

赤潮对近岸水体生物光学特性的影响

王林¹, 赵冬至^{1*}, 杨建洪¹, 刘永健¹, 王祥^{1,2}, 邹晓阁^{1,2}

(1. 国家海洋环境监测中心, 大连 116023; 2. 大连海事大学环境科学与工程学院, 大连 116026)

摘要:研究了赤潮对近岸水体生物光学特性的影响. 从大连湾采集 11 个站位的水体生物光学数据, 分析了赤潮发生时生物要素、反射光谱以及吸收光谱的变化特征. 结果表明, 大连湾本次赤潮由微微型藻类引起; 赤潮对水体遥感反射率的光谱形状影响明显, 与正常水体相比, 由于高浓度叶绿素 a 的强吸收作用, 导致 440、632 nm 波段附近出现反射谷, 红光波段荧光峰高度远大于正常水体, 且存在“红移现象”, 760 nm 波段存在氧气响应刺峰, 近红外波段悬浮物反射峰增强; 赤潮对水体吸收系数光谱的影响主要体现在数值大小上, 对比发现各水色组分的吸收系数远大于正常水体, 特征波段处 $a_{ph}(440)$ 、 $a_{ph}(675)$ 、 $a_d(440)$ 、 $a_g(440)$ 分别增大了 13.4、14.5、5.0、3.8 倍. 本研究确定了近岸海域发生赤潮时水体生物光学要素的变化特征, 为卫星遥感监测赤潮提供了理论依据.

关键词:赤潮; 生物光学特性; 遥感反射率; 吸收系数; 大连湾

中图分类号: X55; X87 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)10-2855-06

Effects of Harmful Algal Bloom on Bio-optical Properties of Coastal Water

WANG Lin¹, ZHAO Dong-zhi¹, YANG Jian-hong¹, LIU Yong-jian¹, WANG Xiang^{1,2}, ZOU Xiao-ge^{1,2}

(1. National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China; 2. College of Environment Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: Effects of harmful algal bloom (HAB) on bio-optical properties of coastal waters were studied. Bio-optical data were collected from 11 stations in the Dalian Bay, for an analysis of variable characteristics of biological factors, reflectance and absorption spectra as responses to HAB. The results indicated that, (1) the HAB which occurred in the Dalian Bay was caused by picophytoplankton. (2) Remote sensing reflectance showed an obvious difference with the normal waters; the strong absorption of the high concentration chlorophyll-a led to two reflection dips near 440 and 632 nm bands, a much larger fluorescence peak height around the red band accompanied by a “red shift”, a sharp peak of oxygen response at 760 nm, and an enhanced reflection peak of suspended matter in the near-infrared band. (3) In addition, effects of HAB on absorption coefficient spectrum mainly reflected in the numerical size and much stronger absorption of ocean color constituents than the normal waters had been found, the $a_{ph}(440)$, $a_{ph}(675)$, $a_d(440)$ and $a_g(440)$ increased to 13.4, 14.5, 5.0 and 3.8 times of the values of normal waters, respectively. Variation features of bio-optical elements were examined and identified when HAB occurred in the Dalian Bay, which provides a way to monitor HAB by satellite remote sensing.

Key words: harmful algal bloom; bio-optical properties; remote sensing reflectance; absorption coefficient; Dalian Bay

赤潮是海洋中的某一种或几种浮游生物在一定环境条件下爆发性增殖或聚集致使水体变色的生态异常现象. 近些年, 随着社会经济的发展, 海洋生态系统的破坏、海洋污染及近海富营养化问题的加剧, 全球赤潮发生的范围、频率、面积和危害日益增大, 给海洋水产养殖业、滨海旅游业、人类健康、食品安全带来了极其严重的影响. 赤潮已经成为一大海洋灾害, 引起了各国政府及科学界的高度重视, 对其机制和预测预报的研究刻不容缓^[1,2]. 赤潮发生时, 大量繁殖的浮游生物聚集在海洋表面, 致使水体固有光学特性发生变化, 进而影响水体表观光学特性, 最终造成海水颜色的改变. 遥感技术已广泛应用于赤潮监测, 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], 而其前提和基础性工作是赤

潮生物光学数据的获取以及赤潮水体与正常水体生物光学特性的差异性研究. 本研究根据 2010 年 8 月 16 日赤潮时大连湾海域现场实测数据, 开展了赤潮对近岸水体生物光学特性的影响研究, 以期对赤潮发生机制、赤潮信息提取以及卫星遥感监测提供技术支持.

