

珠江口藻华水体总吸收系数的变化特性及高光谱反演模式*

王桂芬¹, 曹文熙¹, 杨跃忠¹, 周雯¹, 梁少君^{1,2}

(1. 中国科学院南海海洋研究所 LED 实验室, 广东 广州 510301; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 基于 2007 年 8 月海洋光学浮标在珠江口投放期间获得的近 16 天的实测生物光学数据, 对一次藻华过程中水体总吸收系数和水色光谱的变化特性及其相互关系进行了研究。结果表明, 藻华前后水体中非藻类物质尤其是有色溶解有机物在蓝光波段具有较强的吸收贡献, 而当藻华爆发时, 随着叶绿素 a 浓度的急剧增大, 浮游植物的吸收贡献明显增强; 各波段之间总吸收系数呈现出较好的线性相关关系, 吸收光谱蓝绿波段比值的变化对遥感反射率的光谱分布有重要的贡献; 据此建立了对水体总吸收系数反演的经验关系模型, 表现出较高的反演精度, 计算值与实测值之间相对偏差的均方根在可见光波段可控制在 24% 以内。

关键词: 总吸收系数; 高光谱; 藻华; 珠江口; 光学浮标

中图分类号: P733.3 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2010)02-0052-07

Variations of absorption coefficient of seawater in the Pearl River Estuary and a hyperspectral retrieval model for an algal bloom

WANG Gui-fen¹, CAO Wen-xi¹, YANG Yue-zhong¹, ZHOU Wen¹, LIANG Shao-jun^{1,2}

(1. LED, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: In August 2007, bio-optical measurements were collected over a period of 16 days in the Pearl River Estuary, and an algal bloom was detected. In situ radiometric data were obtained using a marine optical buoy. The variations in absorption properties and ocean color of seawater and their internal relationship were investigated. The results show that the colored detrital matter (CDM), especially the colored dissolved organic matter (CDOM), had large contributions to the total absorption of seawater at blue waveband, while the absorption contribution of phytoplankton tended to increase with the rapid increase of chlorophyll a concentration when the bloom occurred. Linear regression was used to express the spectral correlations between total absorption coefficients at 443nm and at other visible bands, and the blue-to-red ratio of absorption showed a big effect on the spectral distribution of spectral reflectance. An empirical hyperspectral ocean color model for retrieving the absorption coefficient was developed, and the calculated and measured results showed small discrepancy, with relative root mean square error being less than 24% over the visible spectrum.

Key words: absorption coefficient; hyperspectrum; algal bloom; Pearl River Estuary; marine optical buoy

海水总吸收系数是一个重要的固有光学参数, 对于研究海洋中浮游植物的光合作用、上层海洋热结构等具有重要意义。按照水体组分, 海水总吸收系数可分解为纯海水(w)、浮游植物(ph)、非藻类颗粒物(NAP)和有色溶解有机物(CDOM)等吸收贡献

之和^[1], 可表示为:

$$a(\lambda) = a_w(\lambda) + a_{ph}(\lambda) + a_{NAP}(\lambda) + a_{CDOM}(\lambda), \quad (1)$$

当水体中发生藻华时, 随着藻类的大量繁殖而造成的叶绿素 a 浓度和藻细胞密度的急剧升高, 相应水体的吸收系数发生了较大的变化; 浮游植物在

收稿日期: 2009-05-06; 修订日期: 2009-12-15。孙淑杰编辑

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-215); 国家 863 计划(2006AA09A310); 国家自然科学基金项目(40906021, 4090622, U0933005); 中国科学院南海海洋研究所青年人才领域前沿项目(SQ200812)

作者简介: 王桂芬(1981—), 女, 山东省聊城市人, 助理研究员, 主要从事海洋生物光学和水色遥感研究。E-mail: guifenwang@scsio.ac.cn

*感谢中国科学院南海海洋研究所张建林老师提供的叶绿素 a 浓度数据。

藻华爆发期间的吸收贡献明显较强,从而影响着水色光谱的变化^[2-6]。近年的研究表明,藻华爆发时水色的变化来源于多种因素的影响,如藻细胞密度及其在近表层水体的分布,浮游植物的单分散性的粒径分布以及水体的固有光学参数等^[7]。Morel 等^[8]研究了含有较高色素浓度的一类水体的生物光学特性,指出当发生浮游植物水华时,往往是某一种藻通过竞争成为优势藻,从而造成了光学特性的变异性。对于沿岸水体,当藻华发生时,除了浮游植物本身的急剧变化之外,较高浓度的非藻类物质对光学特性的干扰作用也给人们提出了很大的挑战^[4]。近年来,人们对于浮游植物水华水体的生物光学特性进行了大量的研究,并基于生物光学的变异性建立了较为有效的赤潮监测方法^[4,9]。

