

赤潮的高光谱监测及预警方法

曹文熙¹, 杨跃忠¹, 王桂芬¹, 赵俊^{1,2}, 周雯¹, 李彩¹, 孙兆华^{1,2}, 梁少君^{1,2}, 柯天存¹, 卢桂新¹

(1. 中国科学院南海海洋研究所热带海洋环境动力学实验室, 广东 广州 510301; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 有害赤潮发生频度有逐年增加的趋势, 建设赤潮的早期监测和预警系统是一个难点。文章研究表明, 珠江口赤潮前后, 叶绿素 a 浓度和细胞密度变化范围分别为 $0.9\text{--}31.1\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $1.28\times 10^4\text{--}1.76\times 10^6\text{cell}\cdot\text{L}^{-1}$, 优势藻为聚生角毛藻; 高光谱辐射计获取的光漫射衰减系数、遥感反射率和荧光强度可反演叶绿素 a 浓度和细胞密度, 其中反演叶绿素 a 浓度的平均相对均方根差(RRMS)为 30.6%、33.8%和 77.4%, 而反演细胞密度的平均 RRMS 为 83.6%、83.9%和 136.4%。因高光谱辐射计可以获取每小时或者更短时间尺度的数据, 因此, 装备了高光谱辐射计的光学浮标可用于赤潮监测与预警系统。

关键词: 海洋光学; 光学浮标; 监测及预警; 赤潮

中图分类号: P733.39 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2010)02-0017-08

Hyperspectral monitoring and early warning for algal blooms

CAO Wen-xi¹, YANG Yue-zhong¹, WANG Gui-fen¹, ZHAO Jun^{1,2}, ZHOU Wen¹, LI Cai¹, SUN Zhao-hua^{1,2}, LIANG Shao-jun^{1,2}, KE Tian-cun¹, LU Gui-xin¹

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

Abstract: Harmful algal blooms have increased in recent years, and the building of early observing and monitoring system is very difficult. The authors indicated in this paper that, during the experimental time in the Pearl River Estuary, the variations of chlorophyll a and cell density were $0.9\text{--}31.1\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ and $1.28\times 10^4\text{--}1.76\times 10^6\text{cell}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively, and diatom was the dominant algal species. The diffuse attenuation coefficient, remotely sensed reflectance and fluorescence obtained by hyperspectral radiometers can be used to retrieve chlorophyll a and cell density, with relative root mean square error (RRMS) of chlorophyll a of 26.1%, 25.2% and 54.6%, and RRMS of cell density of 64.5%, 65.6% and 60.8%, respectively. Since the hyperspectral radiometers can obtain data at 1 hour interval, the moored optical buoy equipment with hyperspectral radiometers can be used for algal bloom observation and monitoring system.

Key words: ocean optics; optical buoy; observation and monitoring; algal bloom

赤潮是海洋中的微藻、原生动物或细菌在一定环境条件下爆发性增殖或聚集, 引起水体变色或对海洋中其他生物产生危害的一种生态异常现象。有害赤潮生物分泌的毒素可直接导致海洋生物大量死亡, 或者通过食物链传递造成人类食物中毒; 无害赤潮生物则因其产生的黏性分泌物堵塞鱼、贝的呼吸系统, 或者由于赤潮生物大面积衰亡时消耗了水

体中大量的氧气, 而造成大面积的鱼、贝窒息死亡。研究表明, 赤潮不仅给水体生态环境造成危害, 也给渔业资源和生产造成重大经济损失, 而且还给旅游业和人类带来了危害, 已成为全球性海洋灾害之一。

在过去的几十年里, 有害赤潮(HABs)发生的频度有逐年增加的趋势, 对赤潮的早期诊断监测和预警系统的需求很迫切^[1]。赤潮过程可持续几天至几

收稿日期: 2009-05-06; 修订日期: 2009-11-18。孙淑杰编辑

基金项目: 中国科学院重要方向性项目及装备项目(KZCW2-YW-215); 国家 863 计划重大项目(2006AA09A310); 国家自然科学基金-广东省自然科学基金联合资助项目(U0933005)

作者简介: 曹文熙(1963—), 男, 湖南省郴州市人, 研究员, 博士, 主要从事海洋光学研究。E-mail: wxcao@scsio.ac.cn

十天, 赤潮过程的监测需要高频采样, 传统的现场采样分析手段效率低, 难以获取时间序列的数据, 因此需要发展高效的连续自动实时观测系统。光学显微镜镜检等传统的 HABs 检测技术耗时多、工作量大, 且在较大程度上依赖于分类学专家^[2], 不适合用于实时连续观测平台。近年来发展起来的 HABs 检测生物传感器及生物芯片为赤潮及其优势种的现场快速检测提供了新的手段, 但目前这些技术还有待完善及推广。

光学方法用于赤潮监测已有多年的历史。过去 20 年的研究表明, 浮游植物的叶绿素浓度(Chl. a)、粒径结构和细胞密度(Cell Density, 简称 CD)可用光衰减系数、反射率、吸收系数、散射系数及荧光来估算。Chl. a 浓度及细胞密度是浮游植物生物量的重要指标, 通常可通过 Chl. a 浓度和细胞密度异常来诊断赤潮发生与否。光学传感器既适用于卫星观测平台(如 SeaWiFS、MODIS 等), 也可适用于现场观测平台(如光学浮标), 提供连续观测资料。近年来, 遥感技术已广泛用于 HABs 监测, 不仅可勾勒出赤潮的时空分布, 也可提供相应的水文环境参数的时空分布, 为赤潮发生机制研究提供重要资料^[3-5]。Stumpf 等^[1]利用 SeaWiFS 遥感数据开展了近岸赤潮的常规监测研究。虽然卫星遥感有其明显的时空覆盖优势, 但受大气云层的影响较大, 遇浓云天气时遥感技术将失效; 另外, 目前遥感卫星的重访周期最快为 1 天, 不能提供更高的采样频率。光学浮标的优势在于不受大气状况的影响, 且能提供几小时甚至更高频率的监测数据。但是, 目前光学浮标主要用于水色遥感器的现场定标监测, 获取离水辐亮度、光衰减系数等信息^[6-8], 有关光学浮标用于赤潮过程的定点连续跟踪监测及预警还无报道。

