

# 中国近海非色素颗粒物的光学特性\*

周虹丽, 朱建华, 李铜基, 汪小勇

国家海洋技术中心, 天津 300112

**摘要:** 非色素颗粒物是中国近海水体光学特性的重要影响因素。基于在中国近海海洋光学调查中获取的 1355 个站点的非色素颗粒物吸收系数数据, 对非色素颗粒物 440nm 吸收系数  $a_d(440)$  及其光谱斜率  $S_d$  进行了分析, 研究表明: 1) 在封闭或半封闭海湾以及河口海域的  $a_d(440)$  较其他海域明显偏大; 2)  $a_d(440)$  占水体 440nm 总吸收系数  $a_t(440)$  的百分比值分布特点与  $a_d(440)$  的分布特点一致, 即  $a_d(440)$  越大, 其对水体总吸收的贡献越大; 3)  $S_d$  与  $a_d(440)$  仅在两个海域表现出一定的弱负相关性, 在其他绝大部分海域两者的相关性较弱。

**关键词:** 非色素颗粒物; 吸收光谱; 光谱斜率

中图分类号: P733.3 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2012)06-0057-05

## Optical properties of de-pigmented particles offshore of China

ZHOU Hong-li, ZHU Jian-hua, LI Tong-ji, WANG Xiao-yong

National Ocean Technology Center, Tianjin 300112, China

**Abstract:** De-pigmented particles play an important role in determining the optical properties of seawater in coastal oceans. Using the data collected at about 1,355 stations offshore of China, variations in the spectral absorption of de-pigmented particles at 440 nm ( $a_d(440)$ ) and their spectral slope ( $S_d$ ) were investigated. Higher values of  $a_d(440)$  were observed in enclosed or semi-enclosed bay waters and estuarine waters. The contribution of de-pigmented particles to total seawater absorption at 440 nm shows the similar distribution with that of  $a_d(440)$ . Except for weak negative correlations in two study areas, there is no obvious relationship between  $a_d(440)$  and  $S_d$  in most parts of our study areas.

**Key words:** de-pigmented particle; absorption coefficient; spectral slope

在中国近海海域, 非色素颗粒物主要由浮游植物的残体、细菌、无机颗粒物等组成, 中国近海大部分水体表现出光学性质较为复杂的二类水体的特点, 非色素颗粒物对水体光学性质的影响十分显著, 在近岸水体中非色素颗粒物甚至对水体光学特性起决定作用。非色素颗粒物是水色遥感最为关心的参数之一, 是研究海水光学特性的一个重要参数<sup>[1]</sup>。由于非色素颗粒物吸收光谱呈指数衰减, 了解其光谱斜率成为研究非色素颗粒物光学性质的一个重要方面。国外大量学者进行了相关方面的研究<sup>[2-5]</sup>, 得到的光谱斜率平均值大多分布在 0.011—0.012nm<sup>-1</sup>;

国内学者对近海典型区域的相关研究也有报道<sup>[6-10]</sup>, 其平均值约为 0.009—0.011nm<sup>-1</sup>。

本文基于我国近海海洋综合调查与评价专项 (“908” 专项) 中我国近海海洋光学调查项目获取的大量现场实测非色素颗粒物吸收特性数据, 分析了不同海区非色素颗粒物光吸收特性分布特点及非色素颗粒物光谱斜率的分布特征和主要的影响因素, 研究了光谱斜率与非色素颗粒物 440nm 吸收系数之间的关系。这对进一步研究中国近海水体光学特性和促进水色遥感在近海海域的应用具有一定的意义和作用。

收稿日期: 2011-01-21; 修订日期: 2011-03-06。孙淑杰编辑

基金项目: 我国近海海洋综合调查与评价专项(908-01-ST11、908-I-ZC-04)

