

文章编号: 0253-2239(2008)01-0007-05

基于生物光学算法的海洋赤潮监测

马 泳 林 宏 艾 青 梁 梦 凡

(华中科技大学电子与信息工程系武汉光电国家实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要 机载海洋激光雷达具有高效搜索的能力, 已成为海洋环境监测的重要手段。以机载蓝绿激光雷达监测海洋赤潮为研究应用背景, 通过检测海洋中叶绿素的质量浓度来实现对海洋赤潮消长信息的获取。在分析海水固有光学性质的基础上, 基于生物光学算法, 构建了机载蓝绿激光雷达后向散射信号检测的叶绿素质量浓度监测模型。仿真计算证明该模型能够有效探测出叶绿素质量浓度的大小, 为机载海洋赤潮监测增加了一种方法。

关键词 海洋光学; 海洋监测; 生物光学算法; 激光雷达; 赤潮

中图分类号 TN958.98 **文献标识码** A

Red Tide Monitoring Based on Bio-Optical Algorithm

Ma Yong Lin Hong Ai Qing Liang Mengfan

(Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Department of Information and Electronic Engineering,
Hua Zhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract With high efficiency and high detection precision, the airborne lidar has become an important means to monitor marine environment. Based on the research background of monitoring red tide by airborne blue lidar, a new method of achieving the growth information of red tide alga is proposed, by detecting the concentration of chlorophyll. By this concept, based on analysis of the optical properties of several important ocean objects and bio-optical algorithm, a model is proposed based on airborne lidar detecting backward scattering signals. Simulation proves that the method can monitor the concentration of chlorophyll effectively. It provides a method for red tide detection based on the airborne lidar.

Key words ocean optics; marine monitoring; bio-optical algorithm; lidar; red tide

1 引 言

海洋赤潮目前尚无有效的方法防治, 只能通过监测和预报的手段来减少赤潮造成的损失。传统的赤潮监测方法是基于船载的水质监测和浮标站定点连续自动监测等手段^[1], 需要定点采样、化学分析和人工处理, 存在测量速度慢、效率低等问题, 不能满足快速获得大面积水域水质参量的要求, 严重影响了对灾害预测的反应时间。近年来, 监测赤潮越来越多地利用航空、卫星来进行探测。采用卫星监测, 需要的设备较复杂、花费较高, 由于卫星均基于可见光遥感存在不能全天候、全天时工作和空间分辨率较低等不足, 对小尺度赤潮的监测十分困难^[2]。目前, 机载航空海洋遥感探测等新技术在赤潮监测和

预报领域的应用引起了越来越多的重视。我国从 1986 年起开展赤潮航空巡航监视、应急、跟踪监视工作, 以中国海监飞机(Y-12 型)为航空工作平台, 利用红外光谱区(0.7~0.9 μm)和紫外光谱区(0.3~0.4 μm), 实时探测海水温度及其变化。对赤潮进行监测和预报的基理是基于赤潮海区的温度要高于正常海水温度的特点, 但是温度检测不能直接反映赤潮消长的信息, 预报赤潮具有较大的误差^[3]。海洋中叶绿素的质量浓度是反映赤潮消长信息的重要依据, 目前较多采用机载激光雷达荧光遥感实现对叶绿素质量浓度的反演。由于叶绿素荧光的产生与浮游植物的光合作用及其生理状态有很大的联系, 任何影响光合作用的因素, 如日照、海水中其他

收稿日期: 2006-12-20; 收到修改稿日期: 2007-07-20

基金项目: 国家 863 计划(2006AA09Z142)资助课题。

作者简介: 马 泳(1971—), 男, 湖北人, 副教授, 硕士生导师, 主要从事激光雷达探测和激光通信等方面的研究。

E-mail: mayong@mail.hust.edu.cn

物质对光的吸收和散射,都会造成荧光量的变化。此外,从海面反射出的荧光的各向异性,叶绿素荧光量的大小还随观测角度的不同而不同^[4,5]。本文依据生物光学算法,提出机载蓝绿激光雷达探测海洋叶绿素质量浓度预测赤潮消长过程。该方法可在给定波长的条件下,通过激光回波信号的能量辨识海水中叶绿素质量浓度的信息,海洋中的其他物质对其影响很小,而且几乎不受外界天气因素的影响,使反演叶绿素质量浓度的准确性更高,进而更精确地预测赤潮的消长过程。

