

赤潮生消过程中的水体固有光学性质分析

郝艳玲^{1,2} 曹文熙³ 马毅² 崔廷伟^{2*} 张杰²

¹中国海洋大学环境科学与工程学院, 山东 青岛 266100

²国家海洋局第一海洋研究所海洋物理与遥感研究室, 山东 青岛 266061

³中国科学院南海海洋研究所热带海洋环境动力学重点实验室, 广东 广州 510301

摘要 在珠江口海域海洋光学浮标实验中获取一次聚生角毛藻赤潮生消过程的水体光学数据和相应的生化数据。利用该数据,分析了赤潮生消过程中水体光谱吸收和后向散射等光学性质的时间序列变化。研究发现,在赤潮生消过程中,浮游植物色素、非藻类颗粒物以及黄色物质等水体组分吸收变化显著,赤潮爆发期各组分光谱吸收增强并达到最大值,赤潮消亡期各组分光谱吸收降低并至最小值;赤潮爆发期与赤潮发展和消亡期相比,浮游植物的光谱吸收贡献增加约 16%,黄色物质的吸收贡献减小约 18%,而非藻类颗粒物的吸收贡献变化不大;赤潮爆发期后向散射系数明显增大,日变化幅度大,赤潮发展期和赤潮消亡期后向散射系数较小,赤潮消亡期后向散射系数降至最低;颗粒物后向散射系数与叶绿素 a 浓度的相关性优于悬浮物浓度。有机颗粒物浓度虽然在总颗粒物浓度中占主导地位,但是颗粒物后向散射与无机颗粒物的相关性更高。

关键词 海洋光学;固有光学性质;吸收特性;散射特性;赤潮;生消过程

中图分类号 P733.3

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201131.1101004

Analysis of Inherent Optical Properties in the Occurrence and Declination of a Red Tide

Hao Yanling^{1,2} Cao Wenxi³ Ma Yi² Cui Tingwei² Zhang Jie²

¹College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China

²Key Laboratory of Marine Remote Sensing Science and Marine Dynamic Information System Technology, First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao, Shandong 266061, China

³State Key Laboratory of Tropical Oceanography, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, Guangdong 510301, China

Abstract During optical buoy experiments in the Pearl River (Zhujiang) mouth regions, time series of bio-optical data of *Chaetoceros socialis* red tide is obtained. By using the data, variation of ocean optical properties (absorption and backscattering properties) in the occurrence and declination of red tide is analyzed. Results show that the absorption of various components such as phytoplankton pigments, detritus and colored dissolved organic matter changes dramatically, the absorption of various components increases and reaches maximum values in red tide outbreak period, then the absorption of various components decreases and reaches minimum values in red tide declination period. Compared with red tide development and declination period, contribution of phytoplankton pigment increases by 16%, and that of colored dissolved organic matter decreases by 18%, but that of detritus has little changes for red tide outbreak period; backscattering coefficient increases in red tide outbreak period, and range of diurnal variation is large, backscattering coefficient is small in red tide development and declination period, and the value is minimum in red tide declination period. Correlation coefficient between backscattering coefficient and chlorophyll-a concentration is larger than that between backscattering coefficient and suspended matter

收稿日期: 2011-01-24; 收到修改稿日期: 2011-06-13

基金项目: 国家 863 计划(2006AA09A310, 2007AA092102)和国家自然科学基金(60802089, 40706060, 40706059)资助课题。

作者简介: 郝艳玲(1982—), 男, 博士研究生, 主要从事海洋光学与水色遥感方面的研究。

E-mail: haoyanling_888@163.com

导师简介: 张杰(1963—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事海洋遥感方面的研究。E-mail: zhangjie@fio.org.cn

* 通信联系人。E-mail: cuitingwei@fio.org.cn

concentration. Although concentration of particulate organic matter in the total suspended particulate matter dominates, correlation coefficient between the backscattering coefficient and particulate inorganic matter concentration is larger.

Key words oceanic optics; inherent optical properties; absorption properties; scattering properties; red tide; occurrence and declination of red tide

OCIS codes 010.0280; 010.4450; 010.1030; 010.1350

1 引 言

赤潮作为一大海洋灾害,引起了世界多国政府及科学界的高度重视。如何预防赤潮灾害,尽可能减少赤潮灾害造成的损失,成为人们越来越关注的问题。赤潮的爆发具有随机性、突发性以及持续时间短等特点,这对监测工作提出更高的要求。卫星遥感技术具有快速、同步、成像以及大范围监测的优势,越来越成为赤潮监测的重要手段之一。

赤潮水体固有光学特性研究是赤潮水体遥感监测的前提和基础。国外在赤潮水体和典型赤潮藻种光谱性质研究方面已开展了一定工作。Balch 等^[1]对 1988 和 1989 年缅因湾发生的两次颗石藻赤潮进行了生物和光学性质研究,建立了后向散射与颗石藻密度的关系。Balch 等^[2]测量了 1991 年发生于北大西洋中心的中尺度颗石藻水华的散射和吸收系数,发现单位叶绿素浓度吸收系数与实验室培养藻类在同一数量级;悬浮颗石的散射对总散射的贡献率达 80%,在颗石藻赤潮的混浊区域(散射系数 $b = 1 \sim 3 \text{ m}^{-1}$),440 和 550 nm 波段的后向散射率 \bar{b}_b 约在 0.01~0.02 之间。Stuart 等^[3]利用 3 个航次的生物光学调查数据研究了藻类附属色素组成对于吸收光谱的影响。Sathyendranath 等^[4]获取了阿拉伯海三个航次的数据,发现单位叶绿素吸收系数存在很大的差异,认为这可能是浮游植物种群组成和细

胞粒径的季节性变化引起的,并指出季节性赤潮的发生依赖于浮游植物光学特性和光合特性的变化。Seppala 等^[5]获取了波罗的海不同粒级(小于 2 和小于 20 μm)不同藻类的活体浮游植物的光谱吸收数据,发现单位叶绿素浓度吸收系数的区域性变化可以由藻种组成和浮游植物种群粒级变化来解释。

上述研究工作都没有涉及固有光学性质在赤潮生消过程中的变化分析,考虑到在赤潮爆发期间,水体成分变化显著,对赤潮生消过程中反映赤潮水体本质光学特征的固有光学量进行连续观测及特征分析非常必要。本文利用 2007 年珠江口海洋光学浮标实验期间获取的光谱数据和生化数据,对期间发生的一次赤潮生消过程进行固有光学特性的时间序列变化分析,包括赤潮水体吸收性质及后向散射性质,以期为赤潮发生检测和早期预警奠定基础。

2 实验数据获取与分析

2.1 实验数据获取与处理

2007 年 8 月 15~27 日在珠江口担杆岛附近(见图 1)进行了海洋光学浮标观测实验。实验期间观测到一次赤潮生消过程,赤潮优势种为聚生角毛藻,其细胞数占总细胞数的 92%,该藻呈群体弯曲,借胶质聚集成团,常有长角毛相连接,细胞小,壳环面四方形,宽 5~15 μm ,属硅藻门^[6]。

