

水库水体近红外反射峰与叶绿素含量之间的关系初探*

杨 敏, 商少凌**, 汪文琦, 林 供, 王郝京

(厦门大学近海海洋环境科学国家重点实验室, 厦门 361005)

摘 要: 2007年8月至2008年9月,对厦门两个淡水水体(芙蓉湖、厦大水库)的叶绿素浓度和遥感反射率(R_{rs})进行了连续观测.在叶绿素浓度6–322mg/m³的范围, R_{rs} 光谱出现显著的近红外反射峰,中心位置在700–710nm之间,较之通常的荧光峰中心(683nm)向长波方向偏离.该峰在厦大水库始终出现在700nm,但在芙蓉湖存在时间变化,随着叶绿素浓度的增加,由705nm红移到710nm.由此,仿MODIS荧光高度(FLH)的定义,定义该峰的高度(简称为REH),对于水库和芙蓉湖中心波段分别确定为700和710nm.REH与叶绿素浓度呈现显著相关,芙蓉湖 $REH=0.0161g(chl)-7.8\times 10^{-6}(R^2=0.79, n=41)$,水库 $REH=0.0001chl+0.0002(R^2=0.74, n=32)$.可见对于高散射的淡水藻华水体,可以并且需要通过改进FLH的波段选择,基于更长波段处的近红外峰的高度探测叶绿素浓度.

关键词: 近红外反射峰; 叶绿素; 遥感反射率; 淡水

The NIR peak of the reflectance spectrum associated with chlorophyll in the pool waters: preliminary results

YANG Min, SHANG Shaoling, WANG Wenqi, LIN Gong & WANG Haojing

(State Key Laboratory of Marine Environmental Science, Xiamen University, Xiamen 361005, P.R. China)

Abstract: Remote sensing reflectance (R_{rs}) and concurrent chlorophyll-a (Chl) concentration were measured from August 2007 to September 2008 in two pools (Furong Pool and XMU Reservoir) in Xiamen, Fujian. During most of the time, the measured R_{rs} spectra for Chl ranging between 6 to 322mg/m³ show a prominent secondary peak in the far-red region of the spectrum. This is not from fluorescence alone, but appears to be caused by the red edge. Following the estimation of MODIS Fluorescence line height (FLH), we defined a red edge height (REH) during 705 and 710nm. It was found that REH was highly correlated with Chl. The relation functions are $REH=0.0161g(chl)-7.8\times 10^{-6}(R^2=0.79, n=41)$ in the Furong Pool, and $REH=0.0001chl+0.0002(R^2=0.74, n=32)$ in the XMU Reservoir. Our results suggest that the red edge may provide a good tool for researching and management in order to study and monitor the algal blooms in waters where there are dense suspensions of algal cells.

Keywords: Red edge height; chlorophyll; remote sensing reflectance; inland waters

早在20世纪70年代开始,人们通过现场及航空遥感观测,发现阳光激发的自然荧光与叶绿素浓度呈良好的线性相关关系^[1].基于此原理,MODIS设置了3个波段(665.1nm, 676.7nm, 746.3nm),第一个卫星遥感荧光高度产品由此得以问世(MODIS algorithm theoretical basis document)^[2],人们希望通过该产品实现蓝绿比值法失效状况下的叶绿素反演^[3].该3个波段中的中心波段为荧光峰的极大值,其余2个波段位于荧光峰左右两侧,将其遥感反射率的连线设为基线,计算荧光峰的遥感反射率与基线之间的距离,即称为荧光高度(FLH, Fluorescence Line Height).

自MODIS FLH产品发布以来,有关的报道包括与航空荧光的比较、与SeaWiFS叶绿素的比较,以及应用之在受到河流输入影响的水体中辨识浮游植物水华^[4-6].最近的一个探测佛罗里达西南海岸赤潮爆

* 国家863计划项目(2006AA09A302, 2008AA09Z108)和国家自然科学基金项目(40521003)联合资助. 2008-10-31 收稿; 2008-12-04 收修改稿. 杨敏,女,1982年生,硕士研究生; E-mail: yangm-1208@yahoo.com.cn.

