

文章编号:1000-5641(2012)01-0037-10

# 长江口及邻近海域水体反射率的模拟

洪官林, 沈芳, 沈宏

(华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062)

**摘要:** 通过对 2009 年 8 月和 11 月水体光学特性的分析发现:长江口邻近海域夏秋两季反射光谱曲线由于悬浮泥沙、浮游植物以及黄色物质的影响呈现 4 种形状;叶绿素 a 浓度与浮游植物吸收系数可通过两种方式建立良好关系;将水体各组分光学特性参数化,并结合叶绿素 a 浓度与吸收系数的两种关系分别建立水体反射光谱参数模式,从而可以对水体遥感反射光谱进行模拟,模拟曲线的均方根误差分别为 0.004 4 和 0.004 5. 在模式的建立中,根据长江口海域水体组分浓度的分布状况,对悬浮泥沙浓度以及叶绿素 a 浓度进行分类,得到不同水体组分浓度下反射率光谱曲线;然后分别获得模式参数并进行模拟,得到的反射率模拟曲线与实测相对均方根误差为 0.003 5,具有更高的模拟精度.

**关键词:** 遥感反射率; 吸收系数; 散射系数; 模拟; 长江口

**中图分类号:** P733 **文献标识码:** A **DOI:**10.3969/j.issn.1000-5641.2012.01.005

## Modeling of seawater reflectance in the Yangtze Estuary and the adjacent sea

HONG Guan-lin, SHEN Fang, SHEN Hong

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

**Abstract:** The optical properties of the Yangtze Estuarine waters were discussed based on two investigations conducted respectively in August and November of 2009. It was found that the water-leaving reflectance spectra in August and November presented four types caused by different chlorophyll-a concentrations, suspended sediment concentrations and colored dissolved organic matters (CDOM). The relationships between chlorophyll-a concentration and absorption coefficient of the pigment particles were built by two ways, and two models used to simulate the reflectance spectra were established by using the parameterized optical properties, the RMSE of these models being 0.004 4 and 0.004 5, respectively. The accuracy of the model can be improved by classifying the concentrations of chlorophyll-a and suspended sediment, the RMSE was improved to 0.003 5.

**Key words:** remote sensing reflectance; absorption coefficient; scattering coefficient; modeling; Yangtze Estuary

收稿日期:2011-02

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);国家自然科学基金创新群体项目(41021064);国家自然科学基金(40871165)

第一作者:洪官林,男,硕士研究生,研究方向为海洋水色遥感. E-mail: hgl040953@163.com

通讯作者:沈芳,女,教授,博士生导师,研究方向为海岸带及近海水色遥感. E-mail: fshen@sklec.ecnu.edu.cn

## 0 引 言

遥感反射率是水体的表观光学量,是联系水体组分光学信息与卫星遥感信号的纽带.水体中所含的浮游植物、黄色物质(又称有色溶解有机质, Coloured Dissolved Organic Matter, CDOM)和悬浮颗粒物等,都能引起反射率的变化.在遥感应用中, Gordon 等<sup>[1]</sup>发表的水色组分与遥感反射率之间的关系式被广泛应用于对遥感反射率的计算,但此关系式的使用存在一些限制条件. Morel 等<sup>[2]</sup>通过建立查找表来解决这些限制条件,但查找表只能覆盖少数的波段以及浓度范围. Lee 等<sup>[3]</sup>开发了一个半分析模型来描述遥感反射率与水色组分之间的关系并很好地模拟了水体遥感反射率光谱. 马毅等<sup>[4]</sup>在吸收前人关于水色要素固有光学性质研究成果的基础上,提出了一种海水遥感反射率模型参数的优化方法,并探讨了优化结果的合理性. 况润元<sup>[5]</sup>在长江口的研究中借鉴前人的研究成果,建立了水体辐射传输模型模拟水体表面遥感反射率,但该模型在高浓度泥沙条件下模拟效果不是很理想. 本文利用 2009 年夏秋两个航次的调查,分析了长江口水体反射光谱特征以及水体组分参数化模式,并对长江口不同颗粒物浓度下水体反射光谱进行了模拟分析.

## 1 研究区域与试验方法

本文研究的区域为长江口及邻近海域(见图 1). 2009 年 8 月和 11 月两个航次共设置了 55 个采样点. 采样点主要分布于  $121^{\circ}30'E \sim 124^{\circ}E$ 、 $29^{\circ}30'N \sim 32^{\circ}30'N$ .