作者简介: 周虹丽(1978—), 女, 河北省怀安县人, 工程师, 硕士, 从事海洋光学遥感研究。E-mail: 914\_lili@163.com

\*本课题得到 ST11 区块海洋光学调查与研究项目组全体成员的协助, 在此深表感谢。

## 1 实验方法

图 1 给出在“908”专项中国近海海洋光学调查中获取非色素颗粒物吸收系数的调查站位。非色素

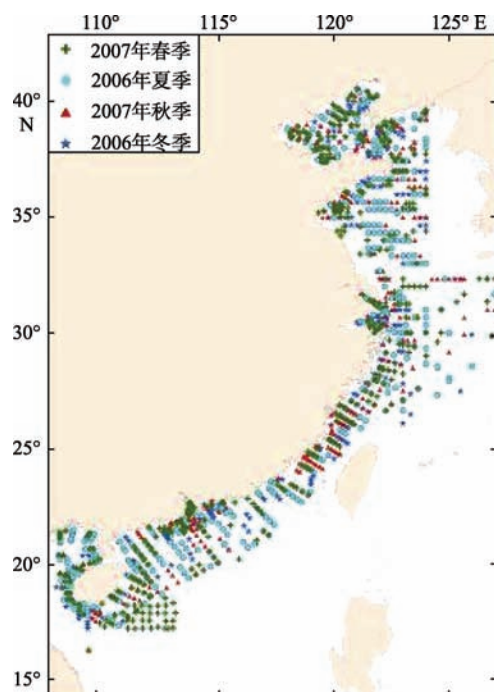


图 1 中国近海海洋光学调查区域分布图

Fig. 1 Map of study region for the marine optical survey offshore of China

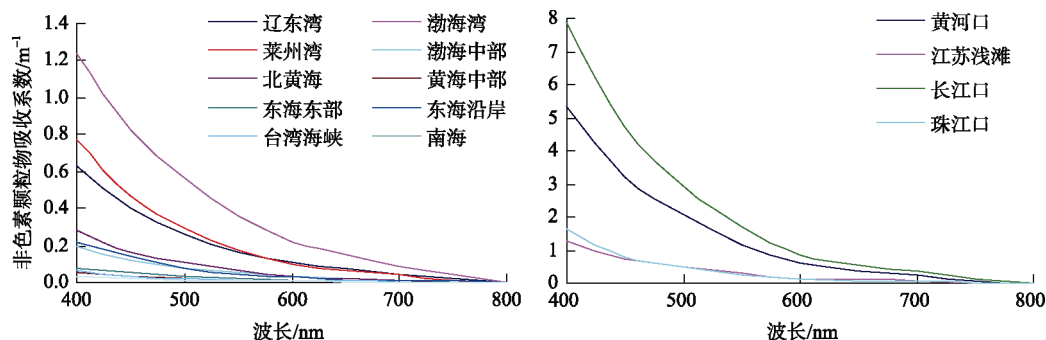


图 2 中国近海典型区域非色素颗粒物吸收光谱

Fig. 2 Spectra of absorption by de-pigmented particles in typical offshore regions of China

## 2 结果与分析

### 2.1 非色素颗粒物 440nm 吸收系数

在海洋光学研究中, 非色素颗粒物在 440nm 的吸收系数可以间接地反映非色素颗粒物的含量。表 1 是中国近海各海区非色素颗粒物的极值统计表, 从表中可以看出各个海区  $a_d(440)$  差异较大, 东海海区的  $a_d(440)$  平均值最大, 南海的  $a_d(440)$  平均值最小。图 3a 是中国近海各海区非色素颗粒物 440nm 吸收系数的分布频次图, 由图和表可见  $a_d(440)$  变化