本文的目的是研究基于现场光学浮标数据的 HABs 连续实时监测方法, 经过赤潮监测实例分析检验赤潮监测及预警光学浮标这一新技术的有效性。

1 数据及方法

1.1 研究海区

近年的研究表明, 珠江口是一个赤潮高发区^[9-10]。2007 年 8 月, 在珠江口担杆岛近海开展了光学浮标应用试验, 试验期间在 114.289°E、22.062°N 布放了光学浮标, 获取了连续 14 天的水体高光谱数据。同时, 每天 09:00、12:00 和 15:00 在浮标布放区采集水样, 用于 Chl. a 等水色要素的分析。

1.2 水体表观光学参数(AOPs)数据的获取及分析

水体表观光学参数(AOPs)由浮标上的高光谱辐射计自动测量。浮标上共安装 6 台高光谱辐射计, 分别测量海面、水下 0.32m 和 2.32m 深度处向下光谱辐照度和向上光谱辐亮度。辐射计有效光谱测量范围 400—860nm, 光谱分辨率 1nm。系统每天定时开机测量 12 次, 每次连续测量 10min, 其中一次测量安排在凌晨 2 点, 其他时间为每天 08:00 至 18:00 之间每隔 1h 测量一次。凌晨 2 点钟测量获取的数据为辐射计暗电流, 用于辐射计本底值的修正。测量数据通过 CDMA 实时发回实验室。

由实测数据可推导出漫射衰减系数、遥感反射率等物理量。根据水下光辐射传输理论, 考虑到水下光辐射场的角度分布, 浮体倾角为 10°时向上辐亮度测量的误差可达 3%^[11], 因此, 首先根据同步观测的浮标倾角剔除倾角大于 10°的数据。根据对实测的 9000 组倾角数据的分析, 小于 10°的倾角占 83%。然后根据凌晨 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。在此基础上, 由下式分别计算辐照度漫射衰减系数 $K_d(z)$ 和辐亮度漫射衰减系数 $K_L(z)$:

$$K_d(\lambda) = \frac{1}{z_{E_d2} - z_{E_d1}} \ln \left(\frac{E_d(z_{E_d1})}{E_d(z_{E_d2})} \right) \quad (1)$$

$$K_L(\lambda) = \frac{1}{z_{L_u2} - z_{L_u1}} \ln \left(\frac{L_u(z_{L_u1})}{L_u(z_{L_u2})} \right) \quad (2)$$

其中 z_{E_d1} 、 z_{E_d2} 为向下辐照度传感器所处的深度, $z_{E_d1}=0.325\text{m}$, $z_{E_d2}=2.30\text{m}$; z_{L_u1} 、 z_{L_u2} 为向上辐亮度传感器所处的深度, $z_{L_u1}=0.905\text{m}$, $z_{L_u2}=2.88\text{m}$ 。由于各深度的 $E_d(\lambda)$ 和 $L_u(\lambda)$ 是同步测量的, 因此在上述计算中无需专门校正海面入射辐射的涨落。

由实测的向上辐亮度推导得到水面下垫面(0⁻)的向上辐亮度, 即:

$$L_u(0^-, \lambda) = L_u(z, \lambda) e^{K_L z} \quad (3)$$

根据 Gordon 和 Ding^[12]基于蒙特卡罗计算推断的模型对 $L_u(0^-, \lambda)$ 的自阴影效应进行校正,

$$L_u^{\text{true}}(0^-, \lambda) = \frac{L_u^{\text{measured}}(0^-, \lambda)}{1 - \varepsilon} \quad (4)$$

其中 $L_u^{\text{true}}(0^-, \lambda)$ 为校正之后的值, $L_u^{\text{measured}}(0^-, \lambda)$ 为实测值, ε 为 L_u 传感器自阴影校正因子, 表示为:

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_{\text{sun}} + \varepsilon_{\text{sky}} f}{1 + f} \quad (5)$$

$$f = \frac{E_{\text{sky}}(\lambda)}{E_{\text{sun}}(\lambda)} \quad (6)$$

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 和 Smith^[13]的结果(可查找表格)进行线性插值估算。

进一步可推导得到离水辐亮度:

$$L_w(\lambda) = \frac{1-\rho}{n^2} L_u^{\text{true}}(0^-, \lambda) \quad (7)$$

通常可不考虑 $(1-\rho)/n^2$ 随波长及海面风速的变化, 因此 $(1-\rho)/n^2$ 取值 0.543。由下式计算遥感反射率:

$$R_{rs}(\lambda) = \frac{L_w(\lambda)}{E_s(\lambda)} \quad (8)$$

浮游植物吸收自然光后有部分能量以荧光的形式重新发射。荧光可用辐亮度传感器测量, 假设由细胞内发射到水体的荧光是各向同性的, 浮游植物的荧光是中心波长约为 683nm 附近的红光, 此波段水体的吸收系数较大, 因此, 水下辐亮度传感器接收的荧光信号主要来自 3—5m 水层的贡献。在自然水体中, 除自然荧光外还存在水体的后向散射、黄色物质荧光、生物发光、拉曼散射以及海底反射, 因此海水深度 z 处的总的上行光谱辐亮度包括各种因素的贡献, 如果忽略生物发光, 则由 Lambert-Beer 定律可得总上行光谱辐亮度为:

$$L_u(\lambda, z) = L_{ub}(\lambda, z) + L_{uR}(\lambda, z) + L_{uf}(\lambda, z) + L_{uCDOM}(\lambda, z) + L_{ubottom}(\lambda, z) \quad (9)$$