** 通讯作者; E-mail: slshang@xmu.edu.cn.

发全过程的应用实例, 是较为成功的^[7]; 作者同步采集水样, 得到实测叶绿素与 FLH 之间的函数关系, 对于叶绿素 $0.4\text{--}4\text{mg/m}^3$ 的浓度范围, 77 组数据, 相关系数 $R^2=0.92$; 与之形成对比的是, 蓝绿波段比值法反演的 MODIS 及 SeaWiFS 叶绿素浓度, 在这一复杂水体中甚至不能反映正确的时空分布形态, 遑论浓度值 (时而高估(3-15 倍之巨)时而低估). Cannizzaro 等利用 MODIS FLH 产品推导叶绿素浓度, 监测墨西哥湾有害鞭毛藻 *Karenia brevis* 的发生, 认为对于叶绿素浓度 $>100\text{mg/m}^3$ 的水华, FLH 可能是监测 *K. brevis* 的重要手段^[8].

然而, FLH 的适用范围可能是值得探讨的. Ahn & Shanmugam 在韩国及其周边海域观测到, 当叶绿素浓度在 $0.1\text{--}82\text{mg/m}^3$ 之间时, 采用 688nm 作为荧光峰的中心波段, FLH 与现场叶绿素浓度之间的指数相关性可达 0.88 以上; 但当叶绿素浓度大于 82mg/m^3 , 荧光峰在 688nm 的信号不再变化, 作者认为原因在于细胞的荧光再吸收^[9]. 更重要的是, 人们已经注意到, 随着叶绿素浓度的增加, 水体光谱曲线发生变化, 本应在 683nm 处出现的荧光峰似乎发生了红移现象. Gitelson 对内陆水体 700nm 附近的光谱反射峰进行了多年研究, 得出此峰值位置和相应的叶绿素浓度相关关系的回归公式, 并发现当叶绿素浓度高达 100mg/m^3 时, 此反射峰在 700nm 处; 叶绿素达到 300mg/m^3 时, 此反射峰可达 705nm 甚至更远^[10-11]. 赵冬至和从丕福等对数种赤潮藻类的光谱观测结果, 多数反射峰出现在 700nm 附近^[12-13]. Dierssen 等测得的鞭毛藻 *L. polyedra* 赤潮光谱, 在 710nm 附近出现反射峰. 实际上, 陆生植物以及滨海浅水的的海草, 总是在近红外 ($700\text{--}1600\text{nm}$) 出现反射峰, 这是由于植物细胞吸收可见光但不吸收近红外光、而同时对可见到近红外的光都发生散射的结果, 陆地遥感界称之为红边 (red edge), 这也是构建植被指数算法 (NDVI) 的基础^[14-15]. 海洋浮游植物由于悬浮在水中, 通常密度不大, 在近红外以水的吸收为主. 该波段范围内出现的反射峰, 通常是荧光发射导致; 当藻类密度增大到一定程度, 水被阻挡不能有效吸收近红外的能量时, 就出现了红边信号, 而并非荧光峰的红移^[11,14,16].

故而我们认为, 对于高密度的藻华水体, 直接应用 MODIS 定义的 FLH 可能是不现实的. 为此, 我们对 2 个淡水水体 (厦门大学芙蓉湖、厦门大学水库) 的叶绿素浓度和遥感反射率 (R_{rs}) 进行了连续观测, 目的在于观察近红外反射峰如何随叶绿素浓度而变化, 是否可能建立类似 FLH 的指标 (index) 用于监测高密度藻华的水体叶绿素含量的变化, 为进一步发展近海赤潮的遥感监测方法提供参考依据.

1 材料与方法

分别于 2007 年 8-9 月、12 月, 2008 年 2-4 月、7-9 月对福建厦门 2 个淡水水体 (以下简称芙蓉湖、水库) 进行连续采样观测 (图 1). 二者均属于封闭型淡水水库, 属于静水, 波浪、湖流等过程基本可以忽略, 无需考虑动力输运, 并且除了降雨外, 几乎无外来输入, 这是本文开展实验的有利条件. 但 2 个水体的周边环境不同, 芙蓉湖是一个人工水库, 周围都是建筑, 受人类活动影响较大; 水库位于厦门大学后山, 周围是大片林木.