颗粒物吸收系数的获取严格遵循“908”专项《我国近海海洋光学调查技术规程》<sup>[11]</sup>。

非色素颗粒物吸收系数由下式计算得到<sup>[11]</sup>:

$$a_d(\lambda) = \frac{2.303A_f}{\beta V_f} [D_{fd}(\lambda) - D_{bf}(\lambda) - D_{null}] \quad (1)$$

$$\beta = [C_1 + C_2 [D_{fd}(\lambda) - D_{null}]]^{-1} \quad (2)$$

式中,  $a_d(\lambda)$  是非色素颗粒物吸收系数,  $V_f$  是过滤的水样体积,  $A_f$  是滤纸上富集有颗粒物的滤纸面积,  $D_{fd}(\lambda)$  是样品滤纸测得的光学密度,  $D_{bf}(\lambda)$  是完全水合滤纸的空白的光学密度,  $D_{null}$  是颗粒物吸收在近红外波段的残余校正,  $\beta$  是光程放大校正因子,  $C_1$ 、 $C_2$  是光程放大因子的经验系数。图 2 是中国近海典型区域非色素颗粒物吸收系数光谱图, 图中各典型海区不同采样点非色素颗粒物吸收系数的差异很大。

非色素颗粒物吸收系数的光谱斜率根据下式拟合得到<sup>[11]</sup>:

$$a_d(\lambda) = a_d(\lambda_0) \exp[-S_d(\lambda - \lambda_0)] \quad (3)$$

式中,  $\lambda_0$  是参考波长,  $a_d(\lambda_0)$  是参考波长下非色素颗粒物的吸收系数,  $S_d$  为非色素颗粒物吸收系数曲线的斜率经验值。本文选定 440nm 为参考波长, 在 380—600nm 范围之内, 利用最小二乘法, 拟合得到非色素颗粒物吸收系数光谱斜率经验值。

表 1 中国近海各海区  $a_d(440)$  极值统计

Tab. 1 Statistics of extreme  $a_d(440)$  in our study region

海区	$a_d(440)/m^{-1}$		
	最大值	最小值	平均值
渤海	7.869	0.050	0.824
黄海	15.433	0.007	0.313
东海	167.038	0.004	4.100
南海	5.451	0.002	0.115
全海区	167.038	0.002	1.411

范围为  $0.002\text{--}167.038\text{m}^{-1}$ , 平均值为  $1.411\text{m}^{-1}$ , 约有 80% 的站位其值均小于  $1\text{m}^{-1}$ 。 $a_d(440)$  高于  $10\text{m}^{-1}$  的站位极少。

图 3b 是中国近海非色素颗粒物  $440\text{nm}$  吸收系数的分布图。由图可见, 渤海海区渤海湾、黄河口-莱州湾和辽东湾等海域,  $a_d(440)$  较大, 甚至超过  $10\text{m}^{-1}$ , 渤海中部海域的  $a_d(440)$  则在  $10\text{m}^{-1}$  以内。在黄海海区, 北黄海和黄海中部海域,  $a_d(440)$  一般都小于  $0.25\text{m}^{-1}$ , 在山东半岛南部沿岸海域约为  $0.25\text{m}^{-1}$ , 而苏北浅滩的近岸海域约为  $10\text{m}^{-1}$ 。在东海, 大部分海域  $a_d(440)$  都小于  $1\text{m}^{-1}$ ; 在长江口和杭州湾海域,  $a_d(440)$  超过  $1\text{m}^{-1}$ , 而闽浙近岸和台湾海峡海域的  $a_d(440)$  约为  $0.10\text{m}^{-1}$ 。在南海北部海域  $a_d(440)$  约为  $0.025\text{--}0.05\text{m}^{-1}$ , 北部湾海域  $a_d(440)$  约

为  $0.1\text{m}^{-1}$ , 南海其他海域一般都小于  $0.05\text{m}^{-1}$ 。 $a_d(440)$  量值较大的区域分布在渤海湾、辽东湾、长江口; 其次是渤海中部、东海大部分海区、珠江口和北部湾; 量值较小的区域分布在南黄海及南海部分海域。 $a_d(440)$  总体上表现为在近岸、海湾和河口等区域量值较大, 远岸海域量值较小。这种现象一方面是由于近岸非色素颗粒物主要受陆源河流的影响, 而浮游植物或异养生物(如细菌)等的降解产物对近岸水体中非色素颗粒物的影响不大; 另一方面是由于  $a_d(440)$  与悬浮颗粒物浓度之间存在相关性<sup>[8]</sup>, 中国近海悬浮颗粒物浓度的变化很大程度受海区地理环境的影响。此外,  $a_d(440)$  与海水盐度之间也存在一定的相关性, 反映了陆源性径流输入对非色素颗粒物的吸收存在一定影响。