等号右边各参量下标 ub 、 uR 、 uf 、 $uCDOM$ 、 $ubottom$ 分别代表后向散射、拉曼散射、浮游植物自然荧光、黄色物质荧光和底层反射。Huot 等^[14]辐射传输模拟的结果表明, 拉曼散射对上行辐亮度的贡献约为 2%—3%, 这通常在光谱辐亮度测量仪器的测量误差范围之内, 可忽略。黄色物质荧光在红光波段的吸收很小, 对于浮游植物自然荧光波段(中心波长约为 683nm), 上行辐亮度中的黄色物质荧光也可忽略。对于光学无限深水体, 底层反射对上行辐亮度的影响也可忽略。因此, 本文研究的水体上行辐亮度信号主要来源于后向散射和浮游植物自然荧光, 即

$$L_u(\lambda, z) = L_{ub}(\lambda, z) + L_{uf}(\lambda, z) \quad (10)$$

(10)式表明, 传感器测得的荧光辐亮度叠加在水体后向散射信号中, 水体后向散射辐亮度与海面入射光强度有关, 同时荧光辐亮度也随海面入射辐射而变化, 为消除海面入射辐射变化的影响, 本文用同一深度的下行辐照度对上行辐亮度进行归一化处理, 即

$$R_l(\lambda, z) = \frac{L_u(\lambda, z)}{E_d(\lambda, z)} \quad (11)$$

其中 R_l 相当于辐亮度反射率。

本文采用归一化荧光线高度(NFLH, 单位为 sr^{-1})和归一化荧光强度(NFI, 单位为 $\text{nm} \cdot \text{sr}^{-1}$)提取荧光信息。归一化荧光线高度是计算反射率光谱荧光峰反射率最大值与荧光峰处波段两侧的两个波段所确定的基线同一波段上的反射率差值。归一化荧光强度是计算荧光峰处波段两侧的两个波段所确定的基线与基线以上反射率光谱所组成的部分的积分。归一化荧光线高度的计算中, 选取基线波长为 660nm、710nm, 荧光中心波长 683nm^[15]。

1.3 颗粒物及有色溶解有机物吸收系数

颗粒物及有色溶解有机物吸收系数用分光光度法测定。采集的水样用直径 25mm、孔径 0.7 μm 的 Whatman GF/F 滤膜过滤, 然后用定量滤膜技术(QFT)方法测定总颗粒物、非藻类颗粒物和浮游植物的光谱吸收系数。采用 Helios 紫外可见分光光度测量, 波段范围设为 350—750nm, 光谱分辨率为 1nm。

有色溶解有机物(CDOM)的光谱吸收系数采用 LWCC 液芯波导及光谱仪联动系统测定^[16]。

1.4 叶绿素 a 浓度的测定

采用荧光法测定海水中叶绿素 a 的浓度(Chl. a), 所用仪器 Turner-Design 10 型荧光光度计。同时测定了分级叶绿素 a 的浓度, 把粒径大于 20 μm 的藻类归为小型藻类(Micro), 粒径介于 3—20 μm 之间藻类归为微型藻类(Nano), 粒径介于 0.7—3 μm 的归为微微型藻类(Pico); 通过过滤、测定各粒径范围的叶绿素 a 浓度, 并计算各粒径范围叶绿素 a 浓度与水样叶绿素 a 总浓度的比例, 该比例分别为小型、微型、微微型藻类所占的比例。

采用显微镜镜检计数方法测定浮游植物细胞密度 CD, 并进行藻类识别。

2 赤潮的生物光学信号特征

2.1 浮游植物生物量的变化

叶绿素 a 浓度和藻细胞密度异常是赤潮发生的重要指标, 一般地, 藻细胞密度达 $10^5 \text{cell} \cdot \text{L}^{-1}$ 、叶绿素 a 浓度达 $20 \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 以上时, 可认为爆发赤潮, 本文用这两个指标来表征浮游植物生物量。Chl. a 和 CD 初始观测值分别为 $1.5 \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $3 \times 10^4 \text{cell} \cdot \text{L}^{-1}$, 在观测实验过程中 Chl. a 和 CD 都有两个量级的变化, 其变化范围分别为 0.9—31.1 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 1.29×10^4 — $1.76 \times 10^6 \text{cell} \cdot \text{L}^{-1}$ 。Chl. a 和 CD 的变化趋势较一致, 如图 1 示, 表明藻细胞的大量繁殖导致了叶绿素 a 浓度的升高。用显微镜对藻类分类的结果表明, 赤潮爆发期间优势种主要为聚生角毛藻(*Chaetoceros*)