1 材料与方法

1.1 研究海区

本研究海区位于大连湾海域. 该海湾位于辽东

收稿日期: 2010-11-13; 修订日期: 2010-12-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(40876091); 国家海洋公益性行业科研专项经费项目(201005030); 海洋赤潮灾害立体监测技术与应用国家海洋局重点实验室基金项目(200810)

作者简介: 王林(1981~), 男, 硕士研究生, 研究员, 主要研究方向为海洋光学和水质遥感, E-mail: lwang@nmemc.gov.cn

* 通讯联系人, E-mail: dzzhao@nmemc.gov.cn

半岛南端,渤海海峡出口北侧,总面积 224.13 km²,沿岸分布多个工业和生活排污口,湾内水体质量较差,富营养化严重,为赤潮灾害的高发区.此次调查共布设站位 11 个,其中包括赤潮站位 3 个, HAB (harmful algal bloom) 1~3, 正常水体站位 8 个, NW (normal water) 4~11, 如图 1 所示. 调查于 2010 年 8 月 16 日进行, 分别对海面现场光谱、水色组分吸收系数以及相关生物要素数据进行了测量.

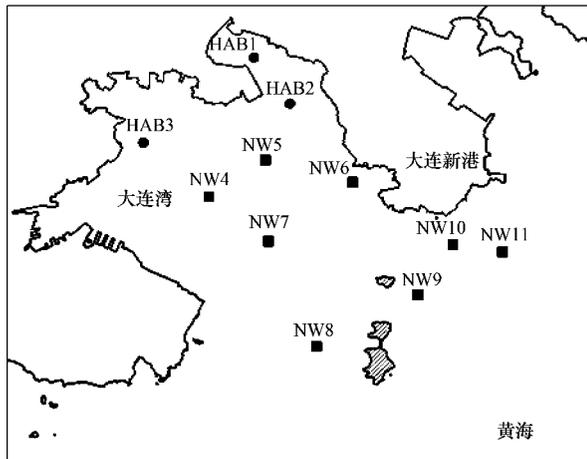


图 1 大连湾海域水体调查站位

Fig. 1 Water investigation stations in the Dalian Bay

1.2 海面现场光谱数据获取

现场光谱测量采用水面之上法, 实验仪器为美国 ASD 公司生产的便携式双通道可见光-近红外光谱辐射计. 仪器观测平面与太阳入射平面的夹角为 135°, 仪器与海面法线方向的夹角为 40°, 以避免绝大部分的太阳直射反射, 并减少船舶阴影的影响. 在每个站位进行 2 次独立的测量. 遥感反射率 R_{rs} 按如下公式计算^[6]:

$$R_{rs} = [L_{sw} - rL_{sky}] \rho_p / L_p \pi$$

式中, L_{sw} 为测量水体的辐亮度; r 为气-水界面对天空漫散射光的反射率, 一般情况可取 0.028, 平静海面时取 0.026^[7]; L_{sky} 为天空漫散射光的辐亮度; ρ_p 为标准板的反射率; L_p 为测量标准板的辐亮度.

1.3 水色组分吸收系数数据获取

颗粒物样品吸收系数采用定量滤膜技术, 样品制备采用直径 25 mm, 孔径 0.7 μm 的 Whatman GF/F 玻璃纤维滤纸. 而有色溶解性有机物 (CDOM) 吸收系数样品制备采用直径 25 mm, 孔径 0.2 μm 的 Whatman 聚碳酸酯滤膜. 样品测量均使用岛津公司生产的 UV-2550 型紫外-可见分光光度计. 测量得到光学密度后, 分别计算可得总颗粒物吸收系数

a_p 、非色素颗粒物吸收系数 a_d 、浮游植物吸收系数 a_{ph} 以及 CDOM 吸收系数 a_g . 样品制备及测量的详细过程可参见 NASA 标准规范^[8].