在研究区内测量水面光谱反射率并采集表层水样. 光谱测量使用的仪器为 GER-1500 型便携式地物光谱仪, 工作波长范围为 $300\text{--}1100\text{nm}$, 有 512 个波段, 波段宽度约为 1.6nm . 采集时间为 $10:00\text{--}14:00$ 左右, 天气晴朗无风, 湖面基本平静. 水体反射光谱测量在距离水面约 1m 处进行, 测量方向基本垂直于水面, 仪器观测平面和太阳入射角平面的夹角大约是 135° , 仪器与水面法线的夹角大约是 45° , 尽量避免太阳直射反射和周围测定人员阴影的影响^[17]. 分别对水体、白板、天空进行测量, 而后计算遥感反射率 (R_{rs}), 具体计算公式如下:

$$L_w = L_u - rL_{sky} \quad (1)$$

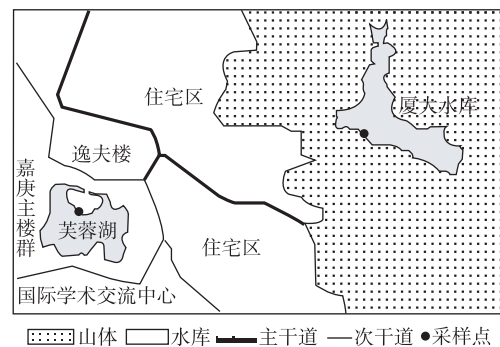


图 1 实验区域采样点

Fig.1 Location of most of sample points

$$R_{rs} = \frac{L_w}{E_d} = \rho \frac{L_u - rL_{sky}}{\pi L_{plaque}} \quad (2)$$

其中, L_w 为离水辐射率, L_u 为水面辐射率, L_{sky} 为天空辐射率, L_{plaque} 为漫反射板辐射率, E_d 为海面入射辐照度, $\rho=25\%$ (25%反射率漫反射板), r 为海表反射率, 取值 0.028^[18-19].

水样的采集及测定严格按照 NASA 发布的操作规程进行^[20], 过滤采用 Whatman 公司出产的 GF/F 25mm 滤膜, 滤膜样品放入液氮保存, 之后用于测定叶绿素. 测定时采用的是荧光酸化法(GB-17378), 用美国 Sigma 公司的叶绿素 a 标准定标, 用 90% 的丙酮萃取, 低温避光萃取 24h 后, 再使用岛津 RF-5301PCS 荧光分光光度计测定^①.

另外, 采集部分水样, 用于藻种鉴定. 样品采用鲁哥试剂固定, 由厦门大学生命科学院高亚辉教授研究组鉴定.

2 结果与讨论

2.1 遥感反射率特征

图2所示为观测期间所有遥感反射率的记录. 很显然, 水库与芙蓉湖的反射光谱特征不同. 首先, 可见光区的反射峰, 对于水库, 中心波段在580nm左右, 对于芙蓉湖, 则位于555nm左右. 且该反射峰随时间