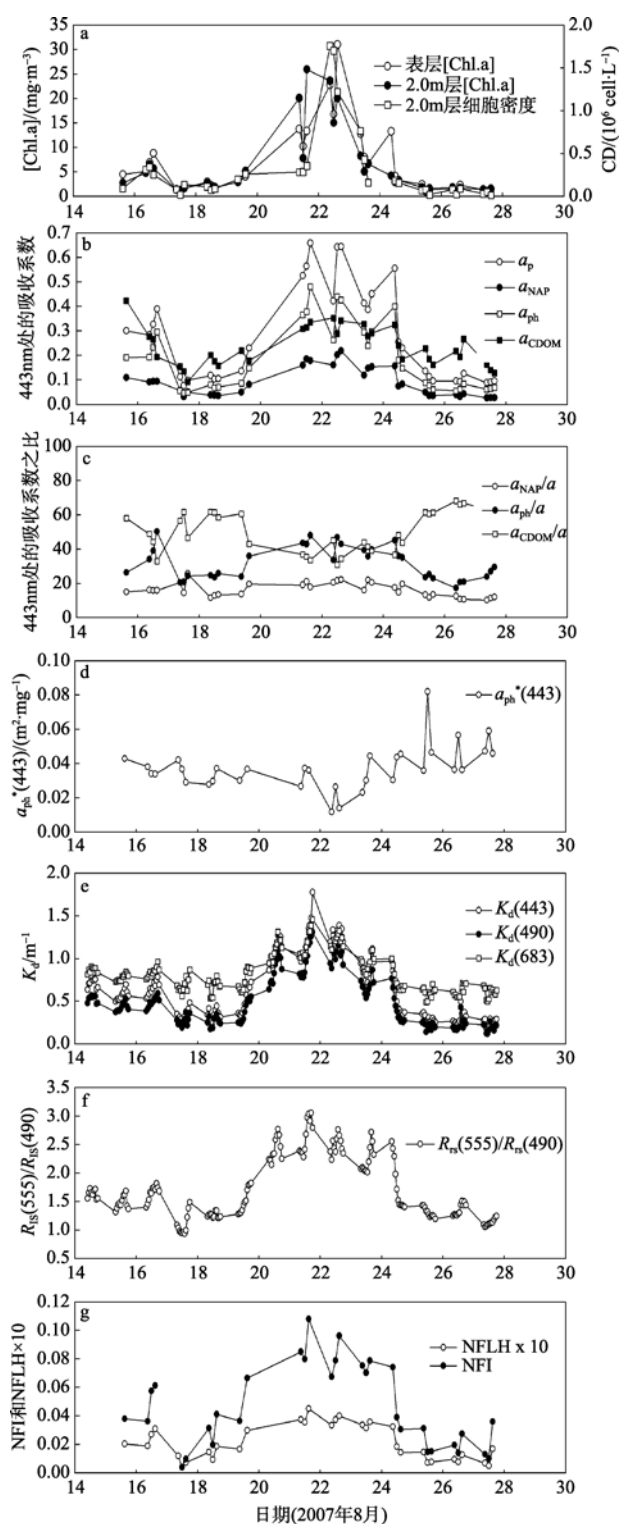


图1 生物光学特性的时间分布

a. Chl. a 和 CD; b. 443nm 处各组分的吸收系数; c. 443nm 各组分吸收系数之比; d. $a_{ph}^*(443)$; e. K_d ; f. $R_{rs}(555)/R_{rs}(490)$; g. 荧光强度和荧光高度

Fig. 1 Temporal distribution of the observed bio-optical properties, with (a) for Chl. a and CD, (b) for absorption coefficients of various continents at 443 nm, (c) for ratios of absorption coefficients of various continents at 443 nm, (d) for $a_{ph}^*(443)$, (e) for K_d , (f) for $R_{rs}(555)/R_{rs}(490)$, and (g) for NFI and NFLH

socialis), 其细胞数占有藻细胞数的 92%。赤潮前后主要为聚生角毛藻(*Chaetoceros curvisetus*)、新月筒柱藻(*Cylindrotheca closterium*)、斯托根管藻(*R. stolterfothii*) 和菱形海线藻(*Thalassionema nitzschioides*)等硅藻的混合, 甲藻及蓝藻的细胞密度相对低很多。

2.2 水体各组分的光吸收系数

水体各组分的光吸收系数表现出明显的时间序列变化, 例如, 443nm 总颗粒物吸收系数 $a_p(443)$ 变化范围为 $0.076\text{--}0.658\text{m}^{-1}$ 。赤潮前后, $a_{ph}(443)$ 、 $a_{CDOM}(443)$ 与 $a_{NAP}(443)$ 有不同的变化趋势, 主要表现在它们对总吸收系数的贡献: 赤潮期间, 浮游植物的吸收贡献达到最大, CDOM 吸收贡献达到最小, 而非藻类颗粒物的吸收贡献变化不明显。 $a_{ph}(443)$ 贡献的变化趋势与 Chl. a 及 CD 的变化趋势一致。浮游植物比吸收系数也有明显的变化, 例如 $a_{ph}^*(443)$ 和 $a_{ph}^*(676)$ 的变化范围分别为 $0.011\text{--}0.082\text{m}^2\cdot\text{mg}^{-1}$ 及 $0.007\text{--}0.042\text{m}^2\cdot\text{mg}^{-1}$, 其变化达 6 至 8 倍。赤潮期间, 浮游植物比吸收系数明显偏小, 例如, 当 Chl. a 浓度大于 $20\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时, $a_{ph}^*(443)$ 的变化范围为 $0.011\text{--}0.022\text{m}^2\cdot\text{mg}^{-1}$, 明显低于赤潮前后的值。

2.3 漫射衰减系数

向下辐照度漫射衰减系数在光谱形状和强度两方面都有较大的变化。以 $K_d(490)$ 为例, 其变化范围在 $0.158\text{--}1.185\text{m}^{-1}$ 之间, 平均值为 0.457m^{-1} 。图 1 所示为代表性波段 K_d 的时间序列, 与叶绿素 a 浓度呈现出一致的变化趋势。由图中可见, 赤潮期间 K_d 比赤潮前后的大, 赤潮前后 $K_d(443)$ 的平均值分别为 0.356 和 0.198m^{-1} 。 $K_d(\lambda)$ 的光谱形状也有很大变化, 赤潮期间其光谱形状与浮游植物的光谱吸收系数类似, 但非赤潮期间其光谱形状与浮游植物的光谱吸收系数相去甚远(除了在 683nm 这一荧光峰位置), 如图 2 示。

K_d 光谱与 a_{ph} 光谱相似性表明叶绿素浓度的变化是影响 K_d 光谱分布的决定因素, 尤其在赤潮发生期间。为此, 采用最小二乘法对 $K_d(\lambda)$ - $K_w(\lambda)$ 与 Chl. a 之间的相关关系进行统计分析, 即表示为幂指数函数的形式:

$$K_d(\lambda) - K_w(\lambda) = \chi_1(\lambda)[\text{Chl. a}]^{e_1(\lambda)} \quad (12)$$

这里 $K_w(\lambda)$ 表示纯海水的衰减系数, 本文引用 Morel 和 Maritorena^[17]的数据。拟合结果表明(图 3a, b), 在 443nm 波段两者之间表现出明显的幂指数相关性, 拟合决定系数 R^2 高达 0.92。在整个可见光波段, 尤其在蓝—绿波段拟合决定系数 R^2 值在 0.8 以上。

