 ~ 693 nm 通道的带宽很大, 因此该通道的 Pin3 的反射率不能反映叶绿素吸收及荧光性。

图 3(d) 中, 在 700 ~ 920 nm 之间, MODIS 的 743 ~ 753 nm 通道的 Pin1 的反射率对水体吸收峰 (748 nm 左右) 的敏感性强。由于 TM 的 776 ~ 905 nm 通道的带宽很大, 该通道的 Pin1 的反射率不能反映 810 nm 处的水体的反射峰。

#### 3.2 光谱响应函数和带宽对反射率的影响

根据前面的方法原理计算各通道的反射率误差, 并分析光谱响应函数和带宽对反射率的影响(见表 2)。

由表 2 可知, 在 TM 中, 776 ~ 905 nm 通道的均方根误差最大 ( $1.89\text{E}-03 \text{ sr}^{-1}$ ); 在 MODIS 中, 743 ~ 753 nm 通道的均方根误差最小 ( $9.62\text{E}-06 \text{ sr}^{-1}$ ); TM 通道的最小误差 (452 ~ 518 nm 通道) 与 MODIS 通道的最大误差 (862 ~ 877 nm 通道)

基本相同。总体上, MODIS 通道的均方根误差也远小于 TM 相应通道的均方根误差, 表现出明显的一致性, 因为 MODIS 通道的光谱响应函数比 TM 对应通道的更稳定, 且带宽更小。由此可见, MODIS 的光谱响应函数和带宽对反射率的影响远小于 TM 相应通道的光谱响应函数和带宽对反射率的影响。

表 2 MODIS 和 TM 传感器的各通道反射率误差

传感器	光谱范围 /nm	相对误差 = $\frac{R_{rs}(\lambda_m) - R_{rs}(\lambda_e)}{R_{rs}(\lambda_e)} (\times 100\%)$			均方根误差 / $\text{sr}^{-1}$
		Pin1	Pin2	Pin3	
MODIS	405 ~ 420	1.47	0.74	0.34	$8.47\text{E}-05$
	438 ~ 448	0.29	0.14	0.09	$2.32\text{E}-05$
	483 ~ 493	0.07	0.09	0.08	$1.09\text{E}-05$
	526 ~ 536	0.29	0.14	0.31	$4.07\text{E}-05$
	546 ~ 556	1.57	0.46	1.95	$2.42\text{E}-04$
	662 ~ 672	0.05	0.62	1.03	$3.03\text{E}-05$
	673 ~ 683	0.08	0.09	0.61	$1.77\text{E}-05$
	743 ~ 753	0.02	0.31	1.34	$9.62\text{E}-06$
	862 ~ 877	3.77	0.45	0.38	$2.14\text{E}-04$
TM	452 ~ 518	2.13	0.73	0.05	$2.11\text{E}-04$
	529 ~ 609	1.16	13.45	18.35	$1.86\text{E}-03$
	624 ~ 693	0.48	3.71	13.99	$2.80\text{E}-04$
	776 ~ 905	23.90	5.37	4.94	$1.89\text{E}-03$

结合图 3 和表 2 可知, 对于 MODIS 传感器, 当 II 类水体呈现浑浊即悬浮泥沙含量较高 (Pin1) 时, 862 ~ 877 nm 通道的反射率误差最大 (3.77%), 这是由于通道内反射率变化较大导致的; 当 II 类水体清澈即悬浮泥沙和叶绿素含量都很低 (Pin2) 时, 405 ~ 420 nm 通道的反射率误差最大 (0.74%), 这是由于通道的光谱响应函数变化较大导致的; 当 II 类水体中叶绿素含量较高 (Pin3) 时, 546 ~ 556 nm 通道的反射率误差最大 (1.95%)。对于 TM 传感器, 当 II 类水体呈现浑浊即悬浮泥沙含量较高 (Pin1) 时, 776 ~ 905 nm 通道的反射率误差最大 (23.90%), 这是由于通道内反射率变化较大导致的; 当 II 类水体清澈即悬浮泥沙和叶绿素含量都很低 (Pin2) 时, 529 ~ 609 nm 通道的反射率误差最大 (13.45%), 这

是由于通道内反射率变化较大导致的; 当 II 类水体中叶绿素含量较高 (Pin3) 时, 529 ~ 609 nm 通道的反射率误差最大 (18.35%), 该通道的光谱响应随波长的增大而变大。

通过以上分析可知, 由于不同的 II 类水体在水体光学特性上存在差异, 传感器通道的光谱响应函数和带宽对反射率的影响程度是不同的。

### 3.3 传感器通道的反射率模拟

由前面分析可知, 由于受光谱响应函数和带宽的影响, 传感器通道的反射率不能完全表征出水体的所有光谱特性。因此, 我们可以针对不同的水体类型, 利用传感器通道的反射率来模拟整个通道的反射率, 从而更明显地表征通道内水体的光谱特性。由于 MODIS 通道的光谱响