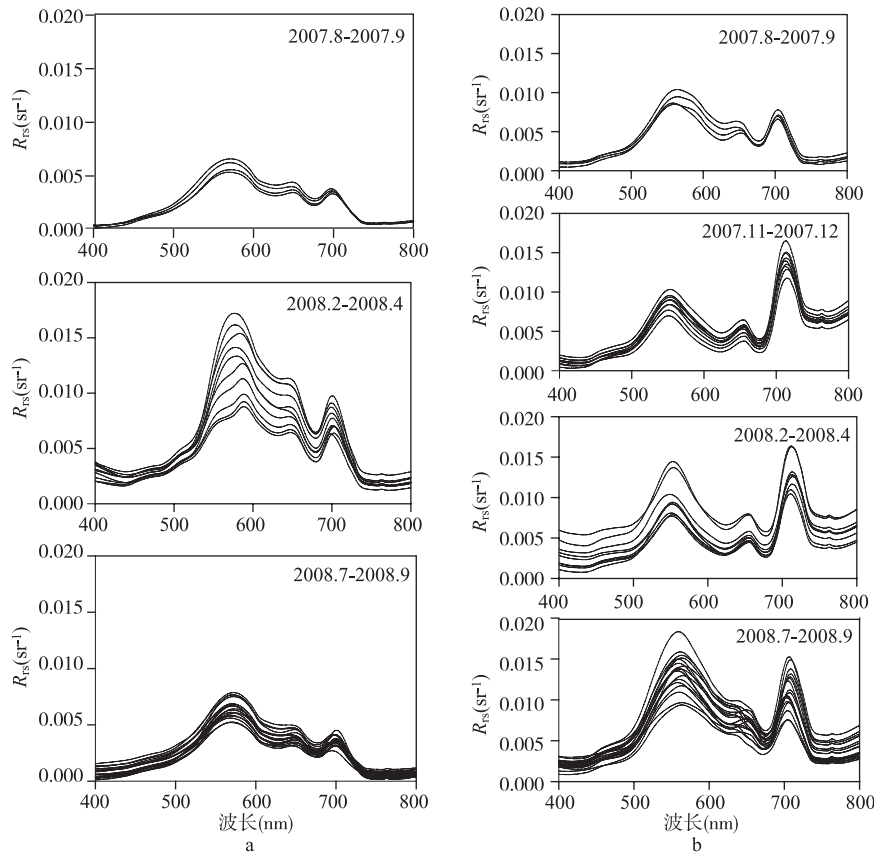


图2 遥感反射率光谱: 水库(a); 芙蓉湖(b)

Fig.2 The R_{rs} spectrum measured in the XMU Reservoir (a) and the Furong pool (b)

① GB-17378, 海洋调查规范, 1998.

发生变化. 对于水库, 夏、秋季(2007、2008年7-9月)最高值在577nm, 波形相对平缓, 冬春季(2008年2-4月)向长波方向移动至593nm处, 且峰宽变窄, 形成明显的尖锐小峰, 峰高增大. 与水库相反, 芙蓉湖在夏秋季, 中心波段位于560nm, 冬春季向短波方向移动至550nm, 峰高降低. 导致这些变化的原因, 很可能在于色素组成以及颗粒碎屑含量的变化.

重要的是, 近红外的反射峰特征, 在2个水体之间也存在差异. 对于水库, 在整个观测期间反射峰均位于700nm附近, 仅只峰高有所变化. 夏、秋季峰高中心处 R_{rs} 值小于 $0.005sr^{-1}$, 叶绿素浓度在 $9-27mg/m^3$ 之间. 春季最高峰值可达 $0.015sr^{-1}$, 叶绿素浓度范围为 $22-40mg/m^3$. 这本身是个值得注意的现象, 叶绿素浓度只有 $6-40mg/m^3$, 近红外峰却已经红移到700nm; Gitelson 观察到内陆水体700nm的反射峰时, 叶绿素浓度已经高达 $100mg/m^3$; Ahn & Shanmugam 等在韩国近海的观测结果, 叶绿素浓度高达 $82mg/m^3$ 时, 仍然可以观察到688nm的荧光峰^[9,11].

对于芙蓉湖, 该反射峰十分显著, 甚至超过可见光区的反射峰峰高, 位置则随着叶绿素浓度的变化而变化. 波长移动范围是10nm, 当叶绿素浓度在 $11-48mg/m^3$ 之间, 反射峰中心在705nm处; 当叶绿素浓度在 $64-151mg/m^3$ 之间, 反射峰向长波方向移动到710nm左右; 当叶绿素浓度达到 $215-322mg/m^3$ 的极高浓度, 反射峰继续红移到715nm附近. 前三者基本是春、夏、秋季的状况, 715nm的最高峰, 出现在冬季.