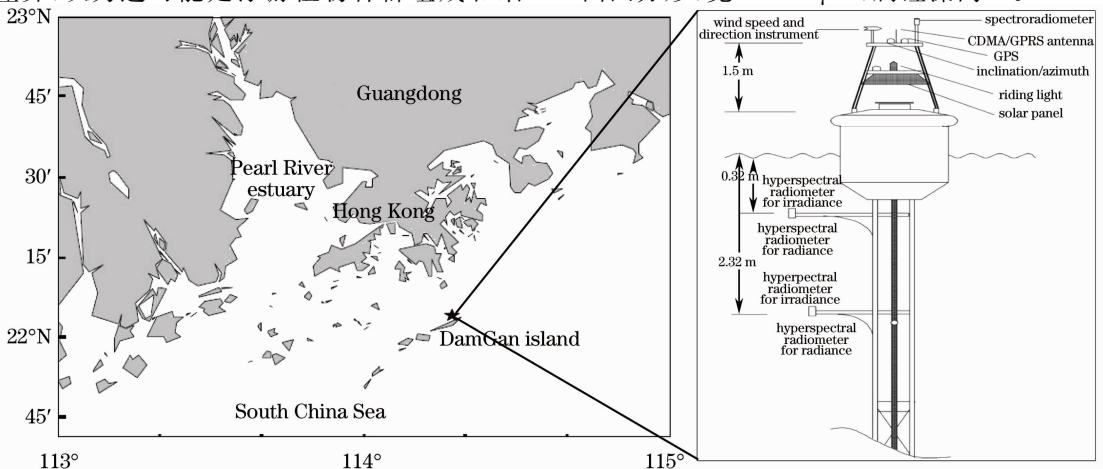


图 1 研究海域示意图(星号标注位置为浮标布放处)及光学浮标结构图

Fig. 1 Map of study area (the fixed station is marked with an asterisk) and schematic configuration of optical buoy

海洋光学浮标同时对海表面及水下两个深度的上行辐亮度(观测深度分别为 2.88 m 和 0.905 m)和下行辐照度(观测深度分别为 2.3 m 和 0.325 m)等表观光学量进行观测(如图 1),波段范围为 350~900 nm,光谱分辨率为 1 nm。实验期间,浮标运行正常,8:00~18:00 时,每隔 1 h 自动记录一次数据,共采集了 17 天的光学观测数据。由于仪器测量得到的是水体下行辐照度 $E_d(z, \lambda)$ 和上行辐亮度 $L_u(z, \lambda)$,在均匀混合水体,恰在水面之下的水体下行辐照度 $E_d(0^-, \lambda)$ 和上行辐亮度 $L_u(0^-, \lambda)$ 可通过外推的方法求得,进而得到恰在水面之下的遥感反射率 $r_{rs}(\lambda)$ 。具体地,利用水下 2.88 m 和 0.905 m 处的上行辐亮度 L_u 计算水体上行辐亮度漫衰减系数

$$K_u = -\ln[L_u(-2.88)/L_u(-0.905)]/1.975. \quad (1)$$

利用水下 2.3 m 和 0.325 m 处的下行辐照度 E_d 计算水体下行辐照度漫衰减系数

$$K_d = -\ln[E_d(-2.3)/E_d(-0.325)]/1.975. \quad (2)$$

利用水下 0.905 m 处的上行辐亮度 L_u 和上行辐亮度漫衰减系数 K_u 计算恰在水面之下的上行辐亮度

$$L_u(0^-) = L_u(-0.905) \times \exp(0.905 K_u). \quad (3)$$

利用水下 0.325 m 处的下行辐照度 E_d 和下行辐照度漫衰减系数 K_d 计算恰在水面之下的下行辐照度

$$E_d(0^-) = E_d(-0.325) \times \exp(0.325 K_d). \quad (4)$$

利用恰在水面之下辐亮度 $L_u(0^-)$ 和辐照度 $E_d(0^-)$ 得到恰在水面之下的遥感反射率

$$r_{rs}(0^-, \lambda) = L_u(0^-, \lambda)/E_d(0^-, \lambda). \quad (5)$$

同时,对浮标布放处水体进行了生物-光学参数测量,每天 9:00,12:00 和 15:00 时在与浮标数据测量匹配的时间进行三次水样采集,对水体的生物、化学和固有光学参数进行测量。样品采集与测量方法^[7]为,水样取自水深 1 m 处,采集后为避免环境温度和光照的影响,水样在黑暗且冷冻的环境下保存,并立刻送往实验室。颗粒物由 250~600 mL 海水水样过滤得到,色素是在温度为 4℃ 的黑暗环境下,在丙酮溶液中浸泡 24 h 提取得到,并利用 Turner-Design 10 荧光计对叶绿素浓度进行测量^[8]。此外,应用 20 μm 的网状过滤器、3.0 μm 聚碳酸酯滤纸和 0.7 μm 的 Whatman GF/F 滤纸按顺序对 250 mL 水样进行分级过滤^[9],得到不同粒径的浮游植物浓度。500 mL 海水水样保存在 1% 的卢戈氏溶液中,保持黑暗常温^[10],随后用于浮游植物物种测定和细胞计数。利用分光光度计分别测得水样浮游植物吸

收系数、黄色物质吸收系数和非藻类颗粒物吸收系数^[11~14]。

2.2 赤潮生消过程的水体生化参数变化

2.2.1 表层水体叶绿素 a 浓度的时间序列变化

在实验测量期间,共获取了 33 组叶绿素 a 浓度数据,图 2 为表层水体叶绿素 a 浓度的时间序列变化。

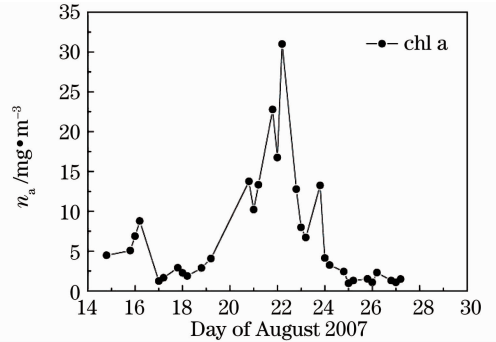


图 2 赤潮生消过程表层水体叶绿素 a 浓度时间序列变化

Fig. 2 Time series of Chl-a concentration during the occurrence and declination of red tide

由图 2 可知,叶绿素 a 浓度(n_a)的变化呈单峰形态:18~22 日, n_a 变化显著,在 22 日 15:00 时达到最大值, n_a 大于 30 mgm^{-3} ;22~27 日, n_a 下降,其中 22~24 日 n_a 下降梯度大,25 日以后下降至最低并逐渐趋于稳定。为了便于分析,根据 n_a 的量值及变化趋势,将 15~20 日称为赤潮发展期,21~24 日称为赤潮爆发期,25~27 日称为赤潮消亡期。赤潮发展期和赤潮消亡期平均 n_a 为 2.77 mgm^{-3} ,赤潮爆发期平均 n_a 为 12.99 mgm^{-3} 。