2 机载激光雷达监测赤潮原理

所有的藻类浮游植物都包含叶绿素,因此测定水中叶绿素的含量,是对浮游植物的一种定量测量方法。叶绿素的质量浓度与浮游植物细胞密度有较好的相关性,如果是植物性赤潮生物引发的赤潮,在赤潮发生区叶绿素的含量比正常海区高数倍乃至数百倍,故可利用叶绿素质量浓度变化作为判断赤潮消长的一个重要指标。根据实测资料分析,未受污染的外海水域,叶绿素质量浓度低于 $2 \mu\text{g/L}$;如果叶绿素质量浓度从常量上升至 $10 \mu\text{g/L}$ 以上,并有迅速增加的趋势,就可预测赤潮即将发生;当其质量浓度超过 $20 \mu\text{g/L}$ 时水色改变,赤潮已经发生^[6]。

光在水体介质中能量衰减的原因主要有两个^[7],一个是海水及海水中无机盐、溶解的有机物、浮游植物、碎屑对光的吸收;另一个则是海水及海水中无机盐、溶解的有机物、浮游植物、碎屑对光的散射。理论上,机载海洋激光雷达方程的一般表达式为^[8]

$$P_r(R) = P_1 \gamma_b \eta \frac{A}{(H + R/n)^2} \exp\left[-2 \int_0^R \sigma(r) dr\right], \quad (1)$$

式中 $P_r(R)$ 为激光雷达探测器探测到的激光功率, P_1 为激光雷达发射的激光功率, γ_b 为海水后向散射率, n 为海水折射率, η 为激光雷达的效率, A 为探测器的有效接收面积,即 $A = \frac{1}{4} \pi D^2$, D 为光学探测器有效孔径, H 为飞机飞行高度, R 为空气海水界面下探测距离, $\sigma(r)$ 为发射激光束经过大气、海水界面和水中总的衰减系数, r 为激光束传输到某一点的距离。考虑到大气海水界面的激光衰减,方程中需要加上一项 T^2 , T 是空气海水界面的透射率。另外,如果 $H \gg R$, 可以认为 $(H + R/n)^2 \approx H^2$, 由于是小接收

视场,上式就可以简化为

$$P_r(R) = P_1 \gamma_b \eta T^2 \frac{A}{H^2} \exp(-2cR), \quad (2)$$

式中 $c = a + b$ 为海水衰减系数, a 为海水总的吸收系数, b 为海水的总散射系数。

由此通过检测激光雷达后向散射信号,可获取赤潮水体总的衰减系数。通过基于生物光学算法构建赤潮体的吸收和散射系数与赤潮水体总的衰减系数关系模型,可由赤潮体的吸收和散射系数实现对海洋中叶绿素质量浓度大小的检测,实现对赤潮的预报和监测。

3 生物光学模型

对于一类海水,通常只考虑纯水和叶绿素对光的吸收;对于二类海水,则需要考虑黄色物质和非色素悬浮颗粒的对光的吸收。这里,主要考虑较为复杂的二类海水情况,因此总的吸收系数可表示为

$$a(\lambda) = a_w(\lambda) + a_{ph}(\lambda) + a_y(\lambda) + a_d(\lambda), \quad (3)$$

式中右边 4 项分别表示水分子、浮游植物/叶绿素、黄色物质和非色素悬浮粒子,对波长为 λ 光的吸收系数。散射主要来自水分子、大量浮游植物粒子和非色素悬浮粒子,而黄色物质引起的散射可以忽略,即总的散射系数表示为

$$b(\lambda) = b_w(\lambda) + b_{ph}(\lambda) + b_d(\lambda), \quad (4)$$

式中右边三项分别表示水分子、浮游植物叶绿素、非色素悬浮粒子的散射系数。通常水体对光的吸收可以认为是一个不变量,其吸收系数的大小只和入射光的波长有关。在实际监测海洋赤潮时,可选择输出波长为 532 nm 的倍频 Nd:YAG 固体激光器,一般可设波长为 532 nm 的激光在纯水中的吸收系数为: $a_w = 0.04 \text{ m}^{-1}$ 。纯水的散射常被当作一种分子散射,可以用瑞利理论处理。假定相同海域中,水分子的密度起伏和各向异性水分子运动方向的起伏不大,在同一水域,水分子光散射可以认为是一个不变的量,即 b_w 为一不变的量。对于波长为 532 nm 激光,通常有 $b_w = 1.7 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ 。