我国近海赤潮爆发频率呈现出逐渐增长的趋势,加强赤潮生消过程的海洋生态环境研究对于赤潮预警、监测具有重要的基础意义^[10]。海洋光学浮标可定点测量长时间序列的海洋高光谱辐射数据,在水色遥感现场辐射定标和数据真实性检验、近海生态环境监测等方面具有重要的应用价值^[11]。采用海洋光学浮标测量得到的长时间序列、高光谱数据为深入研究近海赤潮生消过程中生物-光学特性的变化提供了重要的手段。我国于 2002 年开始由国家“863 计划”立项研究海洋光学浮标技术,迄今为止已取得了突破性的进展^[12-13]。

本文基于 2007 年 8 月中国科学院南海海洋研究所研制的海洋光学浮标在珠江口投放期间获得的近 16 天的实测数据,对一次藻华过程中水体总吸收系数和水色光谱的变化特性及其相互关系进行深入分析,并建立了基于浮标高光谱数据的水体总光谱吸收系数反演模型。

1 数据和方法

1.1 海水表观光学参数的测量

2007 年 8 月 13 日到 8 月 29 日,课题组在珠江口外的担杆岛附近水域开展了海水生物光学特性的定点调查,站位位于 114°17.37'E、22°03.75'N(图 1)。担杆岛位于珠江出海口的东侧,北面离香港岛 18 海里,西面离珠海 40 海里,东面和南面是南海,由于该岛的东面和南面再没有其他海岛,直对太平洋,其地理位置对我国具有重要的战略意义。该水域海底地形是一个变化缓慢的斜坡,水体较清洁,平常海流流速在 1 节左右。

观测期间,在担杆岛附近水域进行了海洋光学

浮标(具体结构、性能可参考文献[13])的投放运行,并结合浮标的测量时间对水体的生物光学参数进行了全面系统的采样调查。光学浮标每天定时对水体的表观光学参数进行测量(上午 8 点至下午 18 点整点测量,凌晨 2 点的测量作为暗信号),测量的光学参数包括了水面上 1.5m 左右的海面入射光谱辐照度,水下 0.325m 和 2.3m 处的下行光谱辐照度,以及水面上 1.14m、水下 0.905m 和 2.88m 的上行光谱辐亮度。根据水下两层测量得到的辐照度、辐亮度数据,可由剖面法推算得到水体的漫射衰减系数及遥感反射率^[11-13],数据处理方法描述如下。

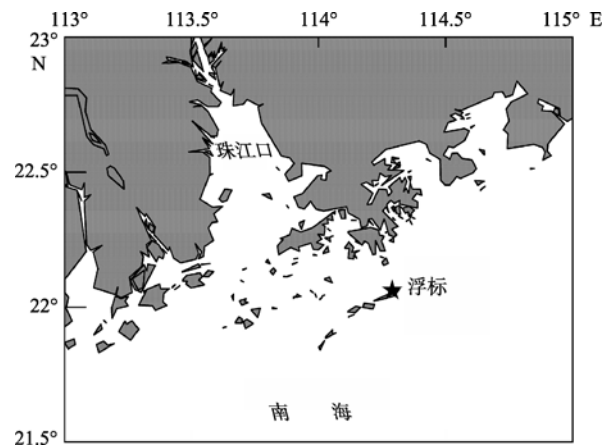


图 1 珠江口担杆岛水体定点观测站点

Fig. 1 Study site near the Dangan Islands in the Pearl River Estuary

(1) 数据剔除及暗电流校正

根据同步观测的浮标倾角剔除倾角大于 10°的数据,采用凌晨 2 点测得的辐照度和辐亮度值进行各光谱通道的暗电流校正。

(2) 漫射衰减系数的计算

假设在水下两个水层之间水体是均匀的,采用下式对下行辐照度的漫射衰减系数 $K_d(\lambda)$ 进行计算:

$$K_d(\lambda) = [\ln(E_d(z_1, \lambda)) - \ln(E_d(z_2, \lambda))] / [z_2 - z_1] \quad (2)$$

其中的 z_1 和 z_2 分别为 0.325m 和 2.3m。

同理,该层的上行辐亮度的漫射衰减系数 $K_u(\lambda)$

$$K_u(\lambda) = [\ln(L_u(z_1, \lambda)) - \ln(L_u(z_2, \lambda))] / [z_2 - z_1] \quad (3)$$

其中的 z_1 和 z_2 分别为 0.905m 和 2.88m。

(3) 刚好在水面以下的光谱辐亮度 $L_u(0^-)$ 的推算

根据水下两层的上行辐亮度的分布以及计算得到的 $K_u(\lambda)$ 数据来外推刚好在水面以下的数值,

$$L_u(0^-) = L_u(z_1) \exp(K_u \cdot z_1) \quad (4)$$

(4) $L_u(0^-)$ 的自阴影校正

上行辐亮度的自阴影误差一般定义为:

$$\varepsilon = (L_u^{\text{true}} - L_u^{\text{measured}}) / L_u^{\text{true}} \quad (5)$$

L_u^{true} 为辐亮度的真实值, L_u^{measured} 为实测值, ε 是 L_u 传感器自阴影校正因子, 根据 Gordon 等^[14]采用蒙特卡罗计算推断的模型, 可表示为下式:

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_{\text{sun}} + \varepsilon_{\text{sky}} f}{1 + f} \quad (6)$$

$$f = \frac{E_{\text{sky}}(\lambda)}{E_{\text{sun}}(\lambda)} \quad (7)$$

其中 f 是漫射天空光与直射天空光对下行辐照度贡献的比值, 本方法采用了 Baker 等^[15]的结果(可查找表格)进行线性插值;

$$\varepsilon_{\text{sun}}(\lambda) = 1 - e^{-k'_{\text{sun}} a(\lambda) r} \quad (8)$$

$$\varepsilon_{\text{sky}}(\lambda) = 1 - e^{-k'_{\text{sky}} a(\lambda) r} \quad (9)$$

其中的参数分别可表示为:

$$k'_{\text{sun}} = (2.07 + 0.0056\theta_0) / \tan \theta_{0w} \quad (10)$$

$$k'_{\text{sky}} = 4.61 \quad (11)$$

a 是水体的总吸收系数; r 是 L_u 传感器探头的半径; θ_{0w} 是水下折射的太阳天顶角, 与水面上太阳天顶角 θ_0 之间的关系可表示为:

$$\theta_{0w} = \sin^{-1}(\sin \theta_0 / n_w) \quad (12)$$

一般地, 采用式(7—11)对 ε 进行推算, 适用的太阳天顶角范围在 30° — 70° 之间, 且 $a \cdot r < 0.1$ 。针对本研究的实测水体, $a \cdot r$ 基本满足条件, 对于太阳天顶角为 10° 左右时, 采用了 Gordon 等^[14]的结果, 令 $k' \tan \theta_{0w}$ 等于 2.17, 辐亮度探头的半径为 0.02m, 最大的吸收值出现在 400nm, 为 1.3m^{-1} , 因此相应的 $a \cdot r = 0.026\text{m}^{-1}$ 。

据此, 估算得到自阴影偏差 ε , 对实测数据推算得到的 $L_u(0^-)$ 进行校正, 即:

$$L_u^{\text{true}}(0^-) = L_u^{\text{measured}}(0^-) / (1 - \varepsilon) \quad (13)$$

(4) 遥感反射率 R_{rs} 光谱的计算

离水辐亮度 $L_w(\lambda)$ 和归一化离水辐亮度 $L_{\text{wn}}(\lambda)$ 的计算如下式, 此处的 $L_u(0^-, \lambda)$ 为已经进行了自阴影校正之后的数据 ($L_u^{\text{true}}(0^-, \lambda)$),

$$L_w(\lambda) = 0.543 \cdot L_u(0^-, \lambda) \quad (14)$$

$$L_{\text{wn}}(\lambda) = \frac{\bar{F}_0(\lambda)}{E_s(0^+, \lambda)} L_w(\lambda) \quad (15)$$

其中 $\bar{F}_0(\lambda)$ 光谱参考 Thuillier 等^[16], $E_s(0^+, \lambda)$ 为海面下行辐照度的平均值。

根据离水辐亮度 $L_w(\lambda)$ 和 $E_s(0^+, \lambda)$ 就可以进一步计算得到遥感反射率,

$$R_{\text{rs}}(\lambda) = \frac{L_w(\lambda)}{E_s(0^+, \lambda)} \quad (16)$$

1.2 海水各组分吸收光谱的测量

观测期间, 每天在浮标附近采集水样 3 次(上午 9 点、中午 12 点和下午的 3 点), 用于测量海水各组分吸收光谱。采用定量滤膜技术对海水悬浮颗粒物的吸收光谱进行测量^[17], 低压情况下将一定体积 (0.5—2.0L) 的水样过滤到直径 25mm、孔径 $0.7\mu\text{m}$ 的 Whatman GF/F 滤膜上, 利用 Helios 紫外可见分光光度计扫描富集有颗粒物的样品滤膜的吸收光谱 $a_p(\lambda)$, 波段范围设为 350—750nm。将样品滤膜放入冰箱中避光、冰冻保存。回实验室后, 用约 90% 的甲醇溶液浸泡样品滤膜 90—180min, 以萃取样品滤膜上的色素, 测量沉积在滤膜上的非藻类颗粒物的吸收 $a_{\text{NAP}}(\lambda)$ 。在数据处理过程中, 采用了 750nm 处的吸收值对总颗粒物吸收光谱和非藻类颗粒物吸收光谱进行校正, 以消除后向散射光损失带来的影响。采用 Roesler^[18]的方法对测量过程中光程放大影响进行校正, 分别计算出总颗粒物和非藻类颗粒物的光谱吸收系数, 两者相减得到浮游植物颗粒的吸收系数 $a_{\text{ph}}(\lambda)$, 即:

$$a_{\text{ph}}(\lambda) = a_p(\lambda) - a_{\text{NAP}}(\lambda) \quad (17)$$

采用 $0.22\mu\text{m}$ 孔径的聚碳酸酯滤膜过滤海水, 将过滤液注入 LWCC 液芯波导的长光程样品池, 利用 S2000 光纤光谱仪对 CDOM 的吸收光谱进行测量^[19-20]。

$$a_{\text{CDOM}}(\lambda) = 2.303 \frac{D(\lambda) - D_{\text{null}}(\lambda)}{l} \quad (18)$$