2.2.2 表层水体悬浮颗粒物浓度的时间序列变化

实验共获取了 33 组总颗粒物浓度数据,图 3 给出赤潮生消过程中表层水体总颗粒物浓度的时间序

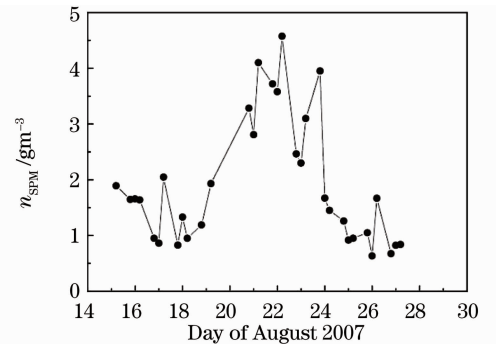


图 3 赤潮生消过程表层水体总颗粒物浓度的时间序列变化

Fig. 3 Time series of SPM concentration during occurrence and declination of red tide

列变化。

由图 3 可知,总悬浮颗粒物(SPM)浓度 n_{SPM} 在整个赤潮生消过程中的变化呈单峰形态分布,其变化趋势与 n_a 基本一致。在赤潮爆发期, n_{SPM} 明显较高,22 日 15 点出现峰值,为 4.575 gm^{-3} 。从 24 日 12 时开始, n_{SPM} 迅速下降,27 日下降至最低点。赤潮爆发期平均总颗粒物浓度为 3.08 gm^{-3} ,赤潮发展期和赤潮消亡期平均总颗粒物浓度为 1.14 gm^{-3} 。

图 4 给出了有机颗粒物(POM)、无机颗粒物(PIM)对 SPM 贡献率的时间序列变化。在赤潮爆发期,PIM 所占比例达到最大值,赤潮消亡期逐渐减小,而 POM 的变化趋势则相反。赤潮消亡期 POM 所占的比例迅速增加,其可能原因是大量浮游植物死亡降解形成了非活体有机颗粒物。

3 赤潮生消过程中水体吸收性质变化

海水的吸收是水体中各类组分对太阳光选择性吸收的综合效应,吸收系数可表达为水体各组分(吸收体和散射体)吸收系数之和,

$$a_t(\lambda) = a_w(\lambda) + a_{ph}(\lambda) + a_{nap}(\lambda) + a_g(\lambda), \quad (6)$$

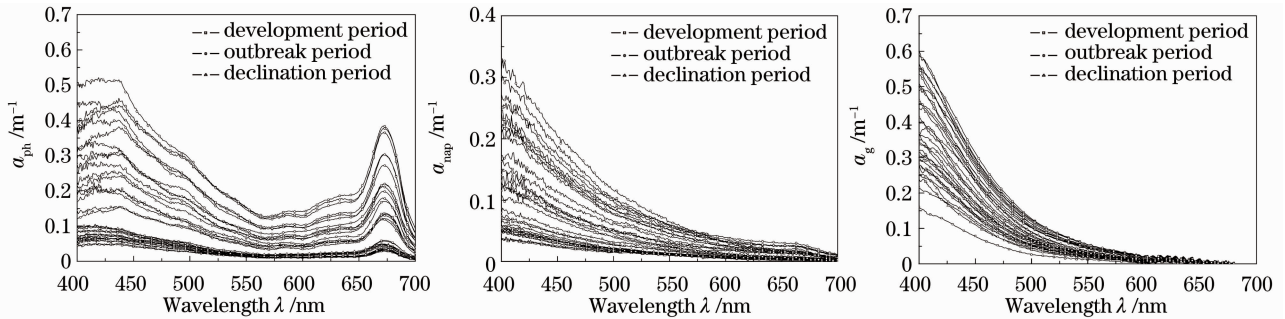


图 5 浮游植物 a_{ph} 、非藻类颗粒物 a_{nap} 和黄色物质 a_g 吸收光谱(圆圈代表赤潮爆发期, 方形代表赤潮发展期,三角形代表赤潮消亡期)

Fig. 5 Absorption spectra of a_{ph} , a_{nap} and a_g (circle, square and triangle represent red tide outbreak, development and declination period, respectively)

由图 5 可见,在赤潮发展期,水体各组分吸收光谱较低,逐日变化比较明显;在赤潮爆发期,各水体组分吸收光谱明显增大,逐日变化幅度增加,特别是浮游植物吸收系数的变化更为明显;在赤潮消亡期,浮游植物和非藻类颗粒物光谱吸收系数降至最低,且光谱逐日变化不明显,黄色物质吸收光谱与赤潮发展期无明显差异。在整个赤潮生消过程中,水体各组分吸收特性短期内变化显著, $a_{ph}(440)$ 变化范围为 $0.04 \sim 0.50 \text{ m}^{-1}$, $a_{nap}(440)$ 变化范围为 $0.025 \sim 0.26 \text{ m}^{-1}$, $a_g(440)$ 变化范围为 $0.14 \sim 0.58 \text{ m}^{-1}$, 均呈现出先增

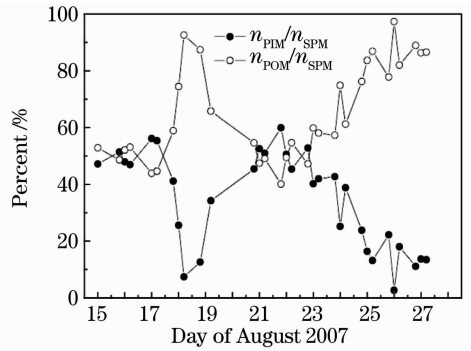


图 4 赤潮生消过程 PIM、POM 对 SPM 贡献率的时间序列变化

Fig. 4 Time series of contribution of PIM and POM for SPM during occurrence and declination of red tide
式中下标 w, ph, nap 和 g 分别代表纯海水、浮游植物、非藻类颗粒物和黄色物质。

3.1 水色组分吸收及水体总吸收的变化

图 5 为实测的浮游植物、非藻类颗粒物和黄色物质的吸收系数光谱。为了体现出不同组分吸收系数在赤潮不同时期的光谱差异,图 5 中以不同的光谱曲线类型分别表示赤潮发展期、爆发期和消亡期。

后减的趋势。

水体总吸收光谱如图 6 所示。由图 6 可见,675 nm 波段附近的叶绿素吸收峰清晰可见,570 nm 波段附近出现低谷,总吸收系数最小。赤潮生消过程中,水体总吸收系数与各组分的吸收系数变化相一致,赤潮爆发期水体总吸收系数大且逐日变化幅度大;赤潮发展期和消亡期吸收系数较小且逐日变化幅度小。在赤潮整个生消过程中,水体总吸收特性短期内变化显著, $a_t(440)$ 变化范围为 $0.20 \sim 1.04 \text{ m}^{-1}$, 呈现出先增后减的趋势。

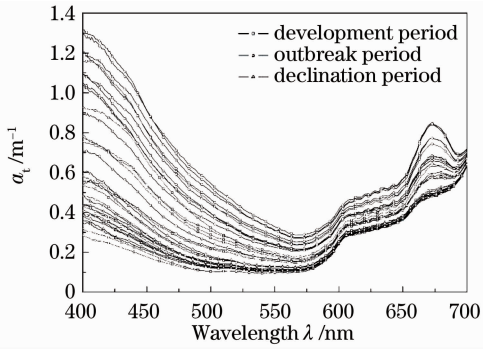


图6 水体总吸收系数光谱

Fig. 6 Spectra of total absorption coefficient of water body

3.2 水体各组分吸收贡献的变化

图7给出了赤潮生消过程中不同波段水体各组分吸收对总吸收的贡献率,其中各组分吸收取日平均值。

由图7可知,赤潮爆发期浮游植物吸收平均贡献率比赤潮发展和消亡期高(约16%),黄色物质吸收平均贡献率比赤潮发展和消亡期低(约18%),非藻类颗粒物吸收贡献率变化不大;赤潮发展期浮游植物吸收平均贡献率比消亡期略高,黄色物质吸收平均贡献率比赤潮消亡期略低。