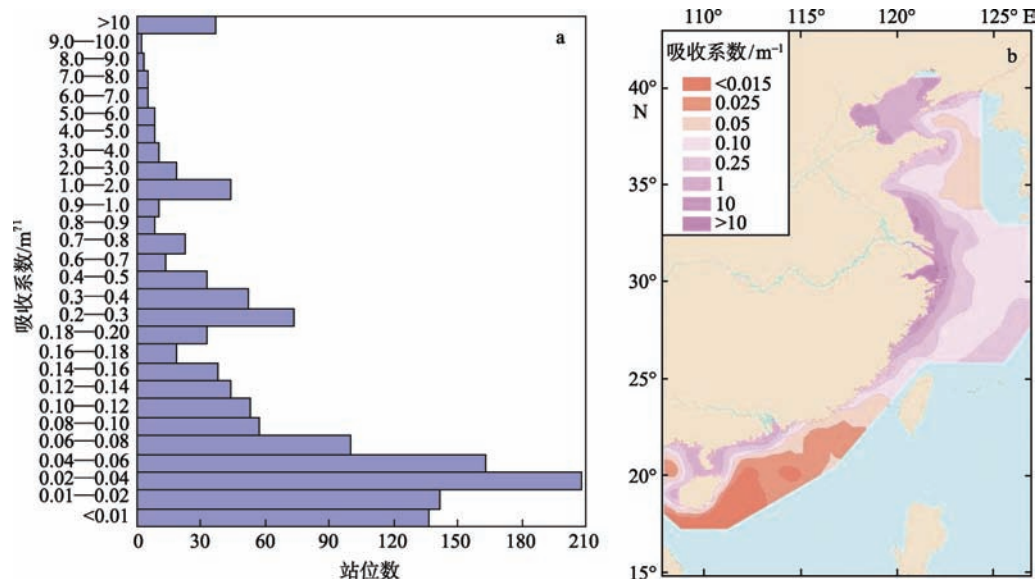


图 3 中国近海非色素颗粒物  $440\text{nm}$  吸收系数(单位:  $\text{m}^{-1}$ )分布频次(a)和分布趋势(b)

Fig. 3 Variations of frequency (a) and trend (b) in the absorption coefficient of de-pigmented particles at  $440\text{nm}$

## 2.2 非色素颗粒物对水体总吸收的贡献

本文统计了中国近海非色素颗粒物吸收系数对水体总吸收系数的贡献率 $[a_d(440)/a_t(440)]$ (图 4a), 并绘制了非色素颗粒物吸收系数贡献率的分布图(图 4b)。从图 4a 中可以看出, 中国近海非色素颗粒物吸收系数的贡献率从趋近于 0 到接近 100% 以上, 总体上呈偏正态分布, 平均值约为 33%。由此可以看出, 近海的非色素颗粒物对水体的吸收有重要贡献。从贡献率的分布图 4b 来看, 在渤海海域, 非色素颗粒物吸收系数的贡献率一般都大于 60%, 渤海湾部分海域贡献率超过 75%, 在渤海中部其值约为 60%, 而在渤海海峡海域其值逐渐降低达到 45%, 总体上表现为近岸贡献率高, 离岸贡献率低的趋势。

在黄海, 北黄海区域的辽东半岛南部近岸和山东半岛北部近岸其值约为 35%, 北黄海大部分海域约为 30%。山东半岛南部近岸贡献率略低于北部近岸, 达到 35%。黄海中部大部分海域随着离岸距离增加, 其值呈减小趋势, 最小达到 20%, 黄海中部海域达到 30%。在苏北近岸海域, 非色素颗粒物吸收系数的贡献率一般都大于 45%, 并且呈离岸距离增加而降低的趋势。在东海, 长江口、杭州湾海域以及闽浙近岸海域的非色素颗粒物吸收系数贡献率的分布特点与趋势与其在苏北近岸海域相似, 近岸约为 75%, 离岸则逐渐降低。东海外部海域的分布特点和趋势与黄海中部海域的特点相似, 其值最小达到 20%。在台湾海峡海域, 非色素颗粒物吸收系数的贡