其中 $D(\lambda)$ 为测量的 CDOM 样品相对于参比纯水的光学密度, l 为液芯波导的长度, $D_{\text{null}}(\lambda)$ 为可假定为零的波段的表观残余光学密度, 本文选择 685 nm 附近 5 个 nm 的平均值对吸收光谱进行零点校正。

由此得到海水的总吸收系数,

$$a(\lambda) = a_w(\lambda) + a_p(\lambda) + a_{\text{CDOM}}(\lambda), \quad (19)$$

其中纯海水的吸收光谱采用 Pope 等^[21]的测量结果。

1.3 海水叶绿素 a 浓度的测量

海水中叶绿素 a 的浓度 [Chl.a] 采用荧光法测得, 所用仪器 Turner-Design 10 型荧光光度计, 测量精度为 $0.01\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 有关测量方法见文献[22]。叶绿素 a 的标准品采用了 Sigma 公司的产品, 编号为 C5753。

2 结果和讨论

2.1 海水总吸收光谱的变化特性

调查期间, 总吸收系数及各组分的吸收贡献表现出较大幅度的变化, 除了纯海水之外的吸收系数 $a_{\text{t-w}}(443)$ 在 0.194 — 0.998m^{-1} 分布, 与叶绿素浓度的时间序列变化趋势一致。浮游植物、非藻类颗粒物

和 CDOM 吸收贡献存在着明显的不同(图 2), 在浮游植物水华发生前后水体中 CDOM 有着较强的吸收贡献, 在 30%—70%之间; 而当浮游植物水华暴发时, $a_{\text{CDOM}}(443)/a_{\text{t-w}}(443)$ 比值相对减小, 相应的浮游植物吸收贡献明显增强, 达到了 50%, 非藻类颗

粒物的吸收贡献也有微弱的增加, 在 20%左右。海水中各组分吸收贡献的变化趋势反映了浮游植物水华过程中水体各组分浓度的相对变化, 浮游植物细胞浓度的急剧增加无疑是造成颗粒物吸收尤其是浮游植物吸收贡献增强的重要原因。

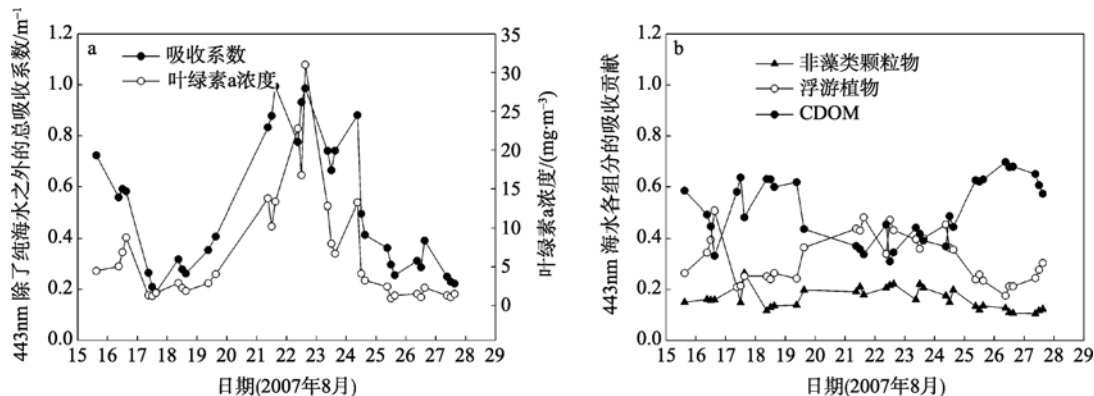


图 2 表层水体除了纯海水之外的吸收系数 $a_{\text{t-w}}(443)$ 与海水叶绿素 a 浓度的时间序列变化比较(a)及各组分对 $a_{\text{t-w}}(443)$ 的吸收贡献比值的时间序列变化(b)

Fig. 2 Time series of total absorption coefficient of surface water except for pure sea water at 443nm ($a_{\text{t-w}}(443)$) and Chl.a concentration of surface water (a), and time series of absorption contribution by water components to $a_{\text{t-w}}(443)$ (b)

采用最小二乘法, 对调查水体中总吸收系数光谱进行了拟合, 结果表明海水的吸收系数遵循着的线性变化规律, 可表示为参考波段(443nm)总吸收系数的线性函数, 即,

$$a(\lambda) = c_1(\lambda)a(443) + c_2(\lambda) \quad (20)$$

在整个可见光波段的拟合结果如图 3 所示, $a(\lambda)$ 与 $a(443)$ 之间具有较好的线性相关关系, 主要吸收波段的决定系数 R^2 值均在 0.96 以上, 偏差