对于赤潮发展期和消亡期,400~560 nm波段黄色物质吸收占优,620 nm和665 nm波段浮游植物吸收占优。对于赤潮爆发期,400 nm和412 nm波段黄色物质吸收占优,490~665 nm波段浮游植物吸收占优,443 nm波段两者吸收贡献率相当。在整个赤潮生消过程中,非藻类颗粒物吸收贡献变化不大,在400~560 nm之间呈上升趋势,在560~665 nm之间呈下降趋势,在560 nm的贡献率最大,这与文献[15]的结果一致。

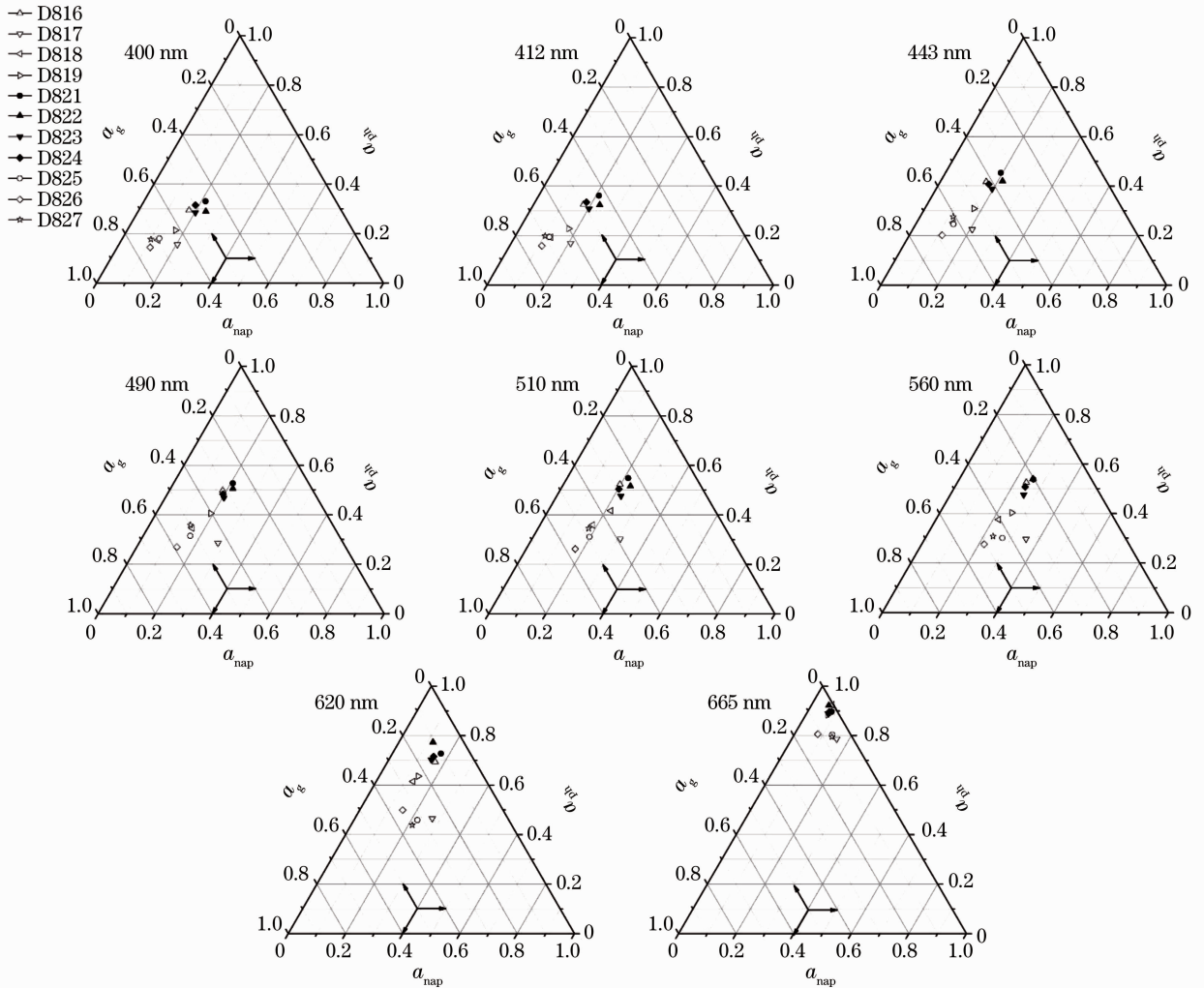


图7 浮游植物、非藻类颗粒物和黄色物质对水体总吸收的贡献率(不同形状的点表示不同的日期,D816即8月16日)

Fig. 7 Contribution of a_{ph} , a_{nap} and a_g for total absorption of the water body (different shape dots represent different dates, D816 is August 16)

3.3 浮游植物单位吸收系数的变化

利用浮游植物吸收系数和 n_a 之比计算浮游植物单位吸收系数^[16]

$$a_{ph}^*(\lambda) = \frac{a_{ph}(\lambda)}{n_a} \quad (7)$$

浮游植物单位吸收光谱见图 8, 图中以不同的光谱曲线类型表示赤潮发展期、爆发期和消亡期。

从图 8 可以看出, 与赤潮发展期和消亡期相比, 赤潮爆发期 a_{ph}^* 总体上较低, 且曲线显得更“平滑”, 峰值不明显; 赤潮消亡期 a_{ph}^* 总体上最高, 赤潮发展期 a_{ph}^* 略低。在整个赤潮生消过程中, $a_{ph}^*(440)$ 的变化范围为 0.012 ~ 0.085 m^2/mg 。图 9 给出了 440 nm 和 670 nm 波段浮游植物单位吸收系数与 n_a 的关系, 从中可以发现, 随着 n_a 的升高, 浮游植物单位吸收系数大体呈减小趋势, 这通常是由浮游植物细胞内“色素打包效应”引起的, 这种所谓的“色素打

包效应”是浮游植物光谱吸收种间和种内变化的主要来源, 不仅决定于浮游植物种类, 而且依赖于细胞的粒径大小和生理状态(依赖于周围光场和可用营养等环境因素)。

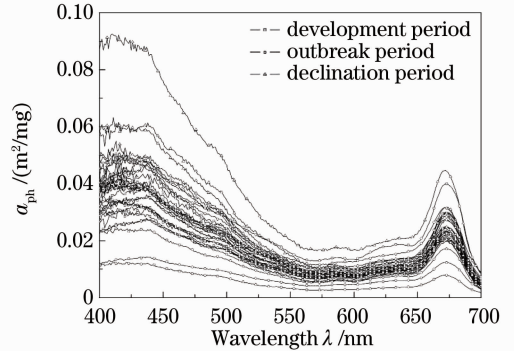


图 8 浮游植物单位吸收系数光谱 $a_{ph}^*(\lambda)$
Fig. 8 Spectra of specific absorption coefficient of phytoplankton $a_{ph}^*(\lambda)$