献率约为 20%。在南海, 南海北部海域非色素颗粒物吸收系数贡献率最小, 甚至低于 15%; 粤西近岸和北部湾近岸的非色素颗粒物吸收系数贡献率约为 45%, 呈离岸距离增加而降低的趋势; 在海南岛以南的南海海域, 非色素颗粒物吸收系数的贡献率约为 20%。总体上看, 中国 4 个海区近岸的非色素颗

粒物吸收系数贡献率明显偏大, 一般都大于 45%, 这个特点在渤海湾、苏北近岸、长江口、杭州湾和闽浙近岸表现最为明显; 而在各个海区的离岸海域, 其值一般都低于 30%, 甚至更小。结合图 3b 的  $a_d(440)$  的分布来看, 非色素颗粒物吸收系数的贡献率与非色素颗粒物的吸收系数值的分布趋势一致。

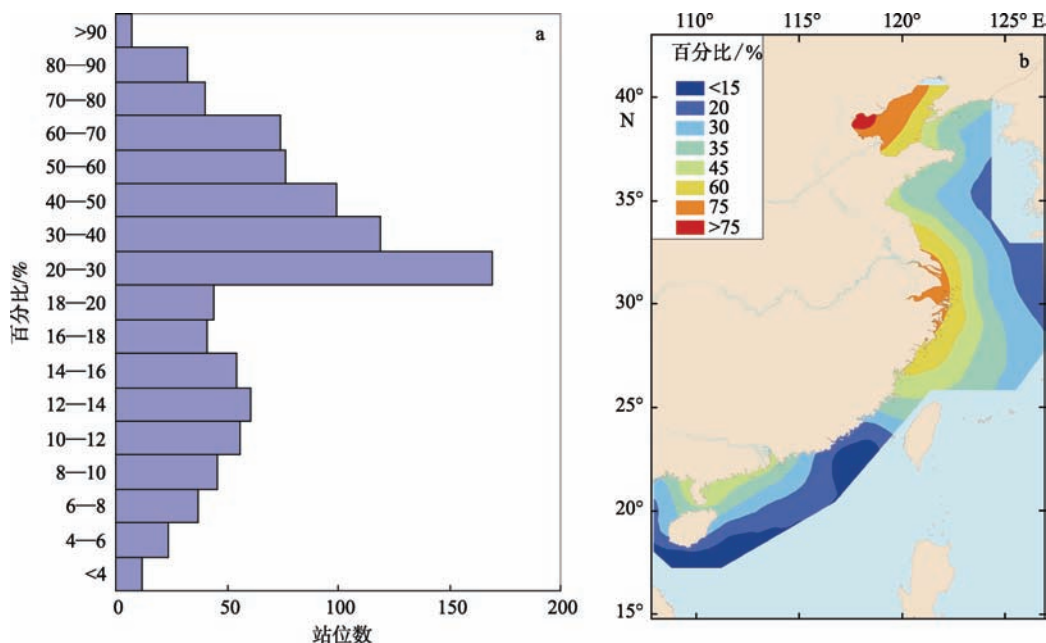


图 4 中国近海非色素颗粒物 440 nm 吸收系数占水体 440 nm 总吸收系数百分比数值分布频次(a)和分布趋势(b)

Fig. 4 Statistics (a) and distribution trend (b) of the absorption coefficient of de-pigmented particles to total absorption coefficient of seawater at 440 nm