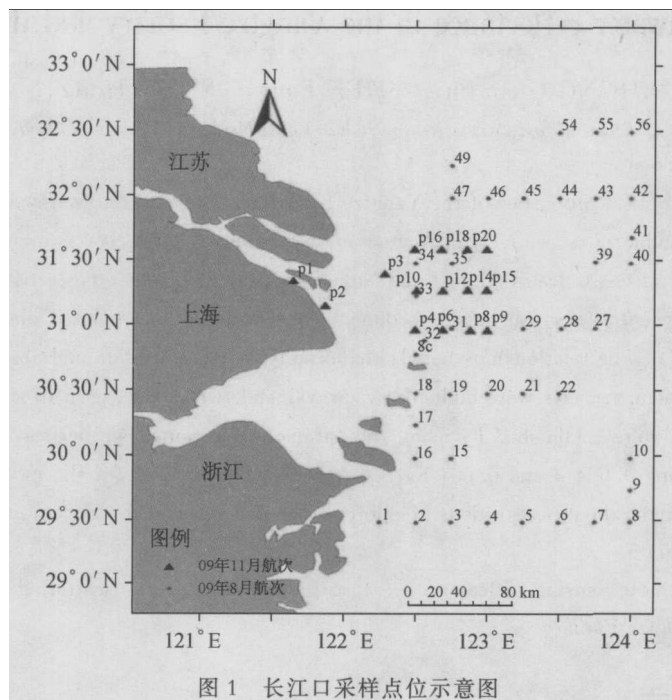


图 1 长江口采样点位示意图  
Fig. 1 Sampling locations in the Yangtze Estuary

水样的采集方法参考 NASA 的生物光学调查规范和国家海洋局 908 专项办公室编制的《海洋光学调查技术规程》<sup>[6]</sup>. 用 Niskin 采水器采集水样,分别用来测量叶绿素 a 浓度、浮游植物吸收系数、颗粒物吸收系数、总悬浮物浓度和黄色物质吸收系数等,采集的水样现场

过滤,并将样品冷冻保存带回实验室测量分析. 水体光谱反射率使用 Satlantic 公司生产的 HyperSAS 海面高光谱仪测量,水体后向散射系数则通过 bb9 测量得到. 叶绿素 a 浓度的测量采用荧光法<sup>[7]</sup>. 颗粒物吸收系数的测量则用定量滤膜技术(QFT)<sup>[8]</sup>,并使用透射方法测定其吸收系数. 黄色物质吸收系数的测量使用普析通用公司生产的 TU1901 双光束紫外分光光度计.

## 2 水体生物—光学模型

水色遥感中生物—光学模型的基本理论是 Gordon 等<sup>[1]</sup>提出的数值模型:

$$R_{rs}(\lambda) = g \times \frac{b_b(\lambda)}{b_b(\lambda) + a(\lambda)}. \quad (1)$$

其中, $R_{rs}(\lambda)$ 为遥感反射率, $g$ 为依赖于太阳高度角的常量, $b_b(\lambda)$ 为总后向散射系数, $a(\lambda)$ 为总吸收系数. 由于叶绿素 a 在光照条件下会产生荧光,因此,为完善遥感反射率正演模型,需要在式(1)中引入由高斯函数控制的叶绿素荧光项<sup>[4]</sup>:

$$R(\lambda) = F \times \exp\left(-4 \times \ln 2 \times \left(\frac{\lambda - 685}{25}\right)^2\right), \quad (2)$$

$$R_{rs}(\lambda) = g \times \frac{b_b(\lambda)}{b_b(\lambda) + a(\lambda)} + R(\lambda). \quad (3)$$

式中  $F$  为与叶绿素 a 浓度相关的量. 而在式(3)中  $a(\lambda)$  又可表示为:

$$a(\lambda) = a_w(\lambda) + a_{NAP}(\lambda) + a_g(\lambda) + a_{ph}(\lambda). \quad (4)$$

式中, $a_w(\lambda)$ 为纯水吸收系数, $a_{NAP}(\lambda)$ 为非色素颗粒吸收系数, $a_g(\lambda)$ 为黄色物质吸收系数, $a_{ph}(\lambda)$ 为浮游植物吸收系数. 在吸收系数中,纯水吸收系数可参照文献[5]取值.

### 2.1 水体组分吸收系数

#### 2.1.1 黄色物质吸收系数

黄色物质的光学特性主要表现为吸收,吸收光谱主要表现在紫外以及蓝光波段. 随着波长的增加吸收系数呈指数规律下降:

$$a_g(\lambda) = a_g(\lambda_0) \times \exp(-S_g \times (\lambda - \lambda_0)). \quad (5)$$

式中, $a_g(\lambda)$ 为波长  $\lambda$  处吸收系数, $\lambda_0$  一般取 440; $S_g$  为斜率,可通过实测数据拟合得到. 本研究根据 8 月及 11 月实测数据得到  $a_g(440)$  平均值为 0.334 7. 在 300~600 nm 波段范围内以 440 nm 为参考波长对  $a_g(\lambda)$  进行拟合,得到  $S_g$  值最小为 0.008 nm<sup>-1</sup>,最大为 0.016 nm<sup>-1</sup>,大部分值分布于 0.011~0.013 nm<sup>-1</sup>. 本文在研究中取  $S_g$  的平均值 0.012 7 nm<sup>-1</sup>.

#### 2.1.2 非色素颗粒物吸收系数

由于长江口水体中悬浮泥沙浓度远远高于浮游植物以及黄色物质,因此本文在研究中以悬浮泥沙来代表水体中非色素颗粒物组分. 非色素颗粒物吸收系数  $a_{NAP}(\lambda)$  光谱曲线和黄色物质吸收光谱相似,随着波长的增加而呈指数规律降低. 吸收系数的大小与浓度具有一定的关系,随着非色素颗粒物浓度的增加,吸收系数变大. 吸收系数整体曲线在短波处变化幅度较大,在长波处变化不明显. Shen 等<sup>[9]</sup>在对长江口非色素颗粒物光学特性研究中以 440 nm 为参考波长,用指数函数来表示非色素颗粒吸收系数:

$$a_{NAP}(\lambda) = a_{NAP}(440) \times \exp(-S_d \times (\lambda - 440)). \quad (6)$$

式中, $a_{NAP}(\lambda)$ 为波长  $\lambda$  处非色素颗粒物吸收系数, $S_d$ 为经验常数,本文中  $S_d$  使用 Shen 所得

到的值 0.01. Shen 等<sup>[9]</sup>在研究中进一步对口内非色素颗粒 440 nm 吸收系数与浓度的关系进行研究,发现它们具有良好的线性关系:

$$a_{\text{NAP}}(440) = 26.74 \times C_{\text{NAP}} + 0.2916. \quad (7)$$

式中  $C_{\text{NAP}}$  为非色素颗粒物浓度.