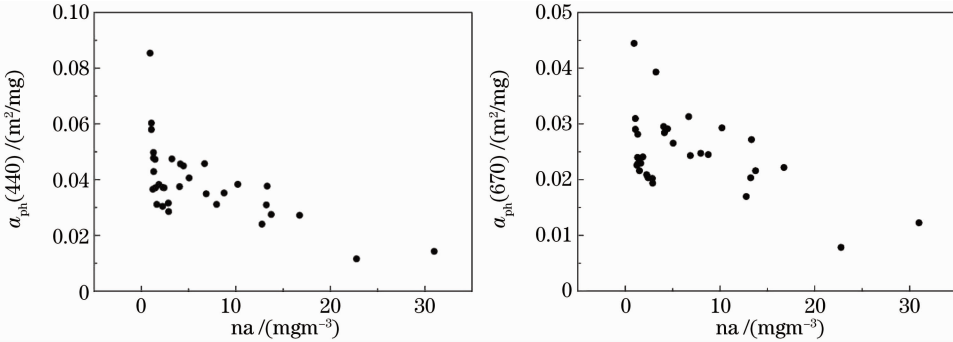


图 9 440 和 670 nm 波段浮游植物单位吸收系数与叶绿素 a 浓度的关系

Fig. 9 Relation between specific absorption coefficient of phytoplankton and Chl-a concentration at 440 and 670 nm

为进一步分析色素打包效应的强弱与浮游植物的粒径结构之间的关系, 图 10 给出了赤潮生消过程浮游植物在三个粒径尺度上的浓度比例变化。可以看出, 浮游植物粒径结构变化较大, 赤潮爆发期(正

方形) 粒径较大的小型浮游植物 (microplankton 20~200 μm) 所占比例最大; 赤潮消亡期(实心三角形) 粒径相对较小的微型浮游植物 (nanoplankton 2~20 μm) 和超微型浮游植物 (picoplankton < 2 μm) 占优。

采用“粒径指数 (I_s)”来定量描述粒径结构在赤潮生消过程中的变化。粒径指数的表达式为^[17]

$$I_s = [1 \times (\% \text{ picoplankton}) + 5 \times (\% \text{ nanoplankton}) + 50 \times (\% \text{ microplankton})] / 100 \quad (8)$$

图 11(a) 给出了赤潮生消过程中粒径指数的变化, 图 11(b) 给出了粒径指数随 n_a 的变化。

由图 11(a) 可以看出, 赤潮发展期粒径指数逐渐增大, 赤潮爆发期粒径指数达到最大值, 赤潮消亡期粒径指数逐渐减小并降至最小值, 粒径指数与叶绿素 a 浓度的变化趋势一致[见图 11(b)]。粒径指数与浮游植物单位吸收系数之间的关系反映了赤潮生消过

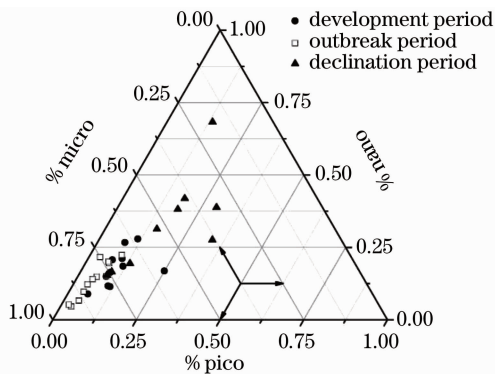
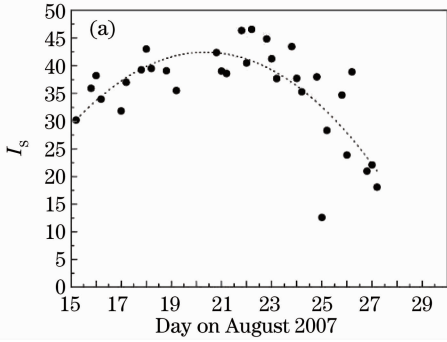


图 10 超微型浮游植物、微型浮游植物和小型浮游植物所占比例

Fig. 10 Proportion of picoplankton, nanoplankton and microplankton

程中浮游植物粒径结构对单位吸收系数的影响。图 12 给出了单位吸收系数随粒径指数的变化,可以



看出,440 nm 和 670 nm 波段的单位吸收系数随粒径指数的增大而减小,两者之间存在一定的负相关。

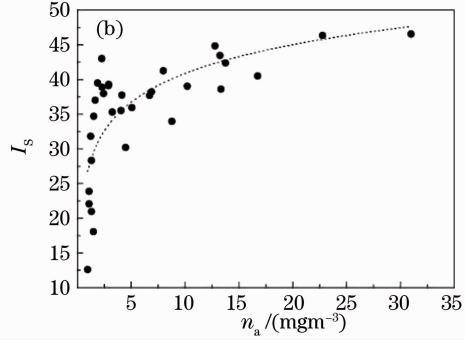


图 11 (a) 赤潮生消过程粒径指数变化及(b)其随 a_{ph} 的变化

Fig. 11 (a) Variations of SI and (b) variations of SI with a_{ph}

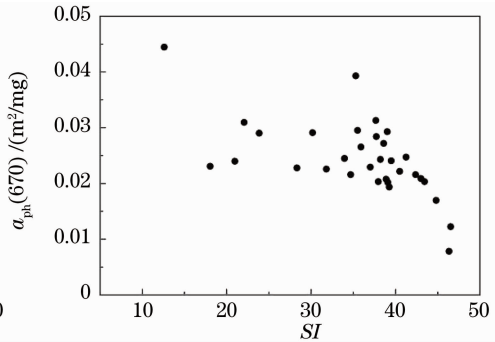
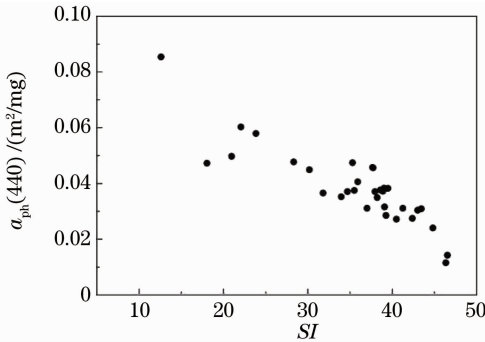


图 12 440 和 670 nm 波段单位吸收系数随粒径指数(SI)的变化

Fig. 12 Variations of $a_{ph}^*(\lambda)$ with SI at 440 nm and 670 nm

4 赤潮生消过程中水体后向散射性质变化

水体后向散射系数是重要的海洋光学参数,在以悬浮物为主要组分的浑浊二类水体中,其对于水体光学性质起着决定性的作用^[18],因此开展水体后向散射性质研究对于海洋光学与水色遥感研究具有重要意义。