黄色物质即海水中的可溶有色有机物,黄色物质光吸收系数与波长成指数函数关系^[9]:

$$a_y(\lambda) = a_y(\lambda_0) \exp[S(\lambda_0 - \lambda)], \quad (5)$$

式中 $a_y(\lambda_0)$ 为参考波长下黄色物质的光吸收系数,一般取 $\lambda_0 = 440 \text{ nm}$ 。 S 为光吸收谱的斜率,其值基本稳定,随波长及黄色物质质量浓度的变化不大,与所用仪器、选取的波段范围及地区的不同存在一些差异,一般在 $0.011 \sim 0.0172$ 之间。研究中,取 $a_y(440) =$

0.243 m⁻¹, S 取平均值 0.014, 即

$$\alpha_y(\lambda) = 0.243 \exp[0.014(440 - \lambda)], \quad (6)$$

由(6)式可以得到:黄色物质在 532 nm 处的吸收系数为, $a_y = 0.067 \text{ m}^{-1}$ 。

非色素悬浮粒子的吸收系数与波长也成指数关系^[10], 和黄色物质具有非常相似的吸收光谱, 表示为

$$a_d(\lambda) = a_d(\lambda_0) \exp[S'(\lambda_0 - \lambda)], \quad (7)$$

式中 $a_d(\lambda_0)$ 为参考波长下非色素悬浮粒子的光吸收系数, 一般取 $\lambda_0 = 440 \text{ nm}$ 。S' 为光吸收谱斜率, 平均值为 0.01 ± 0.002 。在这里取 $a_d(440) = 0.198 \text{ m}^{-1}$, S' 取平均值 0.01, 即

$$a_d(\lambda) = 0.198 \exp[0.01(440 - \lambda)], \quad (8)$$

由(8)式得到, 非色素悬浮颗粒在 532 nm 处的吸收系数为, $a_d = 0.079 \text{ m}^{-1}$ 。

非色素悬浮粒子的散射系数^[11]为

$$b_d(\lambda) = \frac{550}{\lambda} b_d(550), \quad (9)$$

式中 $b_d(550)$ 是参考波长取 550 nm 时非色素悬浮粒子的散射系数, 有 $b_d(550) = 0.125D'$, D' 为海水中非色素悬浮粒子的质量浓度, 单位 mg/L。即有

$$b_d(\lambda) = \frac{550}{\lambda} 0.125D'. \quad (10)$$

由(10)式分析得出, 在探测波长一定时, 非色素悬浮粒子的散射系数与其质量浓度成线性增长关系。通常海水中, 非色素悬浮粒子质量浓度范围大约在 0.01~3 mg/L 之间。

通过对海洋中水分子、黄色物质和非色素悬浮粒子的光学吸收特性和散射特性分析, 可知它们的吸收系数和散射系数主要与探测波长有关, 当探测波长一定时, 海洋中水分子、黄色物质和非色素悬浮粒子的吸收系数和散射系数就可以近似认为是一不变的量。海洋中浮游植物的光学特性比较复杂, 其吸收系数和散射系数不仅与探测光波波长有关, 而且与其所含叶绿素的质量浓度有关。

根据生物光学算法, 浮游植物对光的吸收和散射通常用叶绿素对光的吸收和散射来表征。浮游植物对光的吸收^[12,13]为

$$a_{ph}(\lambda) = a_{ph}^*(\lambda)[Chl], \quad (11)$$

式中 $a_{ph}^*(\lambda)$ 为叶绿素的单位吸收系数, 即单位质量浓度叶绿素(1 mg/m³)的吸收系数。[Chl]为叶绿素的质量浓度(mg/m³)。对浮游植物吸收系数的研究, 关键在于对单位吸收系数 $a_{ph}^*(\lambda)$ 的测算。对单位吸收系数 $a_{ph}^*(\lambda)$ 的变化及其参量化, K. Allali 等^[14]利用 815 个测点的数据, 得出结论, 叶绿素单位吸收系数 $a_{ph}^*(\lambda)$ 随叶绿素的质量浓度变化而变化, 叶绿素的质量浓度增加, $a_{ph}^*(\lambda)$ 则减小, 表示为