### 2.1.3 浮游植物吸收系数

两个航次叶绿素 a 浓度的总体范围为 0~16 mg/m<sup>3</sup>, 叶绿素 a 浓度高值主要分布在 122°20'E~122°50'E 的条带状区域中. 在条带状区域之外, 叶绿素 a 浓度大小约为 2 mg/m<sup>3</sup>. 形成这种分布主要是由于长江口径流带来的营养物质以及长江口最大浑浊带共同作用的结果<sup>[10]</sup>. 浮游植物吸收系数呈典型的双峰结构, 很多研究表明<sup>[11,12]</sup>, 用 440 nm 吸收系数或 675 nm 吸收系数可与叶绿素 a 浓度建立良好的相关关系. 本文利用 440 nm 吸收系数与叶绿素 a 浓度进行统计分析, 得到如下关系式:

$$a_{\text{ph}}(440) = 0.072 \times C_{\text{chl}}^{0.461}. \quad (8)$$

式中,  $a_{\text{ph}}(440)$  为浮游植物在 440 nm 的吸收系数,  $C_{\text{chl}}$  为叶绿素 a 浓度. Lee<sup>[13]</sup>在研究中将浮游植物吸收系数在 440 nm 作归一化, 然后将吸收光谱以  $a_{\text{ph}}(440)$  为参考波长对其他波段吸收系数进行模拟. 这个方法建立了浮游植物各波段吸收系数与 440 nm 吸收系数的关系. 在此基础上, 通过 440 nm 吸收系数与叶绿素 a 浓度的统计模式(公式 8)可以得到浮游植物吸收系数与叶绿素 a 浓度之间的关系. 公式如下:

$$a_{\text{ph}}(\lambda) = (a + b \times \ln(a_{\text{ph}}(440))) \times a_{\text{ph}}(440). \quad (9)$$

式中  $a$ 、 $b$  为随波长变化的经验参数. 本文中通过拟合得到  $a$ 、 $b$  值, 如表 1 所示.

表 1 通过拟合得到的经验参数

Tab. 1 The experience parameters got by fitting the absorption spectrum

波长/nm	$a$	$b$	波长/nm	$a$	$b$
750	0	0	530	0.325 16	-0.039 56
740	0.005 997	-0.006 01	520	0.365 75	-0.042 52
730	0.006 043	-0.008 48	510	0.405 13	-0.058 36
720	0.011 856	-0.020 88	500	0.481 55	-0.047 9
710	0.021 161	-0.032 44	490	0.529 4	-0.057 41
700	0.052 336	-0.043 86	480	0.589 19	-0.045 06
690	0.246 1	0.010 884	470	0.674 4	-0.040 71
680	0.494 19	0.018 846	460	0.800 8	0.007 577
670	0.563 74	0.028 023	450	0.871 33	5.41E-05
660	0.343 4	0.024 637	440	1	0
650	0.201 05	-0.016 47	430	0.985 02	0.082 295
640	0.201 72	-0.025 24	420	1.000 3	0.042 391
630	0.198 83	-0.019 41	410	0.944 34	0.044 632
620	0.197 16	-0.001 32	400	0.881 31	0.019 101
610	0.154 38	-0.054 21	390	0.881 26	0.112 7
600	0.149 69	-0.025 03	380	0.861 72	-0.006 09
590	0.166 46	-0.031 04	370	0.890 36	0.163 89
580	0.169 37	-0.034 62	360	0.875 47	0.027 179
570	0.154 75	-0.067 9	350	1.394 5	0.240 1
560	0.193 02	-0.048 14	340	1.876 3	0.477 68
550	0.244 42	-0.060 62	330	2.347 3	0.672 18
540	0.258 45	-0.090 31	320	2.521 8	0.693 77

为比较不同浓度下浮游植物的吸收系数, 通常将浮游植物的吸收系数比上叶绿素 a 浓

度,得到浮游植物比吸收系数  $a_{ph}^*(\lambda)$ ,两个季节比吸收系数具体信息见表 2. 比较不同季节  $a_{ph}^*(440)$ 、 $a_{ph}^*(674)$ ,夏季的值明显要高于秋季. 夏季  $a_{ph}^*(440)$  变化范围为  $0.014 \sim 0.415 \text{ m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$ ,平均值为  $0.077 \text{ m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$ ;  $a_{ph}^*(674)$  的变化范围为  $0.006 \sim 0.126 \text{ m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$ ,平均值为  $0.035 \text{ m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$ . 这个结果与珠江口及广东沿海区域的比吸收系数分布接近. 很多研究表明<sup>[14-16]</sup>,叶绿素比吸收系数的变化主要由辅助色素与色素打包效应造成. 各种不同的色素光谱形状各不相同,它们的组合形成了叶绿素比吸收系数的光谱形状. 因此当各种色素含量不同时,就会在比吸收光谱曲线上反映出来. 而在建立生物-光学模型时,很多研究者<sup>[17-19]</sup>将同一区域比吸收系数  $a_{ph}^*(\lambda)$  假定为不变的光谱曲线,以此来获得叶绿素 a 浓度与浮游植物吸收系数之间的关系:

$$a_{ph}(\lambda) = C_{chl} \times a_{ph}^*(\lambda). \quad (10)$$

表 2 夏、秋两季浮游植物 440 nm、674 nm 比吸收系数

Tab. 2 The specific absorption coefficients of phytoplankton at 440 nm and 670 nm  $\text{m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$