1.4 生物要素数据获取

浮游植物种类鉴定与细胞计数采用浮游植物计数框在尼康 80FLF-PEDXM1200F 型倒置荧光落射显微镜下进行^[9].

色素测量采用荧光法^[10]. 样品制备采用直径 25 mm, 孔径 0.7 μm 的 Whatman GF/F 玻璃纤维滤纸. 样品测量使用美国 Turner 公司生产的 TD-700 实验室荧光仪. 测定前用 10 mL 的 90% 丙酮萃取样品膜 24 h, 离心分离后取上清液测定荧光强度 (F_b), 再加入 1 滴 10% 的盐酸, 1 min 后测其酸化后荧光强度 (F_a), 通过酸化前后荧光差值和标准 Chl-a 酸化因子计算 Chl-a、脱镁叶绿素浓度. 荧光仪定标采用 Sigma 公司生产的 Chl-a 标准样品.

1.5 荧光高度高度的计算

荧光高度 (fluorescence line height, FLH) 的计算公式如下^[11,12]:

$$FLH = R_{rs,F} - \left[R_{rs,R} + \frac{\lambda_R - \lambda_F}{\lambda_R - \lambda_L} (R_{rs,L} - R_{rs,R}) \right]$$

式中, λ_F 、 λ_L 、 λ_R 分别为荧光峰通道、荧光峰左侧通道以及荧光峰右侧通道, $R_{rs,F}$ 、 $R_{rs,L}$ 、 $R_{rs,R}$ 分别为荧光峰通道、荧光峰左、右两侧通道的遥感反射率. 依据本研究中遥感反射率光谱特征, λ_L 、 λ_R 分别设定为 665、746 nm.

2 赤潮水体生物要素分析

对赤潮站位水体进行细胞密度、色素浓度以及悬浮物浓度测量, 如表 1 所示. 可发现所有赤潮站位水体中的细胞密度均未达到赤潮警戒标准, 但色素测定结果显示各赤潮站位水体叶绿素浓度非常高, 表明已发生赤潮. 究其原因主要在于本研究采用的藻类鉴定方法仅能检测小型和微型浮游藻类, 而不能检测微微型藻类, 但色素浓度测量的是被孔径 0.7 μm 滤纸截留的水体中所有藻类的色素浓度. 综合水体中叶绿素浓度和浮游植物细胞密度观测结果, 可初步推断本次大连湾赤潮由微微型藻类引起.

值得提及的是, HAB3 站位的有机悬浮物浓度为 HAB1、HAB2 的 2 倍以上, 但叶绿素浓度却低于 HAB1、HAB2, 这是因为 HAB3 站位异养型螺旋环沟藻细胞密度异常高, 而异养型藻类不需光合作用获取营养物质, 不含光合色素, 所以 HAB3 站位的有机悬浮物应主要来自螺旋环沟藻的贡献.

表 1 赤潮站位水体生物要素信息汇总

生物要素信息		HAB1	HAB2	HAB3
优势藻细胞密度 $\times 10^4/\text{个}\cdot\text{m}^{-3}$	螺旋环沟藻	4 500	3 200	28 000
	赤潮异湾藻	2 200	2 300	1 600
	其它藻类	591.60	209.09	184.52
叶绿素 a 浓度/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	63.46	52.32	42.86	
脱镁叶绿素浓度/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	6.66	7.99	23.02	
无机悬浮物浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	4.80	2.90	14.40	
有机悬浮物浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	4.20	3.00	8.80	

3 赤潮对水体反射光谱的影响

为了更清楚地观察赤潮水体遥感反射率光谱与正常水体的差别,本研究仅绘制了赤潮水体和正常水体光谱曲线各 2 条,如图 2 所示.从光谱整体形态上看,在蓝光到黄光波段区间,赤潮水体遥感反射率普遍低于正常水体,而橙、红光直到近红外波段则恰恰相反^[13],此外,赤潮水体黄光波段叶绿素反射峰明显窄于正常水体,而红光波段荧光峰则刚好相反,这正是赤潮水体通常呈现红色或近红色的主要原因.