4.1 颗粒物后向散射系数计算

利用恰在水面之下的遥感反射率 $r_{rs}(0^-)$ 和水体总吸收系数 a_t ,计算水体后向散射系数 b_b :

$$r_{rs}(\lambda) = g_0 u(\lambda) + g_1 [u(\lambda)]^2, \quad (9)$$

$$u = \frac{b_b}{a_t + b_b}, \quad (10)$$

式中 g_0 和 g_1 随颗粒相函数变化,本文选取适用于近岸二类水体的 $g_0 = 0.084, g_1 = 0.17$ ^[19]。

求解(3)和(4)式得

$$u(\lambda) = \frac{-g_0 + [(g_0)^2 + 4g_1 r_{rs}(\lambda)]^{1/2}}{2g_1}, \quad (11)$$

$$b_b = \frac{ua_t}{1-u}, \quad (12)$$

进一步计算颗粒物后向散射系数^[20]为

$$b_{bp} = b_b - b_{bw}, \quad (13)$$

式中 b_{bw} 为已知的纯海水后向散射系数^[21]。图 13 给出了计算得到的颗粒物后向散射系数光谱 $b_{bp}(\lambda)$ 。

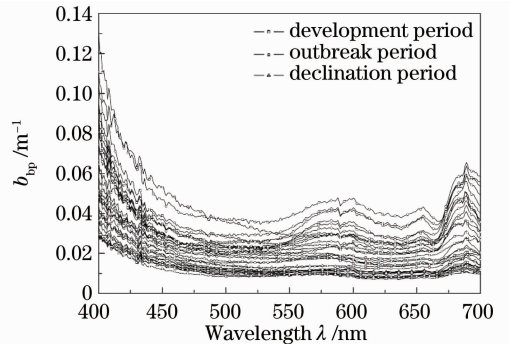


图 13 颗粒物后向散射系数光谱 b_{bp}

Fig. 13 Spectra of particulate backscattering coefficient

由图 13 可知,赤潮爆发期颗粒物后向散射系数明显增大,日变化幅度大,赤潮发展期和赤潮消亡期后向散射系数明显较低,赤潮消亡期后向散射系数降至最低。在整个赤潮生消过程中,颗粒物后向散射特性短期内变化显著, $b_{bp}(440)$ 变化范围为 0.013 ~

0.057 m⁻¹, 呈现出先增后减的趋势。

4.2 颗粒物后向散射系数与叶绿素 a 浓度的关系

图 14 给出了 412、443、490、560、620 和 665 nm 波段颗粒物后向散射与 n_a 之间的相关关系。从中

可以看出, n_a 与颗粒物后向散射系数存在乘幂关系, 且相关性较高, 尤其是在红光波段, 相关系数 R^2 在 0.88 以上。

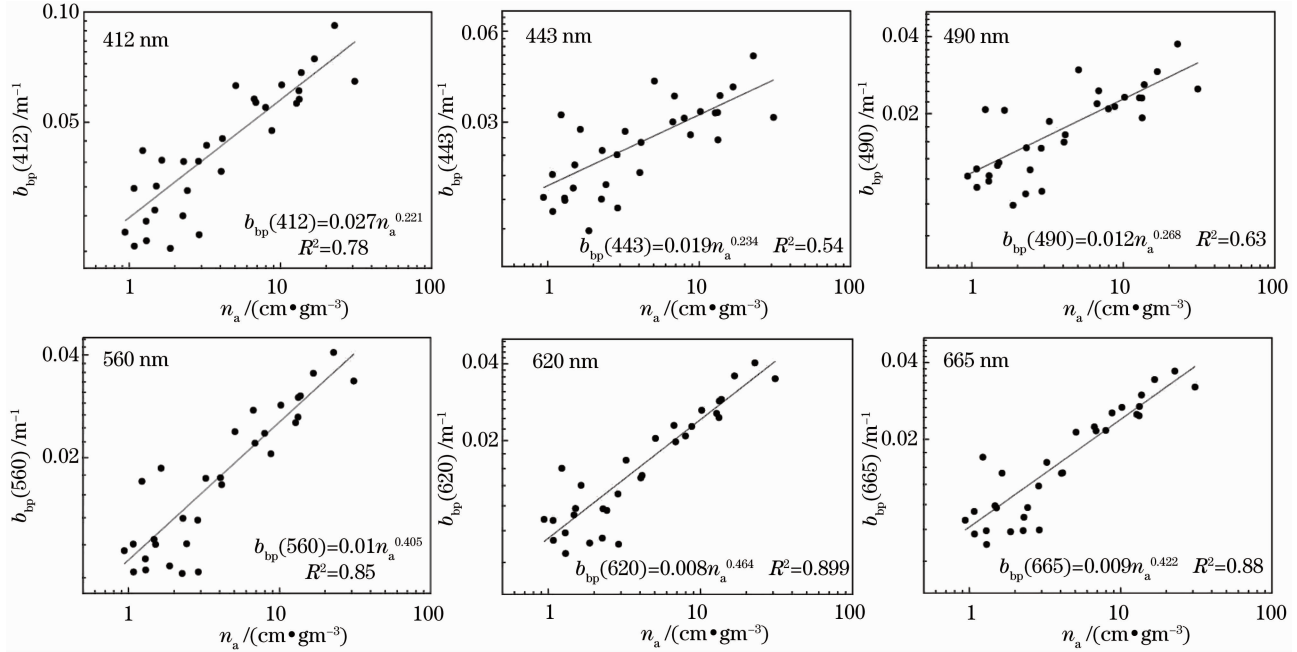


图 14 颗粒物后向散射系数 b_{bp} 与叶绿素浓度 n_a 的相关关系

Fig. 14 Relation between b_{bp} and n_a concentration n_a of Chl-a

4.3 颗粒物后向散射系数与颗粒物浓度的关系

图 15 给出了 412、443、490、560、620 和 665 nm 波段颗粒物后向散射与总悬浮物浓度之间的相关关系。由图可见, 总悬浮物浓度与颗粒物后向散射系

数存在乘幂关系, 但各波段的相关性不同, 在 443 nm 波段相关性较小, R^2 仅为 0.32; 560 nm 波段的相关性最大, R^2 为 0.79。与叶绿素 a 相比, 总颗粒物与颗粒物后向散射系数的相关性略差。