比吸收系数	$a_{ph}^*(440)$	平均值	$a_{ph}^*(674)$	平均值
夏季航次	0.014~0.415	0.077	0.006~0.126	0.035
秋季航次	0.002~0.074	0.031	0.002~0.037	0.017

## 2.2 颗粒物后向散射系数

水体散射主要由纯水和颗粒物的散射构成. 水体总悬浮颗粒物由浮游植物和悬浮泥沙组成,因此,在散射系数中,黄色物质的散射贡献可以忽略. Sathyendranath 等<sup>[20]</sup>和 Carder 等<sup>[21]</sup>分析海洋环境水色数据得出颗粒后向散射系数可用  $\lambda^{-n}$  形式表示. 李铜基等<sup>[22]</sup>根据黄东海测量的后向散射系数构建了线性光谱模型. 况润元<sup>[5]</sup>在研究长江口水体光学特性时以 532 nm 为参考波长建立非色素颗粒物后向散射系数推导公式:

$$b_{bNAP}(\lambda) = (\partial_1 \times \lambda + \partial_2) \times b_{NAP}(532) \times p. \quad (11)$$

式中,  $\partial_1$ 、 $\partial_2$  为经验参数,  $p$  为后向散射与散射系数的比值,在此处取 0.027 3.  $b_{NAP}(532)$  为 532 nm 处与非色素颗粒物浓度相关的散射系数,可通过幂函数来表示:

$$b_{NAP}(532) = \partial_3 \times C_{NAP}^{\partial_4}, \quad (12)$$

式中  $\partial_3$ 、 $\partial_4$  为经验参数. 纯水的后向散射系数为<sup>[23]</sup>:

$$b_{bw}(\lambda) = 0.0038 \times \left(\frac{400}{\lambda}\right)^{4.3}. \quad (13)$$

理论研究和实验分析表明水体中浮游植物具有很低的后向散射系数. 而在长江口高悬沙浑浊水体中,浮游植物的散射系数相对于悬浮泥沙几乎可以忽略. 因此,本文在研究中将公式(12)中的非色素颗粒物浓度使用总悬浮物浓度代替,将颗粒物后向散射系数统一考虑. 通过公式(11)、(12)和(13)来得到水体的总后向散射系数.

## 3 结果与讨论

### 3.1 水体反射光谱特征

水体组分卫星遥感模式的建立需要由水体反射率来联系卫星信号和水体组分光学信息. 因此,对水体反射光谱的研究有助于遥感定量模型的建立. 通过两个航次的调查,发现遥感反射率值基本在  $0.06 \text{ sr}^{-1}$  以下. 遥感反射率光谱曲线在  $400 \sim 550 \text{ nm}$  较低,并随波长增大而升高,这种情况一方面是由浮游植物、悬浮泥沙及黄色物质在短波高吸收,并在长波长

吸收降低所造成的,另一方面也与悬浮颗粒的散射有关;在 550~700 nm 遥感反射率达到峰值,峰值的波宽、强度以及位置随着水体组分浓度的变化而变化;由于纯水在红外波段的高吸收,反射率在红外波段开始出现低值,而在 820 nm 附近由于悬浮泥沙的作用会形成一个反射峰,并随着泥沙浓度的降低,反射峰逐渐消失.长江口水体状况复杂,不同的水体组分以及各种复杂环境形成了多种不同的反射率曲线形状. Shen 等<sup>[4]</sup>将现场实测的长江口遥感反射率光谱曲线分为 4 种形式,况润元<sup>[26]</sup>则在研究中将反射光谱分成八种类型. 在本研究中,根据实测反射率数据,可分成以下 4 种反射率曲线形状:Sp1 型(见图 2a),高悬沙浓度反射率光谱. 整体反射率较高,550~700 nm 形成一个宽峰,700 nm 附近峰值略高,820 nm 附近有一个明显的反射峰值. 这种曲线泥沙浓度范围 0.27~0.52 g/L,叶绿素 a 浓度范围 0.91~1.51 mg/m<sup>3</sup>. Sp2 型(见图 2b),反射峰位于 580 nm 附近. 当泥沙浓度较高时,580 nm~700 nm 仍存在一个不明显的宽峰,但此处反射率值随波长增大而降低. 在 820 nm 由于泥沙浓度的降低,反射峰开始变得不明显. 这些反射光谱对应的水体中,泥沙浓度在 0.007~0.05 g/L,叶绿素 a 浓度为 1.59~8.72 mg/m<sup>3</sup>. Sp3 型(见图 2c),高叶绿素 a 浓度反射光谱. 560 nm 与 680 nm 分别有一个反射峰,由于叶绿素 a 浓度较高,440 nm 与 660 nm 处形成反射谷突出了 560 nm 处的反射峰. 在 680 nm 由于叶绿素荧光作用形成反射峰. 包含的泥沙浓度 0.007~0.014 g/L,叶绿素 a 浓度在 2.00~15.58 mg/m<sup>3</sup>. Sp4 型(见图 2d),由于泥沙浓度的降低,整体反射光谱较低,叶绿素 a 浓度较低造成 440 nm 与 660 nm 处反射谷不是很明显,因此 500 nm~580 nm 反射峰并不突出,而在 680 nm 的荧光峰也不是很明显. 这种光谱曲线的水体含有泥沙 0.006~0.018 g/L,叶绿素 a 浓度 0.72~3.61 mg/m<sup>3</sup>.

