

基于光学浮标的赤潮生消过程半分析监测方法

牟 冰¹ 崔廷伟^{2*} 曹文熙³ 秦 平⁴ 郑荣儿¹ 张 杰²

¹ 中国海洋大学光学光电子实验室, 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实验室, 广东 广州 510301

⁴ 中国海洋大学电子系, 山东 青岛 266100

摘要 赤潮爆发时水体叶绿素 a 质量浓度升高, 引起浮游植物吸收系数、光束总吸收系数等水体固有光学性质 (IOP) 的变化, 并导致水体表观光学性质 (AOP) 的改变。海洋光学浮标可实现水体表观光学性质的定点连续时间序列观测, 基于此发展相应的模型方法有望实现赤潮生消全过程的监测。利用一次赤潮生消过程的海洋光学浮标数据, 发展了一种赤潮半分析监测方法。该方法首先由光学浮标数据得到的水体光谱漫衰减系数 $K_d(\lambda)$ 和遥感反射率 $r_{rs}(\lambda)$, 结合经验确定的水下光场平均余弦进行水体光束总吸收系数 $a(\lambda)$ 的半分析估算, 然后再半分析反演浮游植物吸收系数 $a_{ph}(\lambda)$ 和叶绿素 a 质量浓度。经检验, 该方法估算 $a(675)$, $a_{ph}(675)$ 和叶绿素 a 质量浓度的中值相对误差分别为 8.6%, 34.9% 和 38.9%。将本方法与半分析方法 (QAA) 和统计回归方法进行了对比分析, 本方法的优势在于反演精度较高, 所采用的经验参数大都源自辐射传输理论计算、不依赖于浮标数据且对反演结果的影响有限。

关键词 海洋光学; 赤潮监测; 半分析方法; 浮标; 吸收系数

中图分类号 P733.3 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201232.0201001

A Semi-Analytical Monitoring Method During the Process of Red Tide Based on Optical Buoy

Mu Bing¹ Cui Tingwei² Cao Wenxi³ Qin Ping⁴ Zheng Ronger¹ Zhang Jie²

¹ Optics and Opto-Electronics Laboratory, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China

² Marine Physics and Remote Sensing Research Laboratory, First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao, Shandong, 266061, China

³ Key Laboratory of Tropical Marine Environmental Dynamics, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, Guangdong, 510301, China

⁴ Department of Electronics, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China

Abstract Chlorophyll a mass concentration will increase when red tide breaks out. It causes the changes of waters inherent optical properties (IOP), such as phytoplankton absorption coefficients and beam total absorption coefficients, which lead to the changes of waters apparent optical properties (AOP). Optical buoy can realize continual observation of apparent optical properties in situ, so it is hopeful to monitor red tide by developing corresponding method based on optical buoy's data. A semi-analytical monitoring method is developed for red tide by using optical buoy's data obtained during the process of red tide. First, beam total absorption coefficients are retrieval from diffuse attenuation coefficient and remote sensing reflectance, which are calculated from optical buoy's data, and combined with experiential underwater downwelling average cosine. Then phytoplankton absorption coefficients and chlorophyll a mass concentration are retrieved. The median relative errors of beam absorption coefficients,

收稿日期: 2011-07-08; 收到修改稿日期: 2011-09-15

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: 牟 冰 (1978—), 女, 硕士, 讲师, 主要从事海洋光学与水色遥感等方面的研究。

E-mail: mu_bingbing@yahoo.com.cn

* 通信联系人。E-mail: cuitingwei@fio.org.cn

phytoplankton absorption coefficients and chlorophyll *a* mass concentrations estimated by the semi-analytical method are 8.6%, 34.9% and 38.9%, respectively. Compare with quasi-analytical algorithm (QAA) and statistical method, the advantages are that the retrieved results are better and all experiential parameters are from radiative transfer calculation, which don't depend on buoy's data and have limited effect on the results.