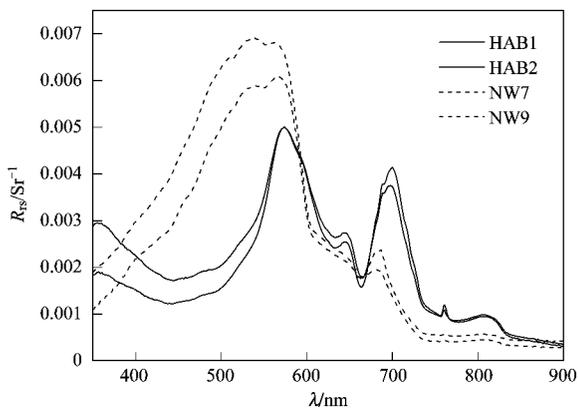


图 2 赤潮水体与正常水体遥感反射率光谱对比

Fig. 2 Compare on remote sensing reflectance spectra between HAB and normal water

3.1 叶绿素反射谷的出现

在蓝光波段(440 nm 附近)赤潮水体遥感反射率光谱出现反射谷,这主要是高浓度叶绿素 a 的强吸收作用导致.此外,叶绿素 a 浓度最高的 HAB1 站位的反射谷低于叶绿素 a 浓度次高的 HAB2 站点,在某种意义上也印证了该反射谷源自叶绿素 a 的影响.而正常水体在蓝光波段未见反射谷,从紫光波段开始一直呈递增趋势直到黄光反射峰位置.同样受高浓度叶绿素 a 强吸收作用影响的还包括 632 nm 波段的反射谷和 645 nm 波段的反射峰.

3.2 荧光峰高度及位置的变化

赤潮水体的荧光峰高度远大于正常水体,并且伴随荧光峰高度的增加,峰值位置存在一个明显的向近红外波段移动的趋势,即叶绿素荧光的“红移现象”^[14-16].

大量研究表明叶绿素 a 浓度与荧光高度 FLH 存在共变关系^[17-20],但由于荧光效率的变化,以及其它因素的影响,FLH 与叶绿素 a 浓度的相关关系并不稳定,具有区域性和局地性的特征.本研究选择线性函数分别对赤潮水体和正常水体进行拟合分析,结果如图 3 所示.可发现正常水体拟合结果较差,决定系数 R^2 仅为 0.13,而赤潮水体拟合结果非常好,决定系数 R^2 达到 1.00.这主要是由于正常水体叶绿素 a 浓度较低,受悬浮泥沙等因素影响相对较强,使得荧光信号相对较弱,数据离散性强,导致拟合结果较差.相反,赤潮水体拟合结果则非常好.

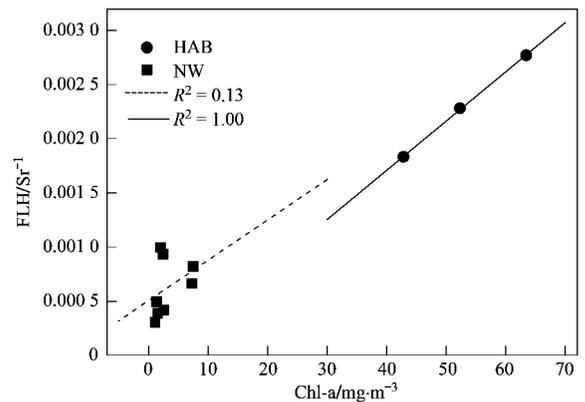


图 3 荧光高度与叶绿素 a 浓度的关系

Fig. 3 Relation between fluorescence line height and chlorophyll a concentration

浮游植物活体细胞中,由于激发能从辅助色素到叶绿素 a 的传递效率几乎达到 100%,所以辅助色素并不发射荧光,荧光主要来自光系统 II (PS II) 的天线叶绿素 a.因此,反射光谱曲线上荧光峰位置由叶绿素 a 的荧光特性决定,荧光峰波段应在 683 nm 处,并不会变化.那么,荧光峰为什么会随叶绿素 a 浓度的增大发生红移呢?原因是随着叶绿素 a 浓度的增大,浮游植物吸收系数在红光波段的吸收峰增高增宽,这促使该波段的遥感反射率反射谷加深加宽,与荧光峰叠加后表现为红移.所以称之为“反射率红移”或许更为贴切.