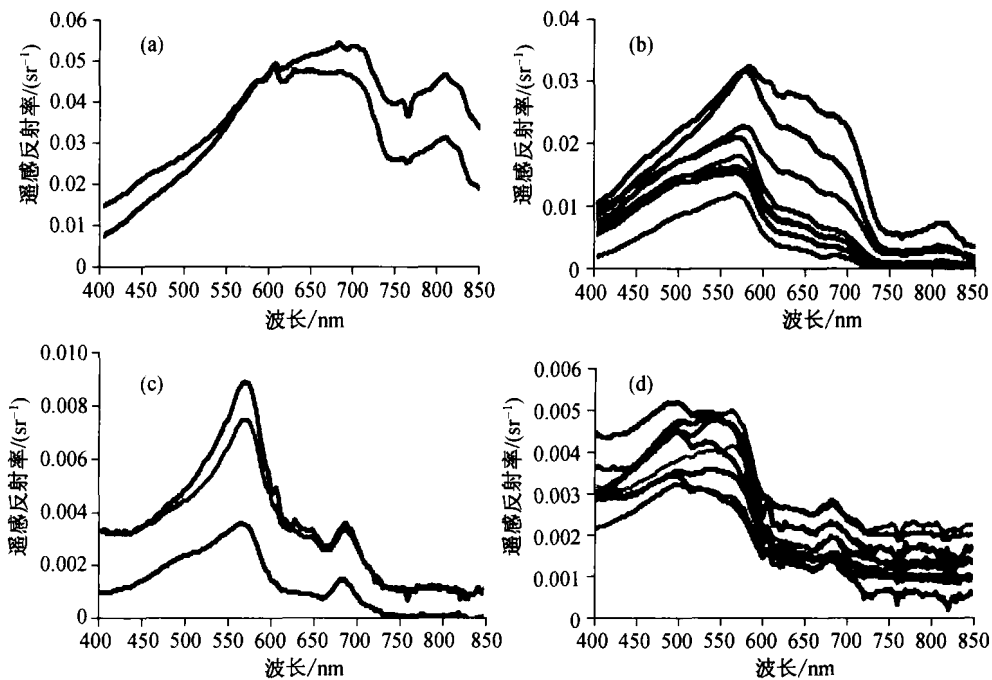


图 2 4 种水体反射光谱

Fig. 2 Four types of spectral remote-sensing reflectance curves

### 3.2 水体反射光谱的模拟

联系公式(2)~(13),即可用最小二乘法对水体遥感反射率进行模拟. 本文中使用的反

射率模拟方法参考马毅<sup>[4]</sup>等开发的模型参数优化方法.以公式(2)、(11)和(12)中的参数  $F$ 、 $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$  和  $a_4$  为未知参数.通过拟合遥感反射光谱来得到最优参数,并通过两种叶绿素 a 浓度与吸收系数的关系模式来模拟反射率光谱曲线:模式一,模型中叶绿素 a 浓度与浮游植物吸收系数关系模式使用公式(8)和(9);模式二,模型中叶绿素 a 浓度与浮游植物吸收系数关系模式使用公式(10).图 3 所示为两种模式分别模拟得到的 4 种类型的遥感反射率光谱曲线.与实测光谱比较,模式一与模式二的均方根误差为 0.004 4 和 0.004 5.可以看出模式一在精度上要比模式二略高,而且这种差距很小.造成这种精度上的细微差距的主要原因是由于公式(10)中比吸收系数并非是一条不变的曲线,而是与生物学变量有关,在不同的海区具有不同的光谱形状以及大小,对于它不变的假设引进了误差.对比模拟光谱与实测光谱,可以发现 4 种类型反射光谱模拟时误差分布各不相同.在 Sp1 型高悬沙浓度光谱中,模拟误差主要集中在 560 nm 以后,模拟值低于实测值;而 Sp2 型光谱在模拟时误差在 380~600 nm,模拟值也低于实测值;当悬浮泥沙浓度降低,而水体中存在一定量的浮游植物时,在浮游植物吸收峰与叶绿素荧光峰附近,模拟值与实测值较一致.在短波长 400 nm 附近,4 种类型光谱的模拟与实测值误差都较大.这些误差的出现与模型中吸收与散射部分模拟的准确度相关.当水体组分浓度变化过大时,模式不能很好地响应,就会在模拟时产生较大误差.缩小遥感反射率模拟中水体组分浓度范围在一定程度上可以减少误差.因此,根据前面讨论的反射率光谱种类以及长江口悬浮泥沙和叶绿素 a 浓度的大小分布,对反射率光谱进行分组讨论(见表 3).4 种浓度范围的划分分别对应图 2 中讨论的 4 种遥感反射率光谱类型.