$$a_{ph}^*(\lambda) = A(\lambda)[Chl]^{-B(\lambda)}, \quad (12)$$

A(λ)和 B(λ)是随波长变化的系数, 当 λ 为一定值时, 均为常量。其中, A(λ)为参考波长 λ = 440 nm 处进行归一化的单位吸收系数。B(λ)则反映单位吸收系数 $a_{ph}^*(\lambda)$ 随叶绿素质量浓度增加而减小的速率。结合(11)式和(12)式, 浮游植物的吸收系数就可表示为

$$a_{ph}(\lambda) = A(\lambda)[Chl]^{1-B(\lambda)}, \quad (13)$$

本文中引用 K. Allali 等^[14]等的参量化方案:

$$a_{ph}(\lambda) = 0.06A(\lambda)[Chl]^{0.65}, \quad (14)$$

与此同时, Motoaki Kishino 等^[15]也给出浮游植物的散射系数为

$$b_{ph}(\lambda) = \frac{550}{\lambda} \times b_{ph}(550), \quad (15)$$

式中 $b_{ph}(550)$ 是参考波长取 550 nm 时浮游植物的散射系数, 有 $b_{ph}(550) = B_c[Chl]^{0.62}$, B_c 为一个介于 0.12~0.45 之间的常数, 平均值取 0.3, 即有

$$b_{ph}(\lambda) = \frac{550}{\lambda} \times 0.3 \times [Chl]^{0.62}. \quad (16)$$

综上所述, 结合机载激光雷达方程, 基于生物光学算法、以叶绿素质量浓度为变量的激光雷达探测模型关系式为

$$P_r(R) = P_1 \gamma_b \eta T^2 \frac{A}{H^2} \exp\{-2[a_w(\lambda) + a_y(\lambda) + a_d(\lambda) + 0.06A(\lambda)[Chl]^{0.65} + b_w(\lambda) + b_d(\lambda) + \frac{550}{\lambda} \times 0.3 \times [Chl]^{0.62}]R\}, \quad (17)$$

其中 $a_w(\lambda)$, $a_y(\lambda)$, $a_d(\lambda)$, $A(\lambda)$, $b_w(\lambda)$, $b_d(\lambda)$ 在激光波长 λ 一定时, 都可以认为是不变的量, 这样激光回

波信号能量的大小只与叶绿素的质量浓度有关, 从而实现了叶绿素质量浓度的检测。

4 仿真结果及其分析

在仿真过程中,采用的参量为:激光波长 $\lambda = 532 \text{ nm}$;激光脉宽 $\tau = 10 \text{ ns}$;激光功率 $P_1 = 100 \times 10^6 \text{ W}$;激光在海水中的传输距离 $R = 0 \sim 4 \text{ m}$;接收天线口径 $D = 0.5 \text{ m}$;激光雷达的光学系统的传输效率 $\eta = 0.54$;光束发散角 $\alpha = 0.01 \text{ mrad}$;水面的透过率 $T = 0.98$;飞机飞行高度 $H = 500 \text{ m}$;海水中水分子后向散射率 $\gamma_{\text{bw}} = 0.5^{[16]}$;海水中叶绿素后向散射率 $\gamma_{\text{bph}} = 0.001 \sim 0.005^{[16]}$;海水中非色素悬浮粒

子后向散射率 $\gamma_{\text{bd}} = 0.01 \sim 0.02^{[16]}$ 。根据前文对水体成分的吸收和散射特性的分析可知,纯水吸收系数 $a_w(532) = 0.04 \text{ m}^{-1}$,散射系数 $b_w(532) = 1.7 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$;黄色物质吸收系数 $a_y(532) = 0.067 \text{ m}^{-1}$;单位质量浓度叶绿素的归一化吸收系数 $A(532) = 0.32$ 。通过上述仿真参量,可得到在不同非色素悬浮粒子质量浓度(D')情况下,不同叶绿素质量浓度时的接收回波信号功率变化情况如图 1 所示。