同样的方法,将荧光峰波段与叶绿素 a 浓度进行线性拟合,结果如图 4 所示.可发现正常水体拟合结果也较差,决定系数 R^2 为 0.26,而赤潮水体拟合

结果较好, 决定系数 R^2 为 0.95. 原因同 FLH 与叶绿素 a 拟合结果分析.

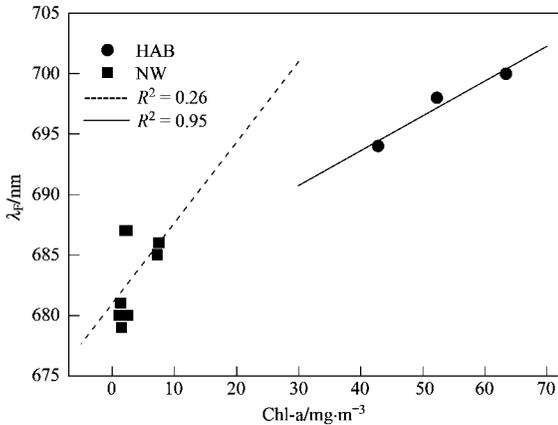


图 4 荧光峰位置与叶绿素 a 浓度的关系

Fig. 4 Relation between fluorescence peak band and chlorophyll a concentration

3.3 氧气响应刺峰的存在

对比发现, 赤潮水体遥感反射率 R_{rs} 光谱在 760 nm 波段存在明显的毛刺峰, 而正常水体并不明显. 760 nm 为氧气的吸收峰波段, 太阳光透过大气层入射到水体中, 入射辐亮度 L_p 在 760 nm 波段存在氧气强吸收作用并形成低谷, L_p 入射到水体后, 由于水体各成分的吸收作用, 导致水体辐亮度 L_w 在 760 nm 波段的反射谷变得更低, 去除天空光影响后, 得到离水辐亮度 L_w , 760 nm 波段仍表现为反射谷. 当计算 R_{rs} 时, L_w 与 $L_p \times \pi$ 做除后, R_{rs} 在 760 nm 波段处表现为响应刺峰. 本研究发现红光、近红外波段 L_w 的高低变化对 R_{rs} 光谱谱形影响很大, 其直接控制 R_{rs} 光谱在 760 nm 波段“峰”或“谷”的形成(当 L_w 由大到小变化时, R_{rs} 光谱在 760 nm 波段的氧气响应刺峰会逐渐变弱、变平滑、最后变成“刺谷”), 而 L_p 的高低变化对该波段峰或谷的形成影响很小. 赤潮水体红光、近红外波段 L_w 的增大恰恰促成了 760 nm 波段的氧气响应刺峰. 而正常水体红光、近红外波段 L_w 较低, 所以氧气响应刺峰并不明显.

3.4 悬浮物近红外反射峰的增强

赤潮水体遥感反射率光谱在 810 nm 波段处出现又一微弱的反射峰, 而正常水体并不明显. 近红外波段悬浮物吸收几乎为 0, 因此该反射峰主要由悬浮物散射引起^[21-23]. 本研究中赤潮水体有机或无机悬浮物浓度都非常高, 致使 810 nm 波段出现反射峰, 而正常水体悬浮物含量普遍较低, 反射峰并不明显.