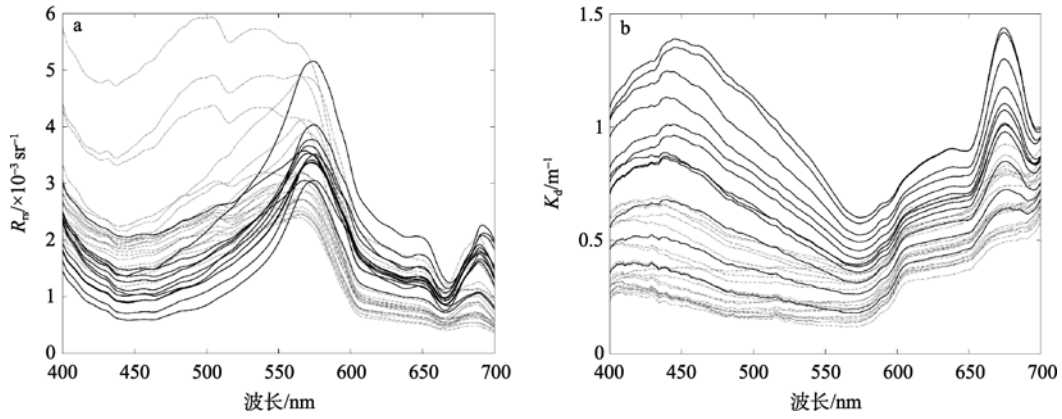


图2 遥感反射率和漫射衰减系数的光谱分布

实线代表赤潮期间, 点线表示赤潮前后

Fig. 2 Spectra of remote sensing reflectance and diffuse attenuation coefficient during the bloom (solid line), before and after the bloom (dotted line)

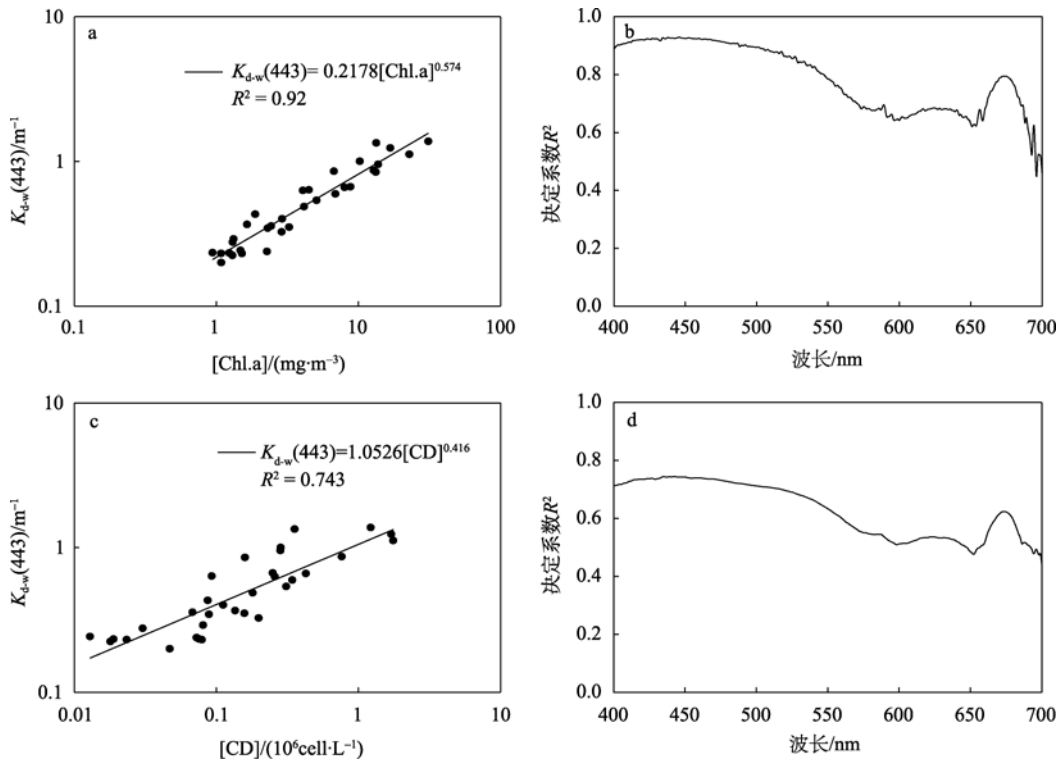


图3 $K_d(443)$ 与 Chl. a 和 CD 的相关性分析, 以及可见光波段内 $K_{d-w}(\lambda)$ 与 Chl. a、CD 之间幂指数关系拟合的决定系数分布

Fig. 3 Correlations between $K_{d-w}(443)$ and Chl. a, CD, and the determination coefficients for the power law relationship between $K_{d-w}(\lambda)$ and Chl. a, CD over 400–700 nm

类似地, 对 443 nm 和整个可见光波段的漫射衰减系数与细胞密度 CD 之间的幂指数关系分析, 表示为:

$$K_d(\lambda) - K_w(\lambda) = \chi_2(\lambda)[CD]^{e_2(\lambda)} \quad (13)$$

此处 CD 单位为 $10^6 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$, 函数拟合结果如图 3c、d 示, 其中蓝-绿光波段函数拟合的 R^2 大于 0.7, 表明了藻细胞密度对水体漫射衰减系数的影响, 为进一步根据浮标测量的 K_d 监测浮游植物生物量的变化

提供了很好的条件。

2.4 遥感反射率

如图 2a 示, 遥感反射率(R_{rs})的光谱形状与强度都有较大的变化, 在赤潮前后, R_{rs} 在蓝绿光波段较高, 尤其在 480—570nm 的波段, 但在赤潮期间, R_{rs} 在蓝绿波段的值相对较小, 在 570nm 附近的峰值也窄很多。对于所有的观测数据, 均观测到遥感反射率 R_{rs} 在 685nm 附近的峰值, 这一峰值与浮游植

物的自然荧光有关^[15,18]。

遥感反射率蓝-绿波段的比值与水体叶绿素 a 浓度之间存在着密切的相关性, 如图 1, 490nm 和 555nm 的光谱反射率比值表现出明显的时间序列变化, 与叶绿素 a 浓度的变化呈现出反向相关, 两者之间幂指数拟合的决定系数为 0.83。