2.2 红边高度的定义及其与叶绿素的相关关系

由以上观测结果可知, 如果按照 MODIS 的定义, 以676.7nm为中心计算 FLH, 对于我们所观测的出现“红边”的高密度藻华水体, 是不可能奏效的. 故此, 我们仿 MODIS 荧光高度, 定义红边高度. 同样选取3个波段, 中心波段为近红外反射峰的极大值, 其余2个波段位于该峰的左右两侧, 将其遥感反射率的连线设为基线, 计算反射峰通道的遥感反射率与基线之间的距离, 暂且称为红边高度(Red edge height, 简称为 REH)见图3.

REH计算公式如下:

$$REH = R_t - \left[\left(\frac{R_1 - R_s}{\lambda_1 - \lambda_s} (\lambda_t - \lambda_s) \right) + R_s \right] \quad (3)$$

其中 R_t 为 REH 中心波段的 R_{rs} 值, R_1 和 R_s 分别代表长波和短波段的 R_{rs} 值.

根据以上实测遥感反射率结果(图2), 首先对2个水体分别确定3个波段的位置. 芙蓉湖为678、710和750nm, 水库分别为678、700和741nm. 由此计算得到 REH.

由图4可见, 两水体的 REH 与叶绿素浓度之间呈现显著的相关关系. 芙蓉湖41组数据拟合结果:

$$REH = 0.016 \lg(chl) - 7.8 \times 10^{-6} (R^2 = 0.79, n = 41) \quad (4)$$

水库的32组数据拟合结果:

$$REH = 0.0001chl + 0.0002 (R^2 = 0.74, n = 32) \quad (5)$$

显然, 2个水体出现不同的 REH-Chl 函数关系, 芙蓉湖的 REH 与叶绿素浓度之间, 呈现非线性关系, 而水库则呈现线性关系. 从产生红边的原理看, REH 与叶绿素的函数关系, 应主要取决于藻的种类, 尤其是藻类颗粒大小所决定的散射性质有关. 根据藻类鉴定结果, 2个水体以蓝藻为主, 绿藻、硅藻其次(表1). 水库在采样期间, 主要以蓝藻门的广州平裂藻 *Merismopedia cantonensis* 为主, 个体相对较小; 其他藻种合计有20到21个, 藻类丰富. 芙蓉湖藻种种类相对水库数量少, 共十余个, 但藻种细胞数量多, 且优势藻种一直在变化; 2007年8月底, 以绿藻门的原顶栅藻 *Scenedesmus incrassatulus* 为主; 2007年9月中旬, 则变为蓝藻门的广州平裂藻 *Merismopedia cantonensis* 为优势藻种, 细胞数量达最高; 2008

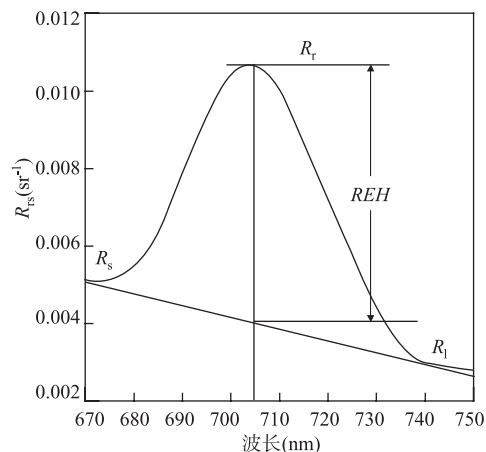


图3 红边高度示意图

Fig.3 Schematic diagram of the red edge height

年10月中旬以蓝藻门山地隐球藻 *Aphanocapsa montana* 为主。

其次, 我们尝试以叶绿素浓度为基准, 不区分水体选择3个波段. 首先试验叶绿素浓度小于 $50\text{mg}/\text{m}^3$ 的区间, 发现2个水体的近红外峰位置并不一致, 水库红峰中心波段在 700nm 左右, 芙蓉湖红峰却处于 705nm 左右, 即使在 $700\text{--}705\text{nm}$ 间逐一选择波段计算, 相关系数 R^2 只有 0.45 左右, 缺乏统计的显著性.