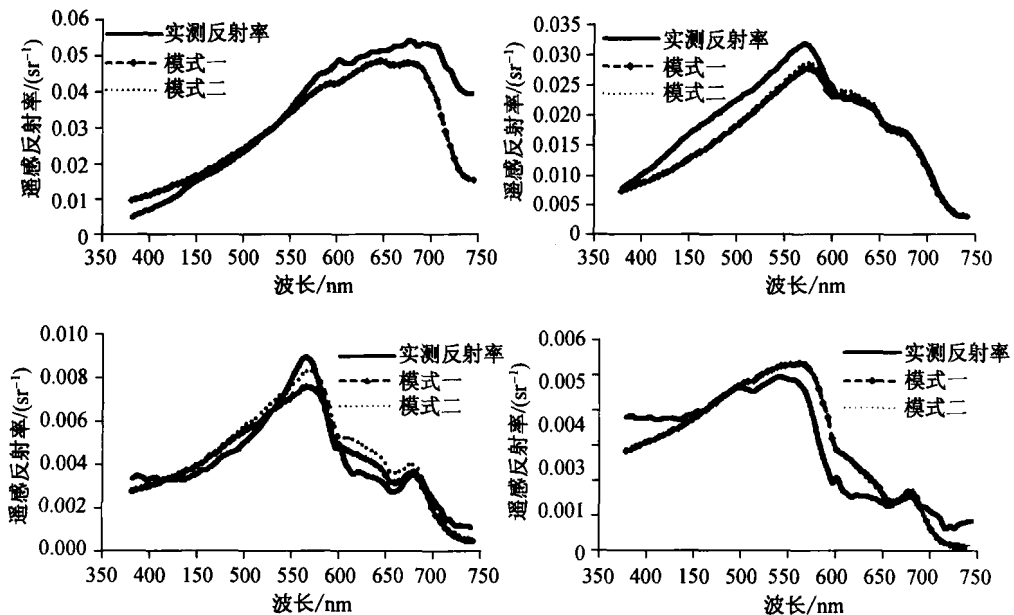


图 3 模拟反射光谱

Fig. 3 In situ and simulated spectra of remote-sensing reflectance using two models

根据以上浓度分类,使用最小二乘法,分别得到对应的 4 组参数,将参数代入模式一中对反射光谱进行模拟.图 4 所示为通过浓度分类模拟得到的反射光谱.与实测光谱对比,通过浓度分组后模拟得到的遥感反射率光谱均方根误差为 0.003 5,精度明显提高.但在 580~700 nm 范围内,模拟的光谱曲线仍然存在误差.由于叶绿素 a 浓度与 440 nm 吸收系数的统

计模式相关性不是很高,反射光谱曲线中对叶绿素敏感波段的模拟存在较大误差.对模式一、模式二及浓度分类方法进行误差评价,图 5 所示为所有站点分别通过 3 种模拟方法得到的部分波段遥感反射率值与实测值的对比.表 4 所示为 3 种方法模拟的误差,可以看到浓度分类方法模拟的精度最高,均方根误差 0.003 5,模式一次之,模式二的精度最小.三者的平均相对误差仍然有待提高,对于这些误差的解决需要更多的实验数据来加以分析和验证,希望在以后的工作中能使之完善.

表 3 根据叶绿素 a 浓度与悬浮泥沙浓度对遥感反射光谱分类

Tab. 3 Classification of remote sensing reflectance by chlorophyll-a concentration and suspended sediment concentration

对应遥感反射率种类	叶绿素 a 浓度/(mg · m <sup>-3</sup> )	悬浮泥沙浓度/(mg · L <sup>-1</sup> )
Sp1 型	0~2	>100
Sp2 型	>2	20~100
Sp3 型	>2	0~20
Sp4 型	0~2	0~20