根据统计分析得出, Chl.a(或 CD, 此处单位为 $10^6 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$)可用 $R_{rs}(\lambda)$ 波段比值来表征:

$$[\text{Chl.a}] = A_{\text{Chl.a}} \left(\frac{R_{rs}(\lambda_1)}{R_{rs}(\lambda_2)} \right)^{B_{\text{Chl.a}}} \quad (14)$$

$$[\text{CD}] = A_{\text{CD}} \left(\frac{R_{rs}(\lambda_1)}{R_{rs}(\lambda_2)} \right)^{B_{\text{CD}}} \quad (15)$$

本文选取 λ_2 为遥感反射率光谱的峰值波长 570nm, 幂指数拟合结果如图 4 所示, 可见 $R_{rs}(\lambda)/R_{rs}(570)$ 与叶

绿素 a 浓度、藻细胞密度 CD 之间表现出明显的相关性, 在蓝—绿波段和红光波段 R^2 分别在 0.8 和 0.6 以上。

进一步分析得出, 698nm 和 570nm 的遥感反射率组合反演的叶绿素 a 浓度具有很好的效果, $R^2=0.88$, 相对偏差的均方根约为 33.8%, 表示为:

$$[\text{Chl.a}] = 81.48 * \left(\frac{R_{rs}(698)}{R_{rs}(570)} \right)^{2.323} \quad (16)$$

$R_{rs}(698)/R_{rs}(570)$ 与藻细胞密度之间的幂指数函数可以表示如下, $R^2=0.63$:

$$[\text{CD}] = 3.693 * \left(\frac{R_{rs}(698)}{R_{rs}(570)} \right)^{2.461} \quad (17)$$

遥感反射率光谱表现出来的与水体叶绿素 a 浓度、藻细胞密度之间的相关性也为基于浮标数据监测水体浮游植物生物量的变化提供了条件。

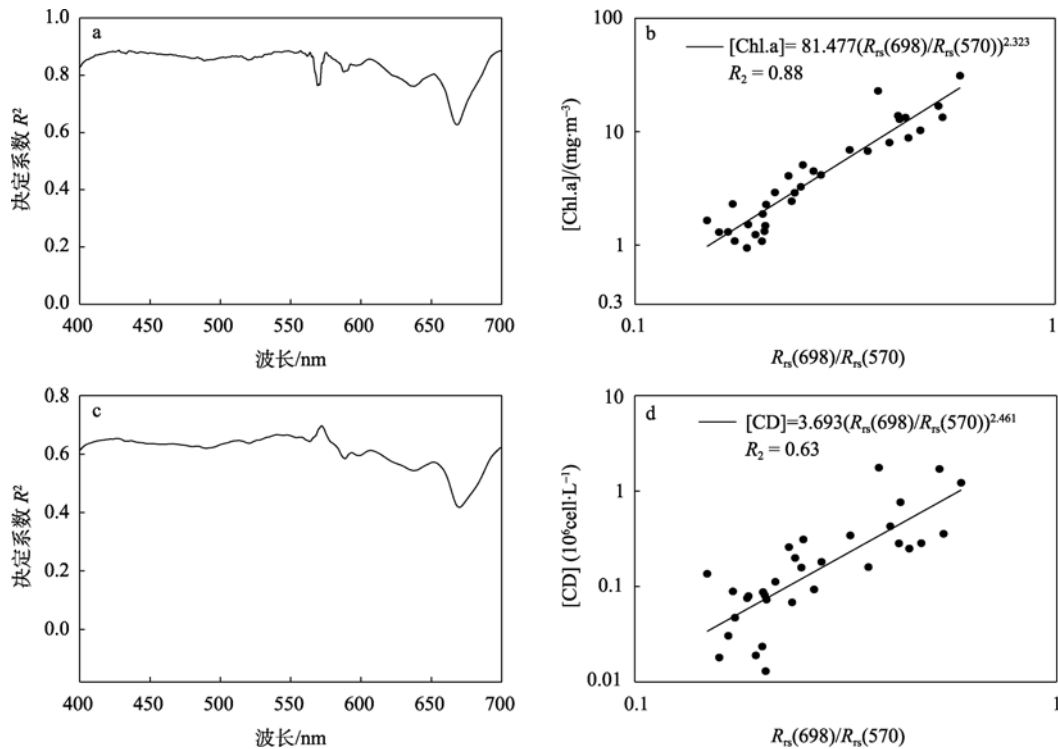


图 4 可见光波段内 $R_{rs}(\lambda)/R_{rs}(570)$ 与 Chl. a、CD 之间幂指数关系拟合的决定系数分布, 以及 $R_{rs}(698)/R_{rs}(570)$ 与 Chl. a 和 CD 的相关性分析

Fig. 4 Determination coefficients for the power law relationship between $R_{rs}(\lambda)/R_{rs}(570)$ and Chl. a, CD over 400–700 nm, and correlations between $R_{rs}(698)/R_{rs}(570)$ and Chl. a, CD

2.5 归一化荧光线高度

赤潮爆发期间, NFLH 和 NFI 都变化了约 6 倍。浮游植物荧光信号从 19 号开始增大直到 21 的最大值, 此后, 信号减小直至 24 号的最小值。浮游植物 Chl.a 也经历了与荧光信号一样的过程, 其间底层 Chl.a 增加了 5 倍。与此同时, 藻细胞密度也同 Chl.a 浓度一样增加了 6 倍。

统计分析表明, NFLH (或 NFI) 与 Chl.a 和 CD 之间的相关关系可表示为二次多项式的形式^[16]:

$$[\text{Chl.a}] = 0.117 + 136.1[\text{NFI}] - 191.9[\text{NFI}]^2, \quad R = 0.75 \quad (18)$$

$$[\text{CD}] = -0.03 + 194.3[\text{NFLH}] - 11409[\text{NFLH}]^2, \quad R = 0.57 \quad (19)$$

这里, $[\text{Chl.a}]$ 代表 Chl.a 浓度($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$), $[\text{CD}]$ 代表细胞