应函数和带宽对反射率的影响比 TM 对应通道的小, 因此只针对 TM 的 4 个通道和基于 Pin1、Pin2 以及 Pin3 所代表的三种水体类型进行建模

(结果见表 3)。其中,  $R_{r,s}(\lambda)$  为对应通道光谱范围内的反射率。

表 3 TM 各通道的反射率建模

通道序号	光谱范围 /nm	水体类型	模型
Ch1	452 ~ 518	Pin1	$R_{r,s}(\lambda) = 5.024640E-07\lambda^2 - 0.0003929\lambda + 0.0727276 + R_{r,s}(\text{Ch1})$
		Pin2	$R_{r,s}(\lambda) = -6.190555E-07\lambda^2 + 0.0006869\lambda - 0.187170 + R_{r,s}(\text{Ch1})$
		Pin3	$R_{r,s}(\lambda) = 2.196534E-05\lambda - 0.0106073 + R_{r,s}(\text{Ch1})$
Ch2	529 ~ 609	Pin1	$R_{r,s}(\lambda) = -1.729889E-08\lambda^3 + 0.00002856E-05\lambda^2 - 0.015546\lambda + 2.786282 + R_{r,s}(\text{Ch2})$
		Pin2	$R_{r,s}(\lambda) = 1.349716E-09\lambda^4 - 3.097954E-06\lambda^3 + 0.002660\lambda^2 - 101249\lambda + 144.204179 + R_{r,s}(\text{Ch2})$
		Pin3	$R_{r,s}(\lambda) = 1.035655E-09\lambda^4 - 2.358038E-06\lambda^3 + 0.0020099\lambda^2 - 0.760107\lambda + 107.615922 + R_{r,s}(\text{Ch2})$
Ch3	624 ~ 693	Pin1	$R_{r,s}(\lambda) = -1.734503E-06\lambda - 0.0012378 + R_{r,s}(\text{Ch3})$
		Pin2	$R_{r,s}(\lambda) = 2.60025E-08\lambda^3 - 5.098344E-05\lambda^2 + 0.03323761\lambda - 7.203190 + R_{r,s}(\text{Ch3})$
		Pin3	$R_{r,s}(\lambda) = -1.276748E-09\lambda^4 + 3.384478E-06\lambda^3 - 0.0033623\lambda^2 + 1.483760\lambda - 245.404069 + R_{r,s}(\text{Ch3})$
Ch4	776 ~ 905	Pin1	$R_{r,s}(\lambda) = 5.533854E-14\lambda^6 - 2.781828E-10\lambda^5 + 5.822404E-07\lambda^4 - 0.00094944\lambda^3 + 0.4071355\lambda^2 - 136.00835\lambda - 18914.16091 + R_{r,s}(\text{Ch4})$
		Pin2	—*
		Pin3	—*

\* Pin2 和 Pin3 类型水体的反射率在近红外波段显著减小接近 0 (参见图 2), 无建模意义

选择 3 个野外实测反射率数据进行模型验证。这三个反射率数据分别对应于 Pin1、Pin2 和 Pin3 三种水体类型。根据表 3 的模型对 TM 的 4 个通道进行模拟。图 4(a) 所示为 Pin1 类型的模拟结果, 模拟后 776 ~ 905 nm 通道可反映 810 nm 处水体的反射峰; 图 4(b) 所示为 Pin2 类型的模拟结果, 模拟后 529 ~ 609 nm 通道可反映 560 nm 左右的叶绿素吸收最小特征; 图 4(c) 所示为 Pin3 类型的模拟结果, 模拟后 529 ~ 609 nm 通道可反映 560 nm 左右的叶绿素吸收最小特征, 624 ~ 693 nm 通道可以反映叶绿素的吸收及荧光性 (665 nm 左右)。由此可见, 模拟的反射率曲线可以表征通道内一定的水体光谱特性。

表 4 列出了分析中所模拟的不同水体类型的 TM 通道的误差。其中, 所模拟的 Pin1 类型

在 624 ~ 693 nm 通道的相对误差最小 (0.67%), 所模拟的 Pin2 类型在 529 ~ 609 nm 通道的相对误差最大 (10.73%), 所模拟的 Pin3 类型在前三个通道的相对误差均大于 5%。

表 4 模拟的 TM 通道的反射率误差

光谱范围 /nm	相对误差 (×100%)		
	Pin1 类型	Pin2 类型	Pin3 类型
452 ~ 518	0.81	2.48	5.93
529 ~ 609	3.51	10.73	6.16
624 ~ 693	0.67	4.63	5.53
776 ~ 905	2.37	—	—