RMSE 大多在 6%以内。线性拟合的系数 $c_1(\lambda)$ 的光谱分布在短波波段的值较高, 随波长的增大而减小, 表征了非藻类物质的吸收贡献; 在长波段有一个明显的吸收峰, 与浮游植物的吸收贡献有关。拟合截距 $c_2(\lambda)$ 类似于纯海水吸收光谱分布, 在短波波段主要表现出非藻类物质吸收光谱的区域特征, 而在长波段主要表现为纯水的吸收光谱特征^[21-23]。

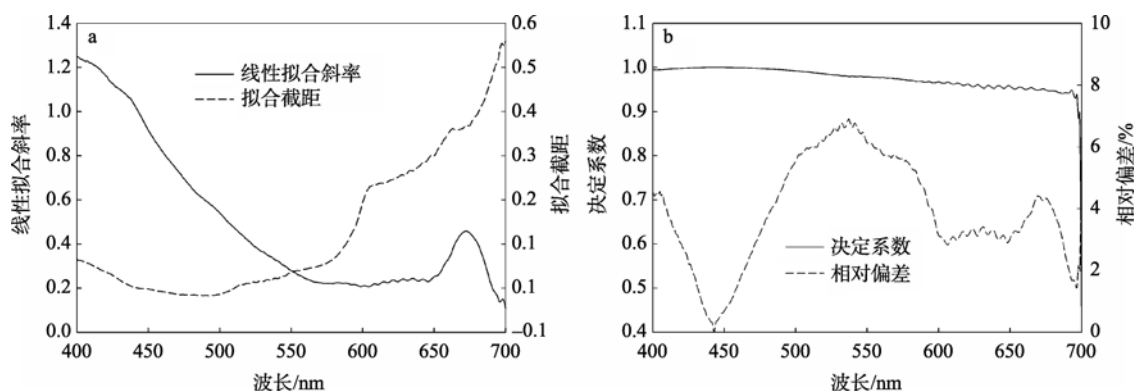


图 3 $a(\lambda)$ 与 $a(443)$ 之间线性函数拟合结果

a. 拟合系数; b. 决定系数及相对偏差

Fig. 3 Linear regression results for the relationship between $a(\lambda)$ and $a(443)$, with (a) for the linear slope and intercept, and (b) for the determination coefficient R^2 and RMSE (%)

海水总吸收系数在各个波段的光谱相关关系与水体中颗粒物和溶解物质相对浓度的变化有关。在此次调查期间, 海水各组分含量及相对浓度发生了

较大的变化, 非藻类物质和浮游植物吸收的贡献交替变化, 对海水总吸收系数在强度和光谱上的变化有着重要的影响。海水吸收系数的光谱关系模型在

水色反演中有着重要的应用^[23-24], 如 Smyth 等^[25]曾根据相邻波段海水吸收系数比值较为恒定这一特点, 建立了对海水固有光学参数反演的半分析模型。珠江口藻华过程中海水总吸收系数的光谱变化规律, 可对水色光谱的变化进行解释, 并可进一步应用于水色遥感反演算法的建立。

2.2 海水遥感反射率光谱的变化

如图 4a 为遥感反射率光谱分布, 在藻华发生前后水色光谱存在着明显的差异, 随着水体中叶绿素 a 浓度的增加, 短波波段的 R_{rs} 值减小, 在 570 nm 附近的峰值逐渐增大, 相应的蓝绿波段比值逐渐减小 (图 4b), 代表性蓝绿波段比值 ($R_{rs}(443)/R_{rs}(555)$) 与叶绿素 a 浓度之间呈现出明显的反相关, 相应的幂指数函数拟合的决定系数为 0.88。蓝光波段 R_{rs} 的光谱分布特征与藻华爆发时水体中急剧增大的浮游植物吸收贡献有关; 在长波波段约 690 nm 附近存在叶绿素 a 的荧光峰, 与 Dierssen 等^[26]、Hu 等^[27]报道的藻华水体遥感反射率光谱特征类似, 是水体中发生藻

华的特征峰之一。

根据光辐射传输模拟理论可知, 海水总吸收系数光谱的变化是造成遥感反射率光谱变化的重要因素之一, 两者之间存在着反向变化关系。选取 443 nm 和 555 nm 两个典型的波段, 对海水总吸收光谱分布对遥感反射率变化的贡献进行分析。如图 5a 所示, 随叶绿素 a 浓度的增加, $R_{rs}(443)/R_{rs}(555)$ 与 $a(555)/a(443)$ 均呈现出不断减小的趋势, 其关系可采用幂指数函数进行拟合, 相应的决定系数分别为 0.87 和 0.58。 $a(555)/a(443)$ 随海水叶绿素 a 浓度的变化关系较为离散, 尤其是当叶绿素 a 浓度较高时, $a(555)/a(443)$ 的变化逐渐减弱。采用线性函数对 $R_{rs}(443)/R_{rs}(555)$ 与 $a(555)/a(443)$ 进行拟合, 相应的决定系数为 0.70, 如图 5b。根据其分布特征同样可以看出, 当叶绿素 a 浓度较低时, 总吸收系数对遥感反射率光谱变化有较强的贡献; 而对于高叶绿素 a 浓度的藻华水体, 总吸收系数光谱变化的贡献相对减弱。