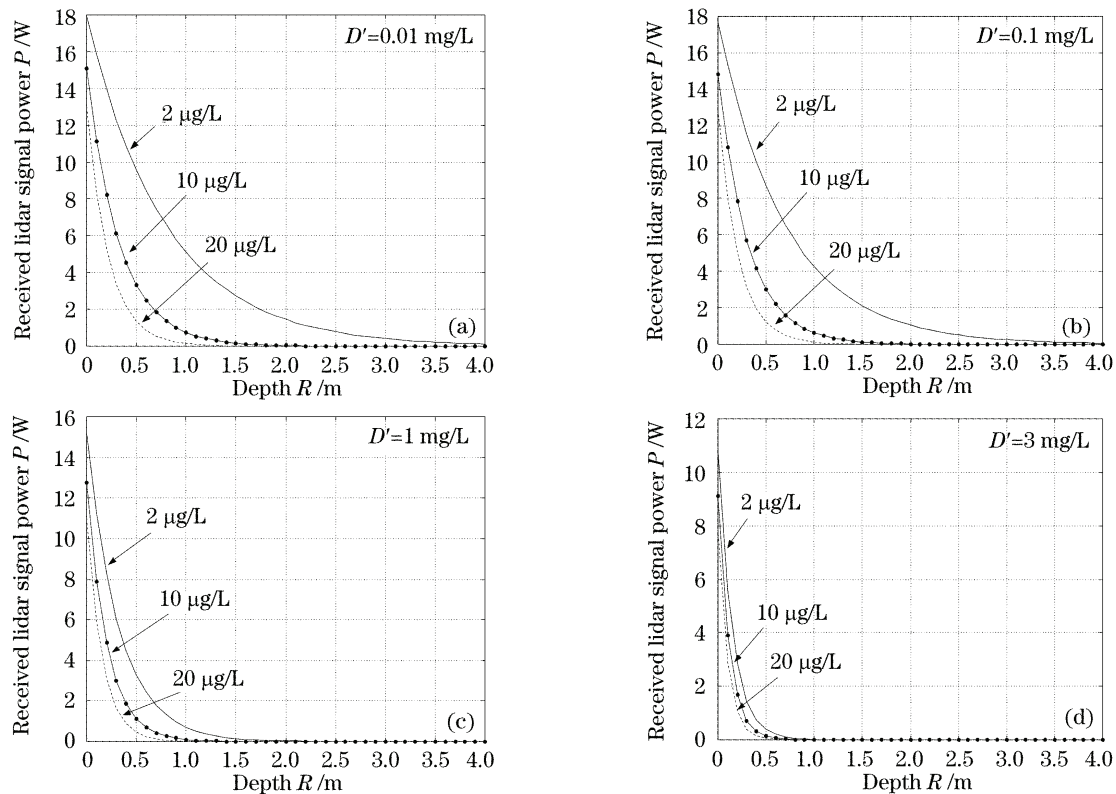


图 1 在不同非色素悬浮粒子质量浓度 D' 情况下,激光雷达回波信号功率随叶绿素质量浓度[Chl]和激光在海水中传播距离的变化

Fig. 1 Received lidar signal power versus the depth of laser propagation in sea for different [Chl] values at different D'

从仿真结果可以看出:在非色素悬浮粒子质量浓度一定时,接收到的回波信号随着叶绿素质量浓度的增加而衰减,且衰减速率逐渐增大;在非色素悬浮粒子质量浓度比较小的时候,非色素悬浮粒子质量浓度变化对接收到的回波信号影响很小,但是在非色素悬浮粒子质量浓度比较大的时候,影响就较大。

5 结 论

以机载蓝绿激光雷达监测海洋赤潮为研究应用背景,利用分析生物光学算法对海水中各种介质的光学特性进行,提出了基于机载蓝绿激光雷达的叶绿素质量浓度探测模型,进一步根据叶绿素的质量

浓度来实现对海洋赤潮藻消长信息的获取,从而实现了海洋赤潮的监测和预报。通过选择 532 nm 的蓝绿激光来进行海洋赤潮监测,建立了以叶绿素质量浓度为单一变量的机载激光雷达探测模型,仿真结果表明该探测模型可以有效探测出叶绿素质量浓度的大小,进而实现对赤潮消长过程的判断。

参 考 文 献

- David M. Allocca, Mark A. Contarino, Thomas P. Curran et al.. Ocean water clarity measurement using shipboard lidar systems[C]. *Proc. SPIE*, 2002, **4488**: 106~114
- He Yan, Wu Dong. Performance evaluation of airborne ocean lidar for measuring chlorophyll-a, suspended matter and coastal water depth in the east China sea [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2004, **34**(4): 649~654