4 赤潮对水体吸收光谱的影响

4.1 水色组分吸收系数的变化

赤潮发生时, 浮游植物大量繁殖, 水体中浮游植物吸收系数增大, 从图 5 中可发现赤潮水体浮游植物吸收系数光谱远高于正常水体. 而赤潮水体高浓度浮游植物的代谢过程必然产生大量有机碎屑和溶解性有机物, 导致水体中非色素颗粒物和有色溶解性有机物 (CDOM) 吸收系数光谱也普遍高于正常水体 (参见图 6、7). 水色组分特征波段处的吸收系数均值可参见表 2, 计算后发现, 与正常水体相比, 赤潮水体中 $a_{ph}(440)$ 、 $a_{ph}(675)$ 、 $a_d(440)$ 、 $a_g(440)$ 分别增大了 13.4、14.5、5.0、3.8 倍.

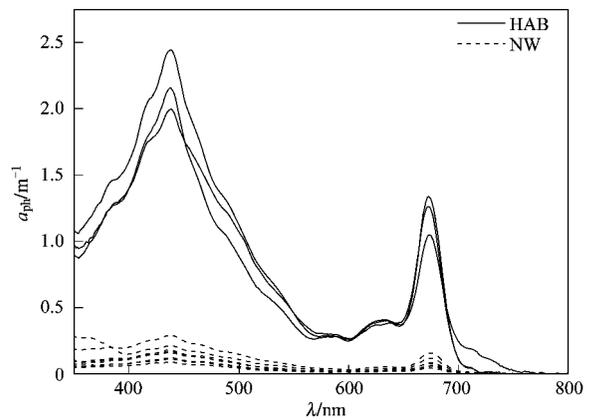


图 5 赤潮水体与正常水体浮游植物吸收系数光谱对比

Fig. 5 Compare on phytoplankton absorption coefficient spectra between HAB and normal water

表 2 赤潮水体与正常水体水色组分特征波段吸收系数均值的比较

Table 2 Mean values of absorption coefficient of ocean color constituents on characteristic bands on HAB and normal water

类型	$a_{ph}(440)$	$a_{ph}(675)$	$a_d(440)$	$a_g(440)$
赤潮水体	2.183 36	1.197 63	0.587 71	0.592 96
正常水体	0.163 34	0.082 85	0.117 24	0.154 42

4.2 赤潮水体藻类代谢对 CDOM 的影响

一般认为, 浮游藻类细胞死亡后, 叶绿素随即游离出来, 游离叶绿素很不稳定, 对光、热较敏感, 在酸性条件下叶绿素分子卟啉环中央的镁离子被 2 个氢离子置换转化成脱镁叶绿素, 它表征了水体中无生命状态的叶绿素含量, 也可指示浮游藻类的生理阶段. 赤潮水体含有高浓度的浮游藻类, 在其衰亡过程中, 必然产生大量的有机碎屑和溶解性有机物. 本研究将脱镁叶绿素浓度与 CDOM 吸收系数进行线性拟合分析, 如图 8 所示, 可发现两者存在较好的正相关关系, 这恰恰说明了研究水体中 CDOM 主要是浮

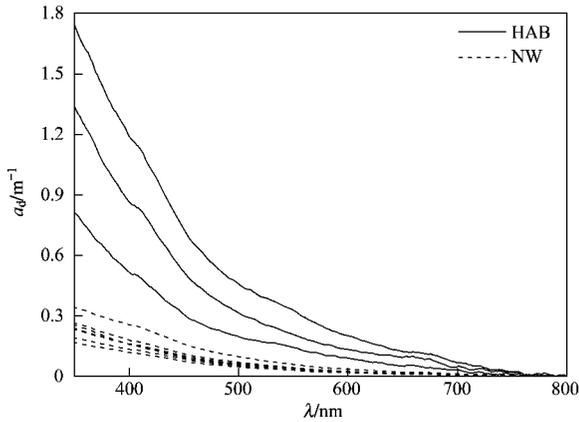


图6 赤潮水体与正常水体非色素颗粒物吸收系数光谱对比
Fig. 6 Compare on de-pigmented particulate absorption coefficient spectra between HAB and normal water