表1 厦大水库和芙蓉湖不同时期藻类的种类组成

Tab.1 The algal species composition during different period in the XMU Reservoir and Furong pool

地点	采样时间	种数	最优势藻种及其细胞数量(cells/L)
水库	2007-08-29	20	广州平裂藻 2.1×10^6
	2007-09-13	20	广州平裂藻 4.2×10^6
	2008-10-18	21	广州平裂藻 4.5×10^6
芙蓉湖	2007-08-27	11	原顶栅藻 7.2×10^6
	2007-09-13	14	广州平裂藻 7.0×10^7
	2008-10-18	16	山地隐球藻 5.4×10^7

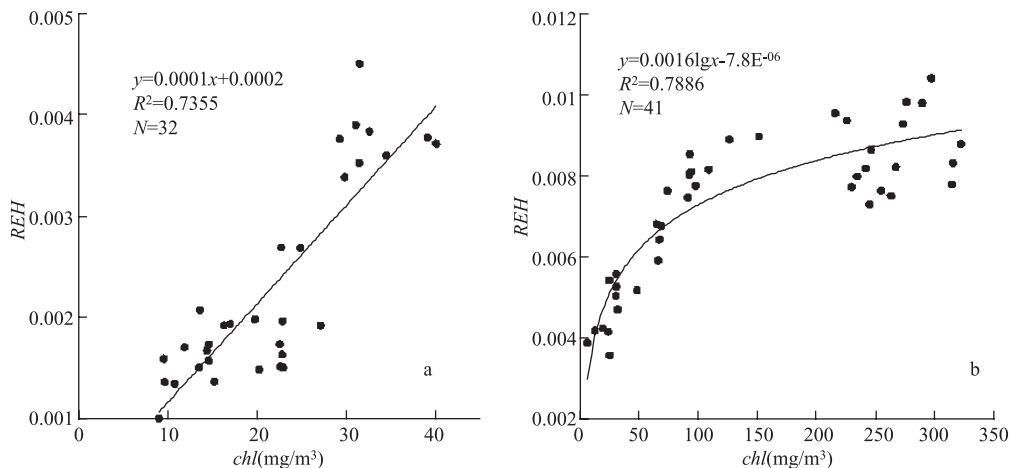


图4 REH 与叶绿素的关系: 水库(a); 芙蓉湖(b)

Fig.4 The relationship between chlorophyll concentration and REH of the XMU Reservoir(a) and Furong pool(b)

3 结论

本研究对2个淡水水体的观测结果, 在叶绿素浓度 $6\text{--}322\text{mg}/\text{m}^3$ 的范围, 出现显著的远离 683nm 荧光峰的近红外反射峰; 对于厦大水库, 其中心波长在 700nm , 对于芙蓉湖, 在 $705\text{--}710\text{nm}$ 左右.

仿 MODIS 荧光高度定义了红边高度 REH , 对 REH 与叶绿素含量之间进行相关统计, 二者呈现显著相关. 芙蓉湖 REH 与叶绿素浓度之间呈对数相关 ($R^2=0.79$); 水库则呈线性相关 ($R^2=0.74$). 故此我们认为, 对本研究调查的这一类藻华淡水水体, 可以并且需要通过改进 FLH 的波段选择, 基于红边高度探测叶绿素浓度.

由于受天气条件的限制, 采样频率不够均衡, 数据有限, 因而无法了解 REH 的时间变化. 另一方面, 研究结果是否适用于其他类型的水体, 尤其是近海赤潮, 还远不能回答. 很显然, 进一步的覆盖更多尺度的研究是必要的.

致谢: 感谢本实验室研究生杜翠芬、魏国妹同学协助测量叶绿素样品, 谨此一并致谢.