通过以上分析可知, 利用传感器通道的反射率值来模拟整个通道上的反射率, 可以明显地表征通道内的水体光谱特性, 消除光谱响应函数和带宽的影响。

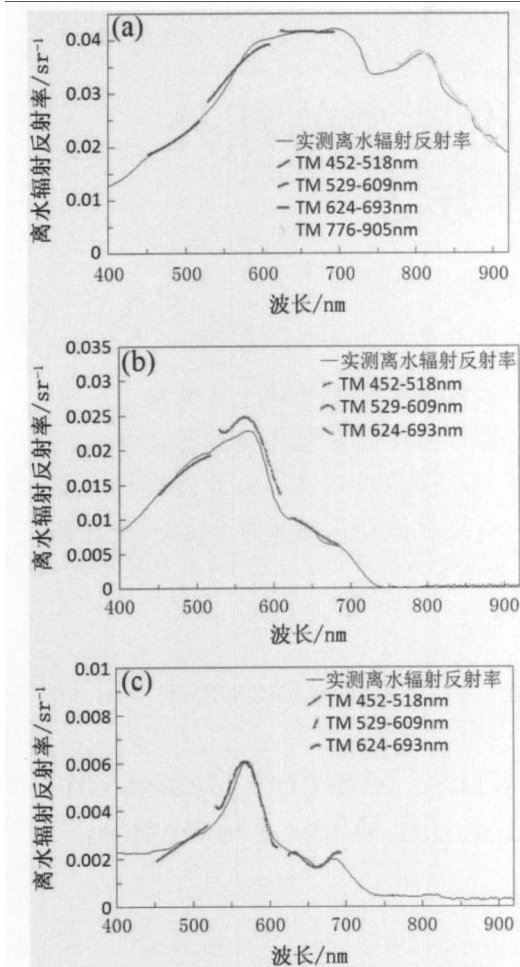


图 4 模拟三种水体的 TM 四个通道内的反射率图

## 4 结论

本文从 MODIS 与 TM 通道的光谱响应函数和带宽出发, 分析了其对光学复杂 II 类水体反射率的影响。主要结论如下:

(1) 通过将长江口三种水体类型的野外实测反射率与 MODIS 和 TM 光谱通道进行对比, 发现传感器通道的反射率不能完全表征出水体的光谱特性。

(2) MODIS 的光谱响应函数和带宽对反射率的影响远小于 TM 相应通道的光谱响应函数和带宽对反射率的影响。定量分析发现, 光谱响应函数和带宽在不同通道和水体下对反射率的影响程度是不同的。在悬浮泥沙含量高的水体中, MODIS 的 862 ~ 877 nm 通道的反射率误差最大 (3.77%), TM 的 776 ~ 905 nm 通道的反射率误

差最大 (23.90%); 在清澈水体中, MODIS 的 405 ~ 420 nm 通道的反射率误差最大 (0.74%); 在叶绿素含量较高的水体中, TM 的 529 ~ 609 nm 通道的反射率误差最大 (18.35%)。

(3) 针对三种不同水体类型, 利用 TM 通道的反射率模拟了整个通道的反射率, 表征出了通道内水体光谱特性, 消除了光谱响应函数和带宽的影响。经模拟后, TM 的 776 ~ 905 nm 通道可反映出高悬浮泥沙含量水体中 810 nm 处的反射峰, TM 的 529 ~ 609 nm 通道可反映出清澈或高叶绿素含量水体中的叶绿素吸收最小特征 (560 nm 左右), TM 的 624 ~ 693 nm 通道可反映出高叶绿素含量水体中的叶绿素吸收及荧光性 (665 nm 左右)。

## 参考文献

- [1] 汪小钦, 陈崇成. 遥感在近岸海洋环境监测中的应用 [J]. *海洋环境科学*, 2000, 19(4): 72-76.
- [2] 吴荣华, 杨军, 杨忠东, 等. 光谱响应差异对高精度交叉定标的影响 —— 以 FY-3A/MERSI 与 EOS/MODIS 为研究实例 [J]. *遥感应用*, 2011, 2(10): 51-57.
- [3] 洪官林. 长江口及邻近海域叶绿素的光学特性及遥感应用 [D]. 上海: 华东师范大学, 2011.
- [4] Shen Fang, Verhoef Wouter, Zhou Yunxuan, 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.
- [5] 况润元. 长江口遥感水色参数模拟研究 [D]. 上海: 华东师范大学, 2010.
- [6] 陈森. 海洋水色卫星遥感算法综述 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2005.
- [7] 童进军, 邱康睦, 李小文, 等. 利用 EOS/MODIS 交叉定标 FY1D/VIRR 可见光 - 近红外通道 [J]. *遥感学报*, 2005, 9(4): 349-356.
- [8] 刘三超, 柳钦火, 高懋芳, 等. 波谱响应函数和波段对地表温度反演的影响 [J]. *遥感信息*, 2007, 11(5): 3-6.
- [9] 窦闻, 孙洪泉, 陈云浩. 基于光谱响应函数的遥感图像融合对比研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, 31(3): 746-752.