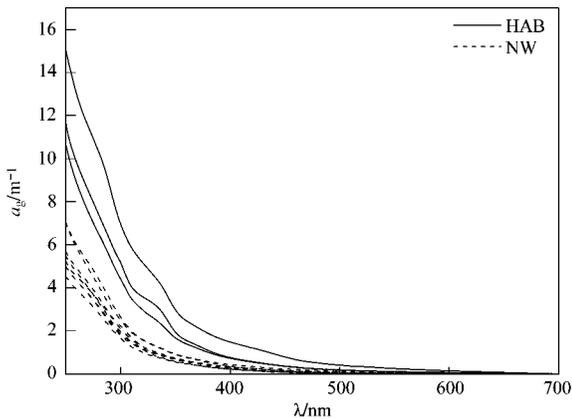


图7 赤潮水体与正常水体 CDOM 吸收系数光谱对比
Fig. 7 Compare on CDOM absorption coefficient spectra between HAB and normal water

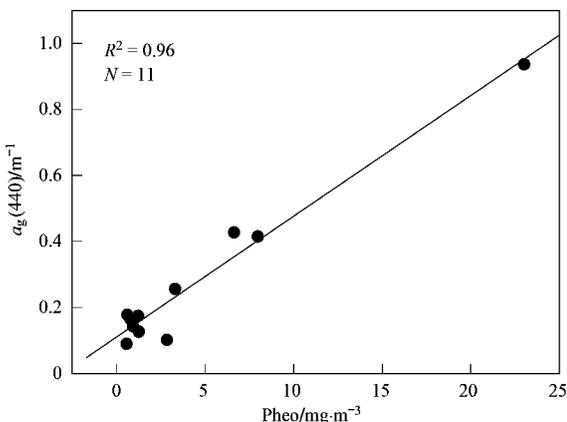


图8 $a_g(440)$ 与脱镁叶绿素浓度的关系

Fig. 8 Relation between $a_g(440)$ and pheophytin concentration

游藻类的代谢产物,水体中藻类衰亡数量越大,生成的脱镁叶绿素浓度相应越高,同时也产生较多的

CDOM. 与正常水体相比,赤潮水体含有较多的脱镁叶绿素,导致浮游植物吸收特性发生变化,加之高含量的 CDOM,势必给水体生物光学信息的识别带来重要影响. 因此,研究赤潮对水体光学特性的影响具有重要意义.

5 结论

(1) 根据大连湾海域赤潮发生时水体调查实测数据,本研究分析了赤潮对近岸水体生物光学特性的影响. 通过生物要素测量,确定该次赤潮应为微型藻类引起,但由于实验条件所限,未能确定藻种类别.

(2) 赤潮发生对水体遥感反射率光谱影响明显,与正常水体相比:①由于高浓度叶绿素 a 的强吸收作用,导致 440、632 nm 出现反射谷,645 nm 出现反射峰;②叶绿素荧光峰高度远大于正常水体,且存在“红移现象”,研究表明随着叶绿素 a 浓度的增大,浮游植物吸收系数在红光波段的吸收峰增高增宽,这促使红光波段的遥感反射率反射谷加深加宽,与荧光峰叠加后表现为红移;③760 nm 波段存在氧气响应刺峰,这与赤潮水体红光、近红外波段 L_w 的增大有关;④在近红外波段,赤潮水体高浓度悬浮物的散射作用,使遥感反射率光谱在 810 nm 波段出现反射峰.

(3) 赤潮对水体吸收系数光谱的影响主要体现在数值大小上,对比发现各水色组分的吸收系数远大于正常水体,特征波段处 $a_{ph}(440)$ 、 $a_{ph}(675)$ 、 $a_g(440)$ 、 $a_g(440)$ 分别增大了 13.4、14.5、5.0、3.8 倍. 此外,本研究还发现脱镁叶绿素浓度与 CDOM 存在较好的正相关关系,说明研究水体中 CDOM 主要是浮游藻类的代谢产物,水体中藻类衰亡数量越大,生成的脱镁叶绿素浓度相应越高,同时也产生较多的 CDOM.