4 参考文献

- [1] Neville RA, Gower JFR. Passive remote sensing of phytoplankton via chlorophyll alpha fluorescence. *Journal of Geophysical Research*, 1977, **82**: 3487-3493.
- [2] Abbott MR, Letelier RM. Algorithm theoretical basis document Chlorophyll Fluorescence (MODIS Product Number 20). NASA, 2003.
- [3] O'Reilly JE, Maritorena S, Siegel DA *et al.* Ocean color chlorophyll a algorithms for SeaWiFS, OC2, and OC4: Version 4. In: Hooker B, Firestone R eds. SeaWiFS Post launch Tech. Report Series. NASA Technical Memorandum 2000-206892. NASA Goddard Space Flight Center, 2000: 9-27.
- [4] Hoge FE, Lyon PE, Swift RN *et al.* Validation of Terra-MODIS phytoplankton Chlorophyll Fluorescence Line Height. I. Initial Airborne Lidar Results. *Applied Optics*, 2003, **42**: 2767-2771.
- [5] Gower JFR, Borstad GA. On the potential of MODIS and MERIS for imaging chlorophyll fluorescence from space. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, **25**: 1459-1464.
- [6] Hu CM, Chen ZQ, Clayton TD *et al.* Assessment of estuarine water-quality indicators using MODIS medium-resolution bands: Initial results from Tampa Bay, FL. *Remote Sensing of Environment*, 2004, **93**(3): 423-441.
- [7] Hu CM, Muller-Karger FE, Taylor C *et al.* Red tide detection and tracing using MODIS fluorescence data: A regional example in SW Florida coastal waters. *Remote Sensing of Environment*, 2005, **97**(3): 311-321.
- [8] Cannizzaro JP, Cardera KL, Chen FR *et al.* A novel technique for detection of the toxic dinoflagellate, *Karenia brevis*, in the Gulf of Mexico from remotely sensed ocean color data. *Continental Shelf Research*, 2008, **28**: 137-158.
- [9] Ahn YH, Shanmugam P. Derivation and analysis of the fluorescence algorithms to estimate phytoplankton pigment concentrations in optically complex coastal waters. *Pure and Applied Optics*, 2007, **9**: 352-362.
- [10] Gitelson AA. Algorithms for remote sensing of phytoplankton pigments in inland waters. *Adv Space Res*, 1993, **13**: 197-201.
- [11] Gitelson AA. The peak near 700nm on reflectance spectra of algae and water: relationships of its magnitude and position with Chlorophyll Concentration. *International Journal of Remote Sensing*, 1992, **13**: 3367-3373.
- [12] 赵冬至, 丛丕福. 渤海叉角藻赤潮的光谱特征研究. 渤海赤潮灾害监测与评估研究文集. 北京: 海洋出版社, 2000: 109-116.
- [13] 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. 遥感学报, 2005, **9**: 265-270.
- [14] Dierssen HM, Kudela RM, Ryan JP *et al.* Red and black tides: Quantitative analysis of water-leaving radiance and perceived color for phytoplankton, colored dissolved organic matter, and suspended sediments. *Limnol & Oceanogr*, 2006, **51**: 2646-2659.
- [15] Hall FG. Adaptation of NASA remote sensing technology for regional-level analysis of forested ecosystems. In: Sample VA ed. Remote sensing and GIS in ecosystem management. *Island Press*, 1994, **72**: 628-640.
- [16] Vasilkov A, Kopelevich O. Reasons for the appearance of the maximum near 700nm in the radiance spectrum emitted by the ocean layer. *Oceanology*, 1982, **22**: 697-701.
- [17] 唐军武, 田国良, 汪小勇等. 水体光谱测量与分析 I: 水面以上测量法. 遥感学报, 2004, **8**(1): 37-44.
- [18] 李铜基, 唐军武, 陈清莲等. 光谱仪测量离水辐射率的处理方法. 海洋技术, 2000, **19**(3): 11-16.
- [19] 周良明, 刘玉光, 郭佩芳. 渤海和北黄海水色光谱的特征分析. 海洋通报, 2005, **24**(2): 13-19.
- [20] Mitchell BG, BriCaud A, Carder K *et al.* Determination of spectral absorption coefficients of particles, dissolved material and phytoplankton for discrete water samples. In: Fargion GS, Mueller JL, McClain CR eds. Ocean Optics Protocols For Satellite Ocean Color Sensor Validation, Revision 2. NASA Technical Memorandum 2000-209966, 2000: 125-153.