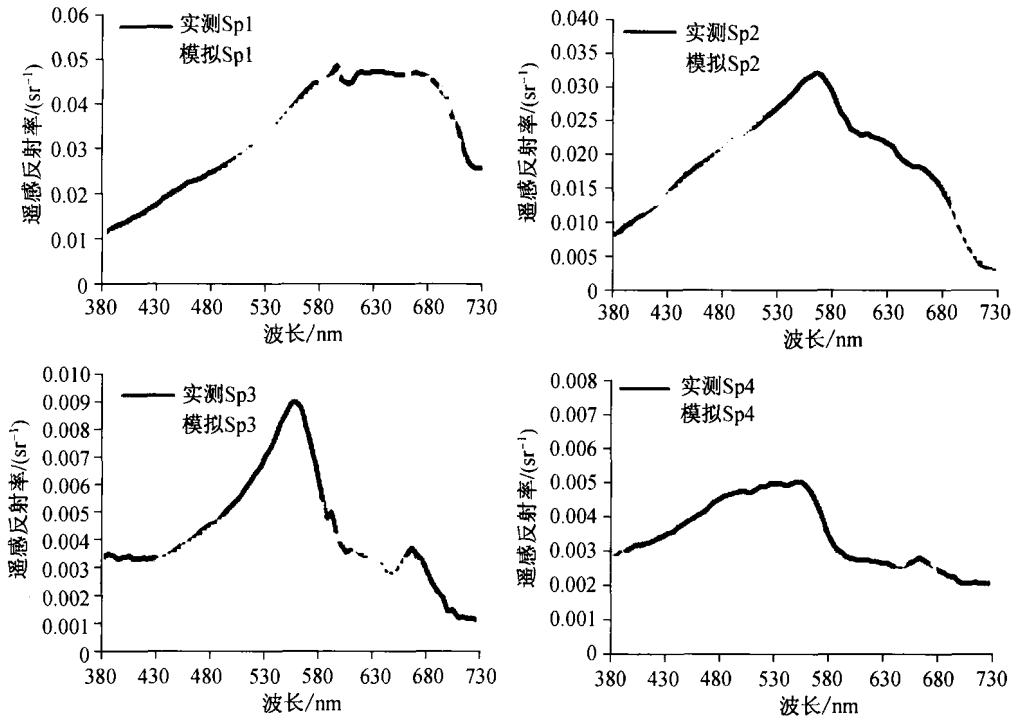


图 4 通过浓度分类模拟的 4 种类型遥感反射率光谱和实测光谱

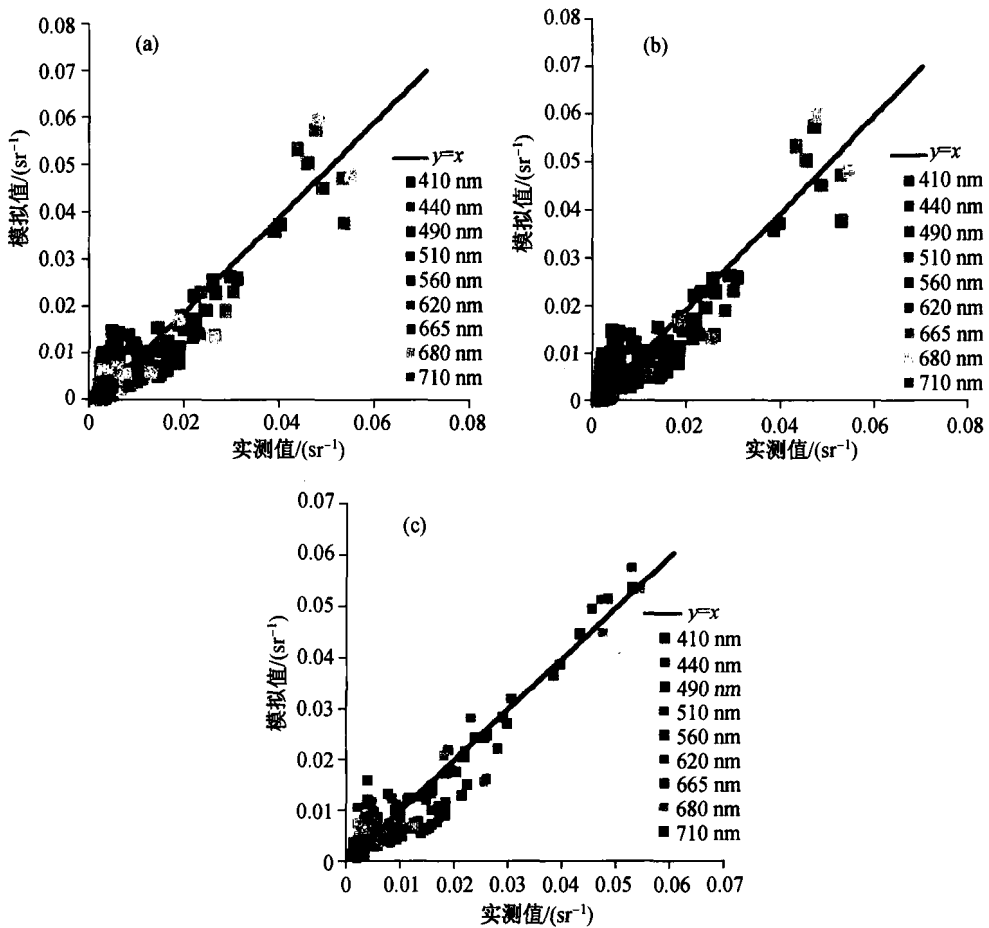
Fig. 4 In situ and simulated spectra of remote-sensing reflectance under the different cases

表 4 3 种模式精度分析

Tab. 4 Simulation error by three methods

	平均相对误差 RE	均方根误差 RMSE	样本数
模式一	0.63	0.004 4	22
模式二	0.65	0.004 5	22
浓度分段模拟	0.47	0.003 5	22





注:a、b、c分别为模式一、模式二,以及通过浓度分段模拟的部分波段遥感反射率值与实测值

图 5 模拟遥感反射率值与实测值

Fig. 5 Simulated and measured remote sensing reflectance

### 3 结 论

本文分析了长江口邻近海域水体反射率光谱特征,根据光谱形状可将反射光谱分成 4 类.浮游植物 440 nm 吸收系数与叶绿素 a 浓度具有良好的幂函数关系,并可通过两种方式分别表示吸收系数与叶绿素 a 浓度之间的关系.使用这两种浮游植物吸收系数与叶绿素 a 浓度之间的关系分别建立模型来模拟水体反射率,模拟出的反射率曲线精度较高.对比两个模式,模式一在精度上略高于模式二.由于长江口复杂的水质状况,一组参数不能很好地模拟所有的光谱曲线.在模式建立中,根据悬浮泥沙与叶绿素 a 浓度的大小分布来分别进行反射光谱的模拟,使得模式在相应的浓度范围内精度有所提高.对于存在的误差,则需要更多的数据来加以分析和验证,从而使反射光谱的模拟精度得以提高.