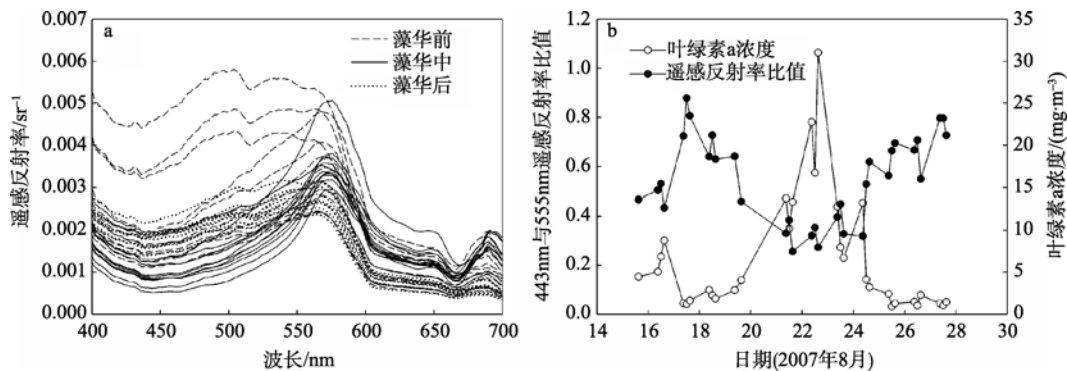


图 4 藻华发生前后遥感反射率光谱(a)与遥感反射率蓝绿波段比值 ($R_{rs}(443)/R_{rs}(555)$) 及相应表层水体叶绿素 a 浓度的时间序列分布(b)

Fig. 4 $R_{rs}(\lambda)$ spectra before (dashed), during (solid) and after (dotted) the algal bloom (a), and comparison of time series of blue-to-green band ratio of R_{rs} and Chl.a concentration of surface water (b)

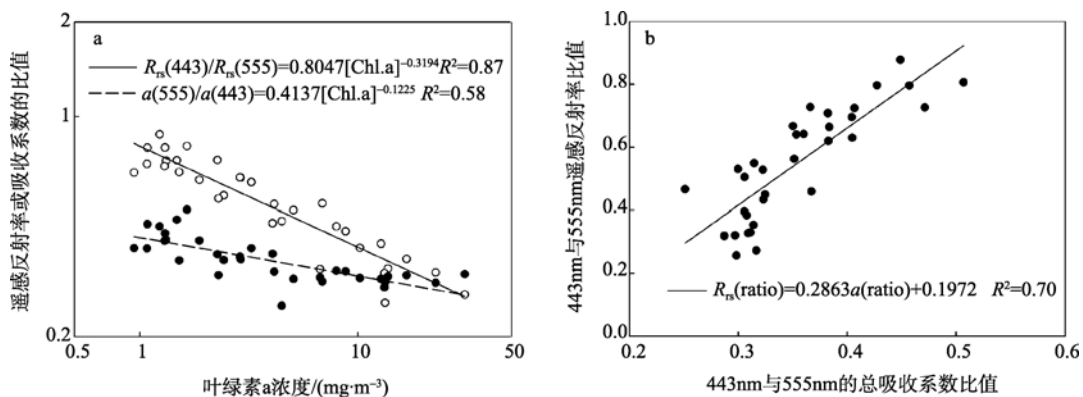


图 5 $R_{rs}(443)/R_{rs}(555)$ 和 $a(555)/a(443)$ 随水体叶绿素 a 浓度的变化(a)以及两者之间的相关关系分析(b)

Fig. 5 Variations of $R_{rs}(443)/R_{rs}(555)$ and $a(555)/a(443)$ with Chl.a concentration (a), and their correlation relationship analysis (b)

2.3 吸收系数反演模式的建立

采用 9 点和 12 点采集的 22 组数据进行建模, 采用 15 点测量的 12 组数据进行验证。

$a(443)$ 与 $R_{rs}(443)/R_{rs}(555)$ 之间的经验关系可表示为(图 6a):

$$a(443) = a_w(443) + 10^{-1.553p^2 - 2.422p - 0.861} \quad (21)$$

其中 $p = \log_{10}(R_{rs}(443)/R_{rs}(555))$

采用 15 点测量的 12 组数据进行验证, 实测 $a(443)$ 与计算值之间的标准偏差(RMSE)为 0.097m^{-1} ,

相对偏差的标准差为 22.9%。

同时采用观测期间每天 9 点和 12 点采集水样测量的数据, 对总吸收系数 $a(\lambda)$ 与 $a(443)$ 之间的关系进行线性拟合, 并将这种线性关系用于根据浮标数据推算的 $a(443)$ 来估算整个可见光波段的 $a(\lambda)$, 最终计算值与实测数据之间的偏差基本保持在 24% 以内。与采用 Lee 等^[28] 最新版本的准分析算法(QAA-V5)推算得到的总吸收系数相比, 本文建立的经验模型具有明显的优势(图 6b)。