密度($10^6 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$)。

3 讨论

Chl.a 及 CD 异常是用以判断赤潮发生与否的关键参数,当前,遥感技术尚不能提供时间尺度小于 24h 的 Chl.a 及 CD 数据。

式(9)—(16)被用以从光学特性反演 Chl.a 和 CD,如图 5 示,反演的 Chl.a 和 CD 值与实测值有很好的—致性,表明锚泊光学浮标为连续赤潮监测及其预警提供了很好的条件。为了检验反演结果,将实测值与反演值之间相对偏差的均方差 RRMS (relative root mean square error)定义如下:

$$\text{RRMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{X_i(\text{estimated}) - X_i(\text{measured})}{X_i(\text{measured})} \right)^2} \quad (20)$$

其中, n 为样品数, X 即为 Chl.a 或者 CD。表 1 给出了各种光学特性及其反演结果的比较结果。

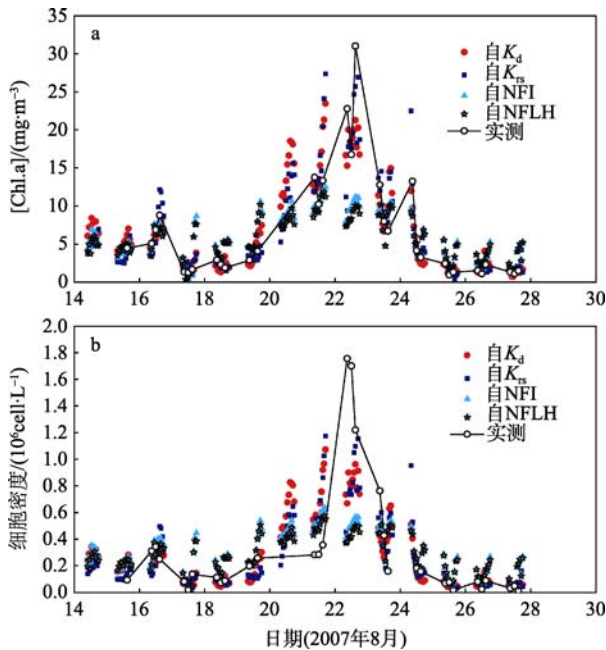


图5 Chl.a 反演结果(a) 及 CD 反演结果(b)与实测结果的比较

Fig. 5 Comparisons of Chl. a between derived and measured (a) and comparisons of CD between derived and measured (b)

值得注意的是, Chl.a 的反演精度比 CD 的高,比如 Chl.a 的反演的相对 RRMS 为 30.6%—77.4%,而 CD 反演的相对 RRMS 为 83.6%—136.4%,如表 1 示。同样值得注意的是,由漫射衰减系数或者遥感反射率的反演精度比用荧光高度的反演精度高,比如用荧光高度反演 Chl.a 的相对 RRMS 为 77.4%,而用漫射衰减系数或者遥感反射率反演 Chl.

a 的相对 RRMS 分别为 30.6% 和 33.8%。下面对此展开讨论。

表 1 由生物光学特性反演 Chl 和 CD 的相对偏差的比较
Tab. 1 Comparison of relative error for retrieving Chl. a and CD via various optical properties

方 法	最大值/%	最小值/%	RRMS/%
$K_d(443) \sim \text{Chl}$	77.9	1.2	30.6
$R_{rs}(698)/R_{rs}(570) \sim \text{Chl}$	81.3	0.1	33.8
NFI~Chl	274.2	0.8	77.4
NFLH~CD	377.0	13.8	136.4
$K_d(443) \sim \text{CD}$	241.1	3.3	83.6
$R_{rs}(698)/R_{rs}(570) \sim \text{CD}$	243.9	3.4	83.9

漫射衰减系数通过吸收与散射系数与 Chl.a、非藻类颗粒物及有色溶解有机物发生作用,图 3 表明, K_d 的 34%—92% (平均值 73%)与 Chl.a 浓度有关,但只有 19%—73% (平均值 58%)与细胞密度有关。由此可见,漫射衰减系数对 Chl.a 的变化比对细胞密度的变化更敏感。类似地, R_{rs} 和 NFI 也这样,即反射率的比值及荧光强度对 Chl.a 的变化比对细胞密度的变化更敏感。这些结果可由细胞尺寸及细胞内色素浓度的差别来解释。镜检的结果表明,赤潮发生期间浮游植物优势藻主要为聚生角毛藻,藻华前后主要为硅藻混合藻,色素组分的变化相对稳定。分粒级叶绿素 a 浓度的分析结果表明,藻华期间优势藻主要为 $>20 \mu\text{m}$ 的硅藻(*Chaetoceros socialis*),而赤潮前后硅藻的数量明显减少,表现为较多的是小于 $20 \mu\text{m}$ 的藻类。

赤潮期间 Chl.a 浓度较高,荧光强度与 Chl.a 的关系还受到荧光效率、水体吸收系数、水体衰减系数等其他因素的影响^[19]。色素打包效应对浮游植物荧光的影响是一直存在的, Babin 等^[20]的结果表明,叶绿素 a 浓度由 0.03 到 $30 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时,打包因子(Q_a)减小了 3 倍(由 1 到 0.3)。观测期间,赤潮前后 Chl.a 浓度的变化达到 5 倍,更有甚者,藻华期间 Micro-级别的浮游植物增多,细胞密度增加,被细胞内色素吸收的荧光强度将随着 Q_a 的减小而增大,因此探测到的荧光强度将减小,反演得到的 Chl.a 浓度将减小。

水体的衰减系数将影响探测到的自然荧光,图 1e 给出了计算得到的漫射衰减系数,可见赤潮期间漫射衰减系数增大,因此荧光信号被探测到之前被吸收的比例增大。水体本身的吸收也将导致被探测到的荧光信号减小。McKee 等^[21]最近指出,非藻类颗粒物对离水辐亮度自然荧光信号的影响可达 50%。因此,有必要研究荧光信号的算法。