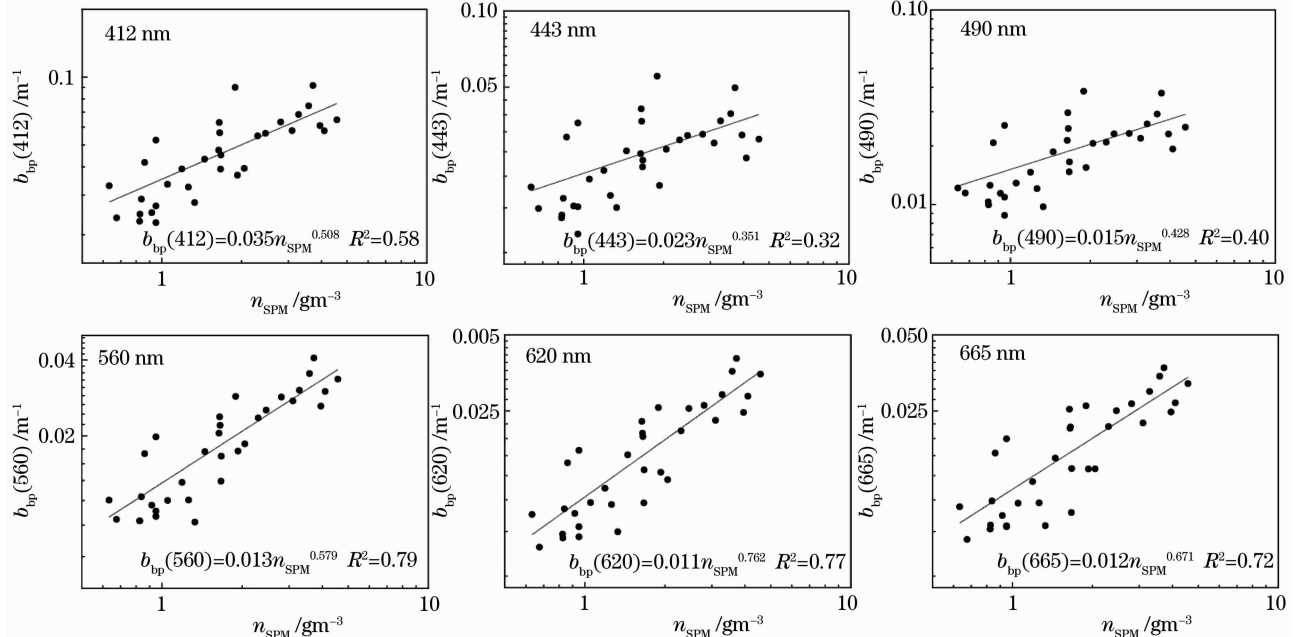


图 15 颗粒物后向散射系数 b_{bp} 与总颗粒物浓度 n_{SPM} 的相关关系

Fig. 15 Relation between b_{bp} and n_{SPM}

总颗粒物由无机颗粒物和有机颗粒物共同组成,由于二者折射率及粒径尺度等不同,它们的散射特性具有一定的差异。图 16 和图 17 分别给出了

412、443、490、560、620 和 665 nm 波段颗粒物后向散射系数与无机颗粒物和有机颗粒物浓度之间的相关关系。

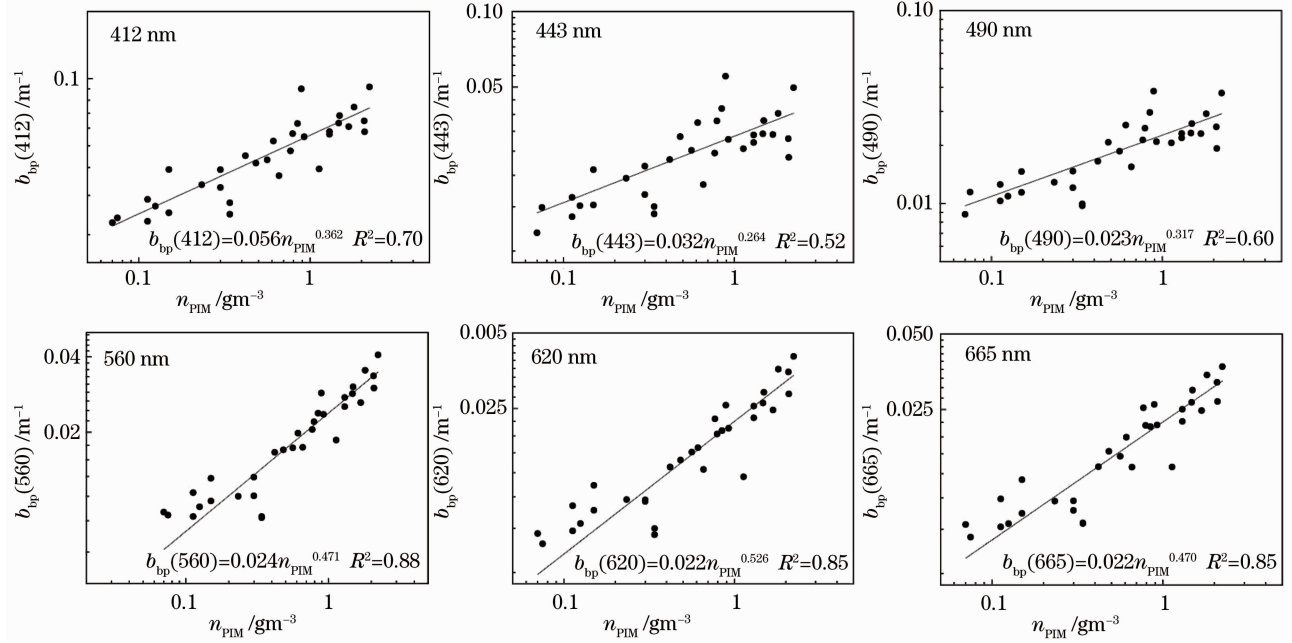


图 16 颗粒物后向散射系数 b_{bp} 与无机颗粒物浓度 n_{PIM} 的相关关系

Fig. 16 Relation between b_{bp} and n_{PIM}

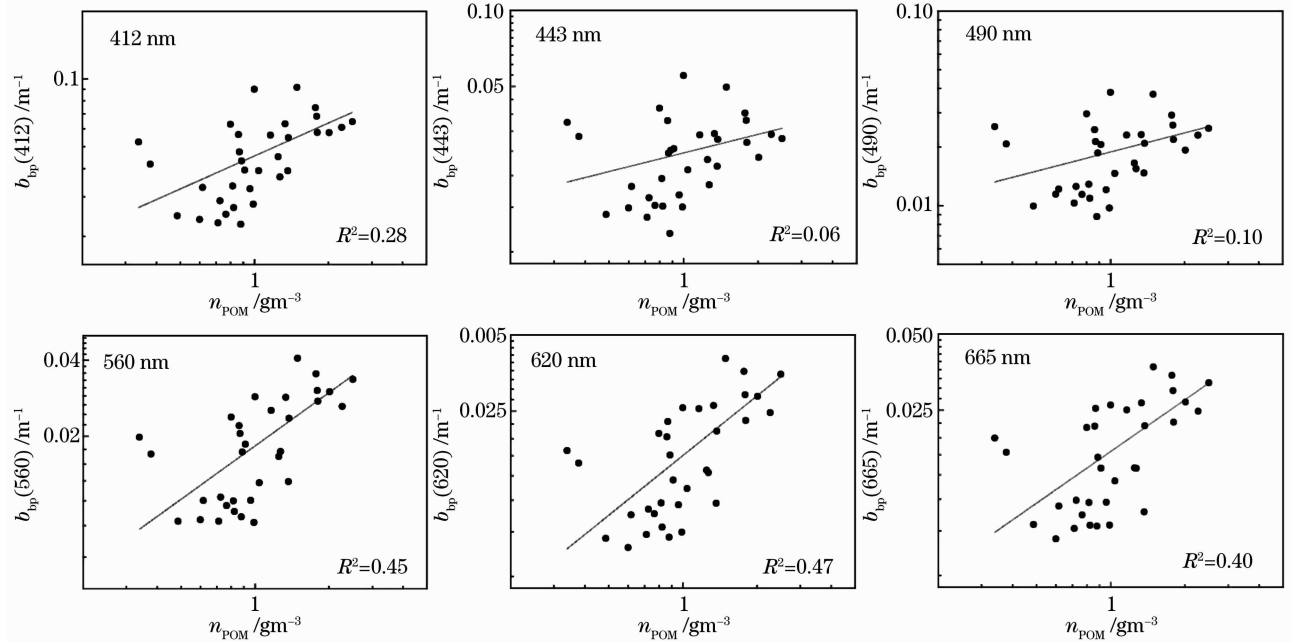


图 17 颗粒物后向散射系数 b_{bp} 与有机颗粒物浓度 n_{POM} 的相关关系

Fig. 17 Relation between b_{bp} of the particles and n_{POM} of the organic particles