### 2.3 非色素颗粒物光谱斜率

非色素颗粒物吸收系数的光谱斜率是非色素颗粒物吸收系数光谱的一个特征参数, 也是半分析生物-光学算法和分析生物-光学的基本参数, 在一些文献中, 也将其作为表征水体中非色素颗粒物组成和来源的重要参数<sup>[12-15]</sup>。国内外很多学者在为简化生物-光学算法和研究海区光学特征时都对非色素颗粒物吸收系数的光谱斜率进行过研究。图 5 是统计的中国近海的非色素颗粒物吸收系数光谱斜率。从图中可以看出, 中国近海  $S_d$  的范围在 0.0049—0.0175 $\text{nm}^{-1}$  之间, 多海区非色素颗粒物吸收系数光谱斜率呈现很好的正态分布趋势, 其均值为 0.0098 $\text{nm}^{-1}$ , 标准差为 0.0014 $\text{nm}^{-1}$ 。

### 2.4 $a_d(440)$ 与 $S_d$ 的关系

中国近海非色素颗粒物光学特性研究中,  $a_d(440)$  和  $S_d$  是最受关注的两个参数。 $a_d(440)$  间接反映了水体非色素颗粒物含量的多少,  $S_d$  主要反映了非色素颗粒物吸收系数随  $e$  指数衰减的程度, 不同海区的  $S_d$  值有一定的差别。通过对  $a_d(440)$  与  $S_d$  关

系的研究, 可以大致推断非色素颗粒物的来源和组成情况, 也为判断海区之间非色素颗粒物吸光物质的光学性质提供参考。如图 6 所示, 超过 92% 的站

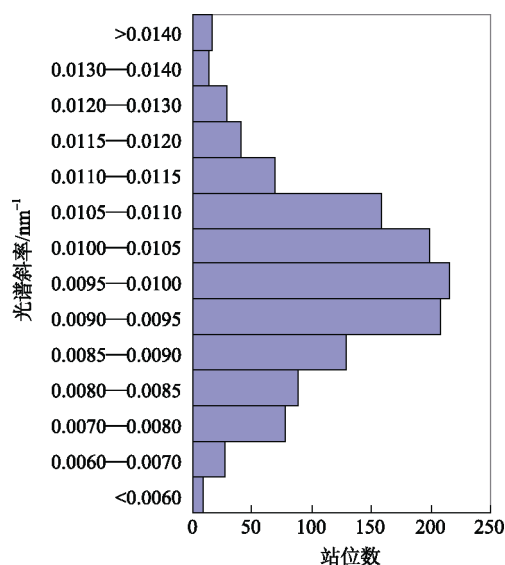


图 5 非色素颗粒物光谱斜率统计

Fig. 5 Frequency distribution of the exponential slope,  $S_d$ , for the absorption spectrum of de-pigmented particles



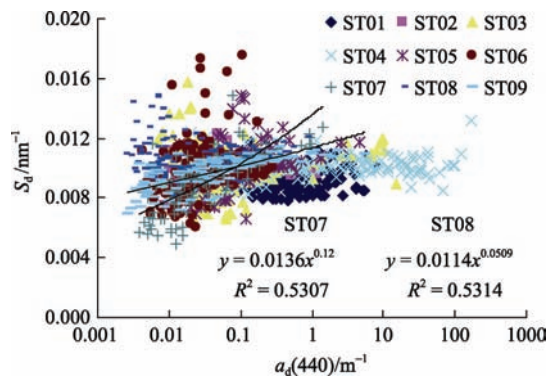
图6 中国近海  $a_d(440)$  与  $S_d$  关系

Fig. 6 Relationship between  $a_d(440)$  and  $S_d$  offshore of China

位  $S_d$  变化的范围在  $0.008\text{--}0.012\text{nm}^{-1}$  这一较小的区域内, 所对应的  $a_d(440)$  分布在  $0.002\text{--}119.786\text{m}^{-1}$ 。在珠江口海域(ST07 区块)和南海海域(ST08 区块),  $S_d$  与  $a_d(440)$  具有一定的负相关关系, 以幂函数的

关系表达的相关性均能达到 0.53。其他海区  $S_d$  与  $a_d(440)$  的相关性非常弱。

### 3 结语

1) 在封闭或半封闭海湾以及河口海域的  $a_d(440)$  较其他海域明显偏大。 $a_d(440)$  总体上表现由北向南逐渐减小的趋势, 但同时在近岸、海湾和河口等区域量值较大, 远岸海域量值较小。