4 结论

本文对珠江口海域的连续观测期间正好发生了赤潮, 观测研究表明, 叶绿素 a 浓度和细胞密度变化范围分别为 $0.9\text{--}31.1\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $1.28\times 10^4\text{--}1.76\times 10^6\text{cell}\cdot\text{L}^{-1}$, 而且优势藻为硅藻。颗粒物吸收系数的变化趋势与叶绿素 a 浓度的变化趋势一致, 也与光束衰减系数、荧光强度等的变化趋势一致。高

光谱辐射计获取的光衰减系数、遥感反射率和荧光强度可反演叶绿素 a 浓度和细胞密度, 其中反演叶绿素 a 浓度的平均 RRMS 为 30.6%、33.8%和 77.4%, 而反演细胞密度的平均 RRMS 为 83.6%、83.9%和 136.4%。本文的结果表明, 由于高光谱辐射计可以适时地获取每小时或者更短时间尺度的数据, 可以利用装备了高光谱辐射计的光学浮标用于赤潮监测与预警系统。

参考文献

- [1] STUMPF R.P, CULVER M E, TESTER P A, et al. Monitoring *Karenia brevis* blooms in the Gulf of Mexico using satellite ocean color imagery and other data [J]. Harmful Algae, 2003, 2(2): 147–160.
- [2] MILLIE D F, SCHOFIELD O, KIRKPATRICK G J, et al. Detection of harmful algal blooms using photopigments and absorption signature: A case study of the Florida red tide dinoflagellate [J]. Limnol Oceanogr, 1997, 42: 1240–1251.
- [3] CULLEN J J, CIOTT A M I, DAVIS R F, et al. Optical detection and assessment of algal blooms [J]. Limnol Oceanogr, 1997, 42: 1223–1239.
- [4] TESTER P A, STUMPF R P. Phytoplankton blooms and remote sensing: What is the potential for early warning [J]. Journal of Shellfish Research, 1998, 17(5): 1469–1471.
- [5] SCHOFIELD O, BISSETT G J, KIRKPATRICK P, et al. Optical monitoring and forecasting systems for harmful algal blooms: Possibility or pipe dream?[J]. J Phycology, 1999, 35(6 supp.): 1477–1496.
- [6] ANTOINE D, D'ORTENZIO F, HOOKER S B, et al. Assessment of uncertainty in the ocean reflectance determined by three satellite ocean color sensors (MERIS, SeaWiFS and MODIS-A) at an offshore site in the Mediterranean Sea (BOUSSOLE project)[J]. J Geophys Res, 2008, 113: doi: 10.1029/2007JC004472.
- [7] CLARK D K, YARBROUGH M A, FEINHOLZ M, et al. MOBY, A Radiometric Buoy for Performance Monitoring and Vicarious Calibration of Satellite Ocean Color Sensors: Measurement and Data Analysis Protocols[S]. Ocean optics protocols for satellite ocean color sensor validation. 2003, Rev. 4, Vol. VI, NASA Tech. Memo. 2003-211621, NASA GSFC, Greenbelt, MD, 141 pp.
- [8] PINKERTON M H, LAVENDER S J, AIKEN J. Validation of SeaWiFS ocean color satellite data using moored data buoy[J]. J Geophys Res, 2003, 108: doi: 10.1029/2002JC001337.
- [9] TANG D L, KESTER D R, NI I-HSUN, et al. In situ and satellite observations of a harmful algal bloom and water condition at the Pearl River estuary in late autumn 1998[J]. Harmful Algae, 2003, 2: 89–99.
- [10] YIN K D, ZHANG J L, QIAN P Y, et al. Effect of wind events on phytoplankton blooms in the Pearl River estuary during summer [J]. Continental Shelf Research, 2004, 24: 1909–1923.
- [11] MOREL A, GENTILI B. Diffuse reflectance of oceanic waters. II. Bidirectional aspects [J]. Appl Opt, 1993, 32: 6864–6879.
- [12] Gordon H R, Ding K. Self-shading of in-water optical instruments[J]. Limnol Oceanogr 1992, 37: 491–500.
- [13] Baker K S, Smith R C. Irradiance transmittance through the air-water interface [M] //SPINRAD R W, Ocean Optics X. Proc SPIE, 1990, 1302, 556–565.
- [14] HUOT Y, BROWN C A, CULLEN J J. Retrieval of phytoplankton biomass from simultaneous inversion of reflectance, the diffuse attenuation coefficient, and Sun-induced fluorescence in coastal waters[J]. J of Geophys Res, 2007, 112, C06013.
- [15] ZHAO J, CAO W X, YANG Y Z, et al. Measuring natural phytoplankton fluorescence and biomass: A case study of algal bloom in the Pearl River estuary [J]. Marine Pollution Bulletin, 2008, 56: 1795–1801.
- [16] KIRKPATRICK G J, ORRICO C, MOLINE M A, et al. Continuous hyper spectral absorption measurements of colored dissolved organic material in aquatic systems[J]. Applied Optics, 2003, 42: 6564–6568.
- [17] MOREL A, MARITORENA S. Bio-optical properties of oceanic waters: a reappraisal[J]. Journal of Geophysical Research, 2001, 106 : 7163–7180.
- [18] 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]. Limnol Oceanogr, 2006, 51(6): 2646–2659.
- [19] GILERSON A, ZHOU J, HLAING S, et al. Fluorescence component in the reflectance spectra from coastal waters. Dependence on water composition [J]. Optics Express, 2007, 15(24): 15702–15721.
- [20] BABIN M, MOREL A, GENTILI B. Remote sensing of sea surface sun-induced chlorophyll fluorescence: Consequences of natural variations in the optical characteristics of phytoplankton and the quantum yield of chlorophyll a fluorescence [J]. Int J Remote Sensing, 1996, 17: 2417–2448.
- [21] MCKEE D, CUNNINGHAM A, WRIGHT D, et al. Potential impacts of non-algal materials on water-leaving Sun-induced chlorophyll fluorescence signals in coastal waters[J]. Applied Optics, 2007, 46: 7720–7729.