参考文献:

- [1] Cracknell A P, Newcombe S K, Black A F, *et al.* The ABDMAP (algal bloom detection, monitoring and prediction) concerted action[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, **22** (2-3): 205-247.
- [2] 丘仲锋, 席红艳, 何宜军, 等. 东海赤潮高发区半分析算法色素浓度反演[J]. *环境科学*, 2006, **27**(8): 1516-1521.
- [3] Cullen J J, Ciott A M I, Davis R F, *et al.* Optical detection and assessment of algal blooms [J]. *Limnology and Oceanography*, 1997, **42**(5): 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 M, Grzymiski J, Bissett W P, *et al.* Optical monitoring and forecasting systems for harmful algal blooms: Possibility or pipe dream [J]. *Journal of Phycology*, 1999, **35** (6): 1477-1496.
- [6] NASA/TM—2003-211621/Rev4 Ocean Optics Protocols for Satellite Ocean Color Sensor Validation Above-water radiance and remote sensing reflectance measurement and analysis protocols [S].
- [7] Mobley C D. Estimation of the remote-sensing reflectance from above-surface measurements [J]. *Applied Optics*, 1999, **38** (36): 7442-7455.
- [8] NASA/TM—2000-209966/Rev2 Ocean Optics Protocols For Satellite Ocean Color Sensor Validation Determination of spectral absorption coefficients of particles, dissolved material and phytoplankton for discrete water samples [S].
- [9] GB/T 12763.6-2007, 海洋调查规范, 海洋生物调查 [S].
- [10] NASA/TM—2002-210004/Rev3 Ocean Optics Protocols for Satellite Ocean Color Sensor Validation Fluorometric chlorophyll a: Sampling, laboratory methods, and data analysis protocols [S].
- [11] 邢小罡, 赵冬至, 刘玉光, 等. 叶绿素 a 荧光遥感研究进展 [J]. *遥感学报*, 2007, **11**(1): 137-144.
- [12] 赵冬至, 张丰收, 杜飞, 等. 不同藻类水体太阳激发的叶绿素荧光(SICF)峰特性研究 [J]. *遥感学报*, 2005, **9**(3): 265-270.
- [13] 陈立娣, 黄韦良, 陆嘉, 等. 利用海上测量光谱进行赤潮监测 [J]. *自然灾害学报*, 2007, **16**(2): 60-63.
- [14] Gitelson A A. Algorithms for remote sensing of phytoplankton pigments in inland waters [J]. *Advances In Space Research*, 1993, **13**(5): 197-201.
- [15] Gitelson A A. The peak near 700nm on radiance spectra of algae and water: Relationships of its magnitude and position with chlorophyll concentration [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1992, **13**(17): 3367-3373.
- [16] 赵冬至. 渤海赤潮灾害监测与评估研究文集 [M]. 北京: 海洋出版社, 2000. 109-116.
- [17] Gower J F R. Observation of in situ fluorescence of chlorophyll-a in Saanich inlet [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1980, **18** (3): 235-245.
- [18] Gower J F R, Doerffer R, Borstad G A. Interpretation of the 685 nm peak in water-leaving radiance spectra in terms of fluorescence, absorption and scattering, and its observation by MERIS [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1999, **20** (9): 1771-1786.
- [19] 赵冬至, 张丰收, 杜飞, 等. 基于高光谱反射率的藻类水体基线荧光峰高度与叶绿素 a 浓度关系研究 [J]. *高技术通讯*, 2004, **14**(5): 68-72.
- [20] 赵冬至, 杜飞, 赵玲, 等. 基于表面反射率的赤潮卫星荧光高度算法比较 [J]. *高技术通讯*, 2004, **14**(11): 93-97.
- [21] 周冠华, 杨一鹏, 陈军, 等. 基于叶绿素荧光峰特征的浑浊水体悬浮物浓度遥感反演 [J]. *湖泊科学*, 2009, **21**(2): 272-279.
- [22] 刘志国, 周云轩, 沈芳. 河口水体泥沙浓度的水面光谱统计模式分析 [J]. *水利学报*, 2007, **38**(7): 799-805.
- [23] 刘大召, 张辰光, 付东洋, 等. 基于高光谱数据的珠江口表层水体悬浮泥沙遥感反演模式 [J]. *海洋科学*, 2010, **34** (7): 77-80.