2) 中国近海非色素颗粒物对水体总吸收的贡献率约为 33%, 总体表现为在沿海岸湾、河口等区域贡献率较大, 离岸海域贡献率较小。 $a_d(440)$  占  $a_t(440)$  的百分比值分布特点与  $a_d(440)$  的分布特点一致, 即  $a_d(440)$  越大, 其对水体总吸收的贡献越大。

3) 中国近海  $S_d$  约为  $0.0098\text{nm}^{-1}$  (标准差 =  $0.0014\text{nm}^{-1}$ )。 $S_d$  与  $a_d(440)$  仅在两个海域表现出一定的弱负相关性, 在其他绝大部分海域, 两者的相关性很弱。

### 参考文献

- [1] 希夫林 K C. 海洋和大气光学[M]. 李武, 张欣梅, 译. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 1991: 4-5.
- [2] BOWERS D G, HARKER G E L, STEPHAN B. Absorption spectra of inorganic particles in the Irish Sea and their relevance to remote sensing of chlorophyll[J]. *Int J Remote Sens*, 1996, 17(12): 2449-2460.
- [3] KRATZER S, BOWERS D G, TETT P B. Seasonal changes in colour ratios and optically active constituents in the optical Case-2 waters of the Menai Strait, North Wales[J]. *Int J Remote Sens*, 2000, 21(11): 2225-2246.
- [4] BRICAUD A, STRAMSKI D. Spectral absorption coefficients of living phytoplankton and non-algal biogenous matter: A comparison between the Peru upwelling area and Sargasso Sea[J]. *Limnol Oceanogr*, 1990, 35: 562-582.
- [5] BABIN M, STRAMSKI D, FERRARI G M, et al. Variations in the light absorption coefficients of phytoplankton, nonalgal particles and dissolved organic matter in coastal waters around Europe[J]. *J Geophys Res*, 2003, 108: 3211-3231.
- [6] 朱建华. 黄东海非色素颗粒与非色素颗粒物的吸收系数光谱模型研究[J]. *海洋技术*, 2004, 23(2): 7-13.
- [7] 周虹丽, 韩冰, 李铜基, 等. 南黄海和珠江口海区非色素颗粒物光谱吸收特性[J]. *海洋技术*, 2007, 26(3): 114-117.
- [8] 王桂芬, 曹文熙, 许大志, 等. 南海北部海区非藻类颗粒物吸收系数的变化特性[J]. *海洋技术*, 2007, 26(1): 45-59.
- [9] 许晓强, 曹文熙, 杨跃忠. 珠江口颗粒物吸收系数与盐度及叶绿素 a 浓度的关系[J]. *热带海洋学报*, 2004, 23(5): 63-71.
- [10] 邢小罡, 赵冬至, 刘玉光, 等. 渤海非色素颗粒物和黄色物质的吸收特性研究. *海洋环境科学*, 2008, 27(6): 595-598.
- [11] 国家海洋局 908 专项办公室. 我国近海海洋光学调查技术规程. 北京: 海洋出版社, 2006: 11-16.
- [12] BABIN M, STRAMSKI D. Light absorption by aquatic particles in the near-infrared spectral region[J]. *Limnol Oceanogr*, 2002, 47(3): 911-915.
- [13] NELSON J R, GUARDA S. Particulate and dissolved spectral absorption on the continental shelf of the south-eastern United States[J]. *J Geophys Res*, 1995, 100(C5): 8715-8732.
- [14] ASTORECAL R, RUDDICK K, ROUSSEAU V, et al. Variability of the inherent and apparent optical properties in a highly turbid coastal area: Impact on the calibration of remote sensing algorithms[J]. *EARSel e Proceedings* 2006, 5(1): 1-17.
- [15] BABIN M, STRAMSKI D, FERRAR G M, et al. Variations in the mass-specific absorption coefficients of mineral particles, suspended in the water[J]. *Limnol Oceanogr*, 2004, 49(3): 756-767.