### [参 考 文 献]

[ 1 ] GORDON H R, BROWN O B, EVENS R H, et al. A semianalytic radiance model of ocean color[J]. Journal of Geophysical Research, 1988, 93D: 10909-10924.  
 [ 2 ] MOREL A, GENTILI B. Diffuse reflectance of oceanic waters II ; Bidirectional aspects[J]. Appl Opt, 1993,32:

- 6864-6879.
- [3] LEE Z P, KENDALL L C, DU K P. Effects of molecular and particle scatterings on the model parameter for remote-sensing reflectance[J]. *Appl Opt*, 2004, 43(25): 4957-4964.
- [4] 马毅,张杰,崔廷伟,等.一种基于海面光谱数据的海水遥感反射率模型参数优化方法[J].*海洋科学进展*, 2004, 22:28-33.
- [5] 况润元.长江口水色遥感参数模拟研究[D].上海:华东师范大学,2010: 1-145.
- [6] 国家海洋局 908 专项办公室.海洋光学调查技术规程[M].北京:海洋出版社,2006.
- [7] KISHINO M, TAKAHASHI M, OKAMI N, et al. Estimation of the spectral absorption coefficients of phytoplankton in the sea[J]. *Bull Mar Sci*, 1985, 37: 634-642.
- [8] YENTSCH C S. Measurement of visible light absorption by particulate matter in the ocean[J]. *Limnology and oceanography*, 1962(7): 207-217.
- [9] SHEN F, ZHOU Y X, HONG G L. Absorption property of non-algal particles and contribution and contribution to total light absorption in optically complex waters, a case study in Yangtze Estuary and adjacent Coast[C]//2010 international Conference on Remote Sensing, 2010(2): 571-574.
- [10] 洪官林,沈芳.长江口邻近海域叶绿素光学特性研究[C]//2010 International Conference on Remote Sensing, 2010(4):562-565.
- [11] 曹文熙,杨跃忠,许晓强,等.珠江口悬浮颗粒物的吸收光谱及其区域模式[J].*科学通报*,2003,48(17):1876-1882.
- [12] 王林,赵冬至,杨建洪,等.北黄海浮游植物吸收系数的季节性变化研究[J].*海洋环境科学*,2010,29(1):60-65.
- [13] LEE Z P. Visible-infrared remote-sensing model and applications for ocean waters[D]. St. Petersburg, Fla. :Department of Marine Science, University of South Florida, 1994.
- [14] LE C F, LI Y M, ZHA Y, et al. Specific absorption coefficient and the phytoplankton package effect in Lake Taihu, China[J]. *Hydrobiologia*, 2009, 619: 27-37.
- [15] KOJI SUZUKI, MOTOAKI KISHINO, KOUSEI SASAOKA, et al. Chlorophyll-Specific Absorption Coefficients and Pigments of Phytoplankton off Sanriku, Northwestern North Pacific[J]. *Journal of Oceanography*, 1998, 54: 517-526.
- [16] ANNICK BRICAUD, MARCEL BABIN, ANDRE MOREL, et al. Variability in the chlorophyll-specific absorption coefficients of natural phytoplankton: Analysis and parameterization[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100: 13321-13332.
- [17] BERTHON J F, MOREL A. Validation of a spectral light photosynthesis model and use of the model in conjunction with remotely sensed pigment observation[J]. *Limnol Oceanogr*, 1992, 37: 781-796.
- [18] BRICAUD A, BABIN M, MOREL A, et al. Variability in the chlorophyll-specific absorption coefficients of natural phytoplankton: Analysis and parameterization[J]. *J Geophys Res*. 1995, 100: 13321-13332.
- [19] BANNISTER T T. Production equations in terms of chlorophyll concentration, quantum yield, and upper limit to production [J]. *Limnology and Oceanography*, 1974, 19(1): 1-2.
- [20] SATHYENDRANATH S, PRIEUR L, MOREL A. A three-component model of ocean colour and its application to remote sensing of phytoplankton pigments in coastal waters[J]. *Int J Remote Sensing*, 1989(10): 1373-1394.
- [21] CARDER K L, CHEN F R, LEE Z P, et al. Semianalytic Moderate-Resolution Imaging Spectrometer algorithms for chlorophyll a and absorption with bio-optical domains based on nitrate- depletion temperatures[J]. *J Geophys Res*, 1999, 104: 5403-5421.
- [22] 李铜基,陈清莲,杨安安.黄东海春季水体后向散射系数的经验模型研究[J].*海洋技术*, 2004, 23(3):10-14.
- [23] LEE Z P, CARDER K L, Peacock T G, et al. Method to derive ocean absorption coefficients from remote-sensing reflectance[J]. *Applied Optics*, 1996, 35(3): 453-462.
- [24] MOREL A. Bio-optical properties of oceanic waters: A reappraisal[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(4): 7163-7180.
- [25] GORDON H R, MOREL A. Remote assessment of ocean color for interpretation of satellite visible imagery: A review[J]. *Coastal and Estuarine Studies*, 1983(4):118.