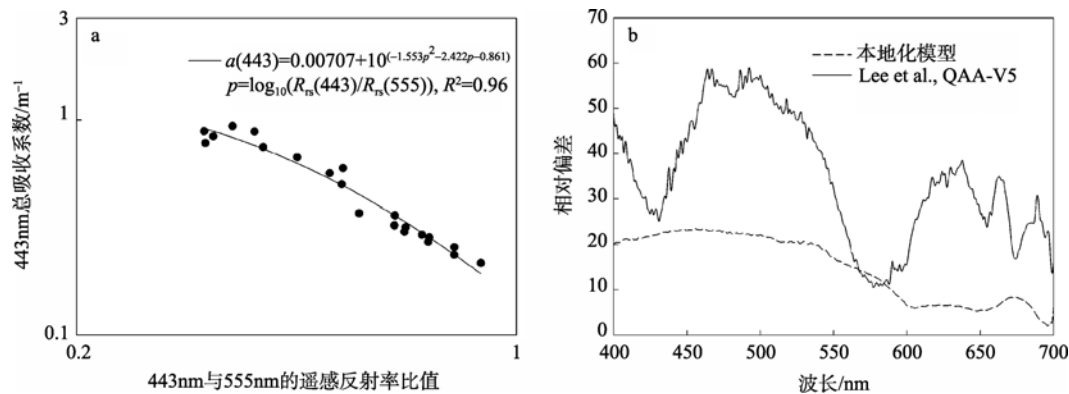


图 6 $R_{rs}(443)/R_{rs}(555)$ 与 $a(443)$ 经验关系模型的建立(a)与采用该经验公式反演得到的海水总吸收系数光谱的相对偏差及其与 Lee 等^[28] 准分析算法(V5)反演结果的比较(b)

Fig. 6 Empirical relationship between $R_{rs}(443)/R_{rs}(555)$ and $a(443)$ (a), and the RMSE for the retrieval model and its comparison with QAA-V5 model of Lee et al.^[28] (b)

3 总结

本文基于珠江口一次藻华过程水体的实测数据, 分析了海水光谱吸收系数的变化特性。研究结果表明, 藻华前后海水各组分的吸收贡献有着明显的差异。在藻华发生前后水体中非藻类物质尤其是 CDOM 具有较强的吸收贡献; 而当藻华爆发时, 随着叶绿素 a 浓度的急剧增大, 浮游植物的吸收贡献明显增强。海水总吸收系数的光谱分布表现出明显的规律, 各波段的吸收系数可以较好地表征为特征波段(443nm)吸收系数的线性函数, 这种光谱模型为进一步应用于水色遥感反演吸收光谱提供了重要条件。

采用海洋光学浮标测量的藻华水体遥感反射率光谱也发生了明显的变化。在蓝绿光波段, 典型波段遥感反射率比值 $R_{rs}(443)/R_{rs}(555)$ 表现出与海水叶绿素 a 浓度相一致的时间序列分布, 且两者幂指数

拟合的决定系数达 0.87, 其中海水总吸收系数波段比值 $a(443)/a(555)$ 的变化是一个重要的影响因素, 其相关系数的平方为 0.70; 在红光波段约 690 nm 附近, 遥感反射率存在明显的峰值, 即为藻华水体的特征峰。

根据特征波段海水总吸收系数 $a(443)$ 与遥感反射率比值 $R_{rs}(443)/R_{rs}(555)$ 之间的经验关系和总吸收系数的光谱模型, 本文基于上午 9 点和 12 点的浮标高光谱数据建立了区域性总吸收系数统计反演模式, 采用下午 15 点测量的高光谱数据进行模式验证, 取得了较好的效果, 计算值与实测值之间的标准方差为 0.097m^{-1} , 相对偏差的均方根可控制在 24% 以内。该模型的建立对于进一步通过海洋光学浮标的高光谱数据实时监测藻华水体生物-光学特性的变化具有重要意义和区域性应用价值。

参考文献

- [1] KIRK J T O. Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems [M]. Cambridge University Press, Cambridge, 1994.
- [2] CULLEN J J, CIOTTI A M, DAVIS R F, et al. Optical detection and assessment of algal blooms[J]. Limnology and Oceanography, 1997, 42(2): 1223-1239.
- [3] MILLIE D F, SCHOFIELD O M, KIRKPATRICK G J, et al.