由图 16 和 17 可以看出,无机颗粒物和颗粒物后向散射有较高的相关性,尤其是在红光波段,相关系数 R^2 在 0.85 以上。无机颗粒物和颗粒物后向散射的相关性优于有机颗粒物和总颗粒物,这说明,在赤潮生消过程中,虽然有机颗粒物浓度占总颗粒物

浓度的比例较大(尤其在赤潮消亡期),但无机颗粒物对后向散射的贡献更大。

5 结 论

在赤潮生消过程中,浮游植物色素、非藻类颗粒

物以及黄色物质等水体组分吸收变化显著,赤潮爆发期各组分光谱吸收增强并达到最大值,赤潮消亡期各组分光谱吸收降低并达到最低值。在整个赤潮生消过程中,水体各组分在 440 nm 波长的吸收系数变化范围分别为, $a_{ph}(440)$ 在 $0.04 \sim 0.50 \text{ m}^{-1}$ 之间, $a_{nap}(440)$ 在 $0.025 \sim 0.26 \text{ m}^{-1}$ 之间, $a_g(440)$ 在 $0.14 \sim 0.58 \text{ m}^{-1}$ 之间,均呈现出先增后减的趋势;水体各组分对总吸收的贡献变化明显,赤潮爆发期与赤潮发展和消亡期相比,浮游植物的光谱吸收贡献增加约 16%,黄色物质的吸收贡献减小约 18%,而非藻类颗粒物的吸收贡献变化不大;浮游植物单位叶绿素 a 浓度吸收系数在 440 nm 波长的变化范围为 $0.012 \sim 0.085 \text{ m}^2/\text{mg}$;

赤潮爆发期后向散射系数明显增大,日变化幅度大,赤潮发展期和赤潮消亡期后向散射系数明显较低,赤潮消亡期后向散射系数降至最低。在整个赤潮生消过程中,颗粒物后向散射系数在 440 nm 波长的变化范围为 $0.013 \sim 0.057 \text{ m}^{-1}$;颗粒物后向散射系数与叶绿素 a 浓度的相关性优于悬浮物浓度。有机颗粒物浓度虽然在总颗粒物浓度中占主导地位,但是颗粒物后向散射与无机颗粒物的相关性更高。

参 考 文 献

- 1 W. M. Balch, P. M. Hollogan, S. G. Ackleson *et al.*. Biological and optical properties of mesoscale coccolithophore blooms in the gulf of Maine[J]. *Limnol. Oceanogr.*, 1991, **36**(4): 629~643
- 2 W. M. Balch, K. A. Kilpatrick, C. C. Trees. The 1991 coccolithophore bloom in the central North Atlantic. 1. Optical properties and factors affecting their distribution, 1996, **41**(8): 1669~1683
- 3 V. Stuart, S. Sathyendranath, T. Platt *et al.*. Pigments and species composition of natural phytoplankton populations: Effects on the absorption spectra[J]. *J. Plankton Res.*, 1998, **20**(2): 187~217
- 4 S. Sathyendranath, V. Stuart, Brian D. Irwin *et al.*. Seasonal variations in bio-optical properties of phytoplankton in the Arabian Sea[J]. *Deep-Sea Research II*, 1999, **46**(3-4): 633~653
- 5 J. Seppala, P. Ylostalo, H. Kuosa. Spectral absorption and fluorescence characteristics of phytoplankton in different size fractions across a salinity gradient in the Baltic Sea [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2005, **36**(2): 378~414
- 6 Guo Hao. Illustrations of Planktons Responsible for the Blooms in Chinese Coastal Waters[M]. Ocean Press, Beijing, 2004. 50~54
郭 皓. 中国近海赤潮生物图谱[M]. 北京: 海洋出版社, 2004. 50~51
- 7 Zhao Jun, Wenxi Cao, Yuezhong Yang *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
- 8 T. R. Parsons, Y. Maita, C. M. Lali. A Manual of Chemical

and Biological Methods for Seawater Analysis[M]. Pergamon Press, Oxford, 1984. 1~173

- 9 Wang Guifeng, Cao Wenxi, Xu Dazhi *et al.*. Variability of phytoplankton absorption in the northern South China Sea, influence of the size structure and pigment composition of algal populations[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2007, **26**(2): 12~25
- 10 M. Varela, E. Fernandez, P. Serret. Size-fractionated phytoplankton biomass and primary production in the Gerlache and south Bransfield Straits (Antarctic Peninsula) in Austral summer 1995-1996 [J]. *Deep-Sea Reserch II*, 2002, **49**: 749~768
- 11 908 Project Office of State Oceanic Administration. Specification for Ocean Optical Parameters in the Sea[M]. Beijing: Ocean Press, 2006. 10~15
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. 10~15
- 12 Zhao Qiaohua. Inversion of absorption coefficient of medium in shallow lake[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1766~1771
赵巧华. 浅水湖泊中介质吸收系数的反演[J]. *光学学报*, 2009, **29**(7): 1766~1771
- 13 Cao Wenxi, Yang Yuezhong, Xu Xiaoqiang. Absorption spectra and its regional model for the suspended particulate material in the pearl river esturay [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, **40**(17): 1876~1881
曹文熙, 杨跃忠, 徐晓强. 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, **40**(17): 1876~1881
- 14 Le Chengfeng, Li Yunmei, Zha Yong *et al.*. Study on partitioning of phytoplankton absorption coefficient from total spectral absorption in Taihu Lake[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(11): 3090~3096
乐成峰, 李云梅, 查 勇 等. 太湖水体浮游藻类吸收系数分离方法研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(11): 3090~3096
- 15 M. Babin, D. Stramski, G. M. Ferrari *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.*, 2003b(C7): 3211~3230
- 16 Huang Chuangchun, Li Yunmei, Wang Qiao *et al.*. Interaction of influencing factors to bidirection and air-water interface parameter in turbid water body[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 625~632
黄昌春, 李云梅, 王 桥 等. 水-气界面参数和二向性影响因素交互作用研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 625~632
- 17 A. Bricaud, H. Claustre, J. Ras *et al.*. Natural variability of phytoplanktonic absorption in ocean waters: Influence of the size structure of algal populations [J]. *J. Geophys. Res.*, 2004, **109**: C11010
- 18 Cui Tingwei, Zhang Jie, Ma Yi *et al.*. Backscattering coefficient retrieval model for nearshore area of Bohai Sea[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(11): 2042~2045
崔廷伟, 张 杰, 马 毅 等. 渤海近岸水体后向散射系数反演模型[J]. *光学学报*, 2008, **28**(11): 2042~2045
- 19 Z. P. Lee, K. L. Carder, C. D. Mobley *et al.*. Hyperspectral remote sensing for shallow waters. 2. Deriving bottom depths and water properties by optimization [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**: 3831~3843
- 20 Shi Kun, Li Yunmei, Wang Qiao *et al.*. Study of scattering coefficients model in inland eutrophic lake [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2478~2485
施 坤, 李云梅, 王 桥 等. 内陆湖泊富营养化水体散射系数模型研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2478~2485
- 21 R. C. Smith, K. S. Baker. Optical properties of the clearest natural waters[J]. *Appl. Opt.*, 1981, (2): 177~184