- 贺 岩, 吴 东. 机载海洋激光雷达测量叶绿素 a 浓度、悬移质浓度和浅海深度的性能估计[J]. 中国海洋大学学报, 2004, **34**(4): 649~654
- 3 Wang Xiulin, Sun Peiyan, Gao Zhenhui *et al.*. Advances in red tide prediction method in China[J]. *Advances in Marine Science*, 2003, **21**(1): 93~98
王修林, 孙培艳, 高振会 等. 中国有害赤潮预测方法研究现状和进展[J]. 海洋科学进展, 2003, **21**(1): 93~98
- 4 Frank E. Hoge, Paul E. Lyon, C. Wayne Wright *et al.*. Chlorophyll biomass in the global oceans; airborne lidar retrieval using fluorescence of both chlorophyll and chromophoric dissolved organic matter[J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(14): 2857~2862
- 5 Frank E. Hoge, Paul E. Lyon, Robert N. Swift *et al.*. Validation of terra-MODIS phytoplankton chlorophyll fluorescence line height. I. Initial airborne lidar results[J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(15): 2767~2771
- 6 Zhu Jianrong. The concentration distribution of chlorophyll-a of sea on Changjiang port and its causation analysis [J]. *China Science of Earth Science*, 2004, **34**(8): 757~762
朱建荣. 长江口外海区叶绿素 a 浓度分布及其动力成因分析[J]. 中国科学 D 辑 地球科学, 2004, **34**(8): 757~762
- 7 Wu Dong, Liu Zhishen, Zhang Kailin *et al.*. Lidar measurement of ocean suspended matter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(2): 245~248
吴 东, 刘智深, 张凯临 等. 海洋激光雷达测量海中悬移质[J]. 光学学报, 2003, **23**(2): 245~248
- 8 Wang Quandong, Chen Weibiao, Lu Yutian *et al.*. Analysis of relationship between parameter choice of airborne laser bathymetry and maximum penetrability[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(10): 1255~1260
汪权东, 陈卫标, 陆雨田 等. 机载海洋激光测深系统参量设计与最大探测深度能力分析[J]. 光学学报, 2003, **23**(10): 1255~1260
- 9 Roderick E. Warnock, Winfried W. C. Gieskes, Sandor van Laar. Regional and seasonal differences in light absorption by yellow substance in the Southern Bight of the North Sea[J]. *J. Sea Research*, 1999, **42**: 169~178
- 10 Mark D. Dowell, Jean-Francois Berthon, Nicolas Hoepffner. Absorption modeling in case II waters; the need to distinguish colored dissolved organic matter from non-chlorophyllous particulates[C]. *Proc. SPIE*, 1997, **2963**: 401~407
- 11 Akihiko Tanakal, Motoaki Kishino, Roland Doerffer *et al.*. Development of a neural network algorithm for retrieving concentrations of chlorophyll, suspended matter and yellow substance from radiance data of the ocean color and temperature scanner[J]. *J. Oceanography*, 2004, **60**(3): 519~530
- 12 Wang Guifen, Cao Wenxi, Xu Dazhi *et al.*. Variations in specific absorption coefficients of phytoplankton in northern south China sea[J]. *J. Tropical Oceanography*, 2005, **24**(5): 1~10
王桂芬, 曹文熙, 许大志 等. 南海北部水体浮游植物比吸收系数的变化[J]. 热带海洋学报, 2005, **24**(5): 1~10
- 13 Xu Xiaoqiang, Cao Wenxi, Yang Yuezhong. Relationships between spectral absorption coefficient of particulates and salinity and Chlorophyll-a concentration in Zhujiang River Mouth[J]. *J. Tropical Oceanography*, 2004, **23**(5): 64~71
许晓强, 曹文熙, 杨跃忠. 珠江口颗粒物吸收系数与盐度及叶绿素 a 浓度的关系[J]. 热带海洋学报, 2004, **23**(5): 64~71
- 14 K. Allali, Annick Bricaud, Herve Claustre. Spatial variability in the chlorophyll-specific absorption coefficients of phytoplankton and photosynthetic pigments in the equatorial Pacific[C]. *Proc. SPIE*, 1997, **2963**: 179~184
- 15 Motoaki Kishino, Akihiko Tanaka, Tomohiko Oishi *et al.*. Temporal and spatial variability of chlorophyll a, suspended solids and yellow substance in the yellow sea and east China sea using ocean color sensor[C]. *Proc. SPIE*, 2000, **4154**: 179~187
- 16 Howard R. Gordon. Diffuse reflectance of the ocean; influence of nonuniform phytoplankton pigment profile [J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(12): 2116~2129