- Detection of harmful algal blooms using photopigments and absorption signatures: a case study of the Florida red tide dinoflagellate, *Gymnodinium breve*[J]. *Limnology and Oceanography*, 1997, 42(5): 1240–1251.
- [4] CLEMENTSON L A, PARSLow J S, TURNBULL A R, et al. Properties of light absorption in a highly coloured estuarine system in south-east Australia which is prone to blooms of the toxic dinoflagellate *Gymnodinium catenatum* [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2004, 60: 101–112.
- [5] ETHERIDGE S M, ROESLER C S. Temporal variations in phytoplankton, particulates, and colored dissolved organic material based on optical properties during a Long Island brown tide compared to an adjacent embayment [J]. *Harmful Algae*, 2004, 3: 331–342.
- [6] BAROCIO-LEON Ó A, MILLAN-NUÑEZ R, SANTAMARIA-DEL-ÁNGEL E, et al. Bio-optical characteristics of a phytoplankton bloom event off Baja California Peninsula (30–31°N) [J]. *Continental Shelf Research*, 2008, 28: 672–681.
- [7] ROESLER C S, MCLEROY-ETHERIDGE S L. Remote detection of harmful algal blooms [J]. *Ocean Optics XIV*, 1998, 1, 117–128.
- [8] MOREL A, GENTILI B, CHAMI M, et al. Bio-optical properties of high chlorophyll Case 1 waters and of yellow-substance-dominated Case 2 waters[J]. *Deep-Sea Research I*, 2006, 53: 1439–1459.
- [9] CANNIZZARO J P, CARDER K L, CHEN F R, et al. A novel technique for detection of the toxic dinoflagellate, *Karenia brevis*, in the Gulf of Mexico from remotely sensed ocean color data [J]. *Continental Shelf Research*, 2008, 28: 137–158.
- [10] 周名江, 朱明远, 张经. 中国赤潮的发生趋势和研究进展[J]. *生命科学*, 2001, 13(2): 53–59.
- [11] MUELLER J L, FARGION G S, MCCLAIN C R, et al. *Ocean Optics Protocols For Satellite Ocean Color Sensor Validation[R]*, Revision 4, Volume IV: Inherent Optical Properties: Instruments, Characterization, Field Measurements and Data Analysis Protocols, 2003, 39pp., Greenbelt, Md.
- [12] 杨跃忠, 孙兆华, 曹文熙, 等. 海洋光学浮标的设计及应用试验 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, 29(2): 565–569.
- [13] 杨跃忠, 曹文熙, 孙兆华, 等. 海洋高光谱辐射实时观测系统的研制[J]. *光学学报*, 2009, 29(1): 102–107.
- [14] GORDON H R, DING K. Self-shading of in-water optical instruments[J]. *Limnology and Oceanography*, 1992, 37: 491–500.
- [15] BAKER K S, SMITH R C. Irradiance transmittance through the air-water interface, *Ocean Optics X*[J]. *Proc. SPIE*, 1990, 1302: 556–565.
- [16] THUILLIER G, HERSE M, LABS D, et al. The solar spectral irradiance from 200 to 2400 nm as measured by the SOLSPEC spectrometer from the ATLAS and EURECA missions[J]. *Solar Physics*, 2003, 214: 1–22.
- [17] YENTSCH C S. Measurement of visible light absorption by particulate matter in the ocean[J]. *Limnology and Oceanography*, 1962, 7: 207–217.
- [18] ROESLER C S. Theoretical and experimental approaches to improve the accuracy of particulate absorption coefficients derived from the quantitative filter technique [J]. *Limnology and Oceanography*, 1998, 43: 1649–1660.
- [19] KIRKPATRICK G J, ORRICO C, MOLINE M A, et al. Continuous hyperspectral absorption measurements of colored dissolved organic material in aquatic systems [J]. *Applied Optics*, 2003, 42(33): 6564–6568.
- [20] ZHAO J, CAO W X, WANG G F, et al. The variations in optical properties of CDOM throughout an algal bloom event [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2009, 82, 225–232.
- [21] POPE R, FRY E. Absorption spectrum (380 - 700 nm) of pure waters: II. Integrating cavity measurements [J]. *Applied Optics*, 1997, 36: 8710–8723.
- [22] PARSONS T R, MAITA Y, LALLI C M. *A manual of chemical and biological methods for seawater analysis* [M]. Oxford: Pergamon Press, 1984.
- [23] BARNARD A H, PEGAU W S, ZANEVELD J R V. Global relationships of the inherent optical properties of the oceans [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(C11): 24955–24968.
- [24] BARNARD A H, ZANEVELD J R, PEGAU W S. In situ determination of the remotely sensed reflectance and the absorption coefficient: closure and inversion [J]. *Applied Optics*, 1999, 38: 5108–5117.
- [25] SMYTH T, MOORE G, HIRATA T, et al. Semianalytical model for the derivation of ocean colour inherent optical properties: Description, implementation, and performance assessment [J]. *Applied Optics*, 2006, 45: 8116–8131.
- [26] DIERSSEN H M, KUDELA R M, RYAN J.P, et al. Red and black tides: Quantitative analysis of water-leaving radiance and perceived color for phytoplankton, colored dissolved organic matter, and suspended sediments[J]. *Limnology and Oceanography*, 2006, 51(6): 2646–2659.
- [27] HU C M, LUERSSEN R, MULLER-KARGER F E, et al. On the remote monitoring of *Karenia brevis* blooms of the west Florida shelf [J]. *Continental Shelf Research*, 2008, 28: 159–176.
- [28] LEE Z P, LUBAC B, WERDELL J, et al. An Update of the Quasi-Analytical Algorithm (QAA_v5). <http://www.ioccg.org/groups/software.html>. 2009.