Key words oceanic optics; red-tide monitoring; semi-analytical method; buoy; absorption coefficient

OCIS codes 010.4450; 300.1030

1 引 言

赤潮是海水中的某些浮游藻类、原生动物或细菌在一定条件下的爆发性过度繁殖或者聚集致使海水变色的一种有害生态异常现象。近岸海域的赤潮爆发对人类生产生活造成严重危害,因此对其进行有效的监测具有重要意义。赤潮爆发具有随机性、持续时间短等特点,给传统的船舶监测带来很大困难。卫星水色遥感具有大面积、成像、同步和经济等优势,已成为赤潮监测的主要手段之一^[1~3],但是其受云雾影响严重且在近岸海域的大气校正存在较大的不确定性,制约了赤潮遥感监测精度。目前,海洋光学浮标在水色卫星定标方面已发挥了重要作用^[4,5],在海洋环境监测方面的作用也逐渐凸显^[6],其可实现水体表观光学性质的定点连续时间序列观测,因此基于光学浮标数据,结合适当的模型方法,具备实现赤潮生消过程跟踪监测的潜力。

赤潮爆发时水体叶绿素 *a* 质量浓度升高,引起浮游植物吸收系数、光束总吸收系数等水体固有光学性质(IOP)的变化^[7,8],并导致水体表观光学性质(AOP)的改变。通常将叶绿素 *a* 质量浓度、浮游植物吸收系数等作为主要的赤潮监测指标。基于海洋光学浮标数据,曹文熙等^[8]利用遥感反射率和漫衰减系数分别进行了叶绿素 *a* 质量浓度的统计反演,王桂芬等^[9]进行了水体总吸收系数的统计反演;郝艳玲等^[10]利用基于遥感反射率的半分析方法(QAA)反演了主要水色波段的总吸收系数和浮游植物吸收系数。总体来看,统计回归方法对样本具有较高的依赖性,在一定程度上限制了其适用性。半分析方法是研究的热点,但目前对于浮游植物吸收系数^[11]的反演效果还不能令人满意,主要原因是受制于水体总吸收系数^[12]的反演精度。

海洋光学浮标^[13]可获得水下不同深度的向下辐照度和向上辐亮度数据,从而得到水体漫衰减系数和遥感反射率,其中漫衰减系数尽管是表观光学量,但是其受周围光场方向结构的影响有限,又被称为准固有光学量,与总吸收系数存在简单而直接的关系^[14]。因此,基于浮标漫衰减系数数据进行水体固

有光学性质和水色组分质量浓度的半分析反演,在简化反演步骤、提高反演精度等方面具有一定潜力。

本文利用一次赤潮生消过程的海洋光学浮标数据,发展了一种赤潮半分析监测方法。该方法首先由浮标数据计算得到的漫衰减系数和遥感反射率进行水体光束吸收系数的半分析估算,然后再进行浮游植物吸收系数和叶绿素 *a* 质量浓度的半分析反演,从而实现赤潮过程的监测,并将本方法与半分析方法^[15]和传统的统计回归方法进行了对比。

2 数 据

我国自主研发了海洋光学浮标,该浮标可同时采集水上一层、水下两层的向上辐亮度、向下辐照度数据,三层辐照度探头分别位于水面上 1.69 m,水面下 0.325 m 和 2.3 m;三层辐亮度探头分别位于水面上 1.14 m,水面下 0.905 m 和 2.88 m。基于浮标获得的三层辐亮度和辐照度数据,利用辐射传输公式计算得到漫衰减系数、遥感反射率,关于该浮标的详细信息和数据处理方法见文献^[6,13,16]。

2007 年在珠江口担杆岛附近进行了海洋光学浮标实验,每天 8~18 点进行观测,时间间隔为 1 h。8 月 13~29 日期间捕获了一次完整的赤潮生消过程,浮标布放处同时进行了生物-光学参数测量,每日表层水样采集时间分别为 9 点,12 点和 15 点,利用该水样测量了浮游植物吸收系数、非藻类颗粒物吸收系数、黄色物质吸收系数和叶绿素 *a* 质量浓度,具体测量方法见文献^[17]。数据见图 1 和图 2。经数据质量控制,共获得 32 组浮标-水样匹配数据。

水体漫衰减系数 K_d 的峰值在 440 nm 和 675 nm 附近^[图 1(a)];在整个赤潮生消过程中, K_d 峰值高度有较大变化。刚好在水面之下的遥感反射率 r_{rs} ^[图 1(b)] 的主峰值出现在 550 nm 附近,675 nm 附近为一谷值;实验期间 r_{rs} 峰值高度和曲线整体形状均有较大变化。总吸收系数曲线与漫衰减系数曲线形状相近,浮游植物吸收系数的峰值出现在 440 nm 和 675 nm。21~24 日叶绿素 *a* 质量浓度基本大于 $10 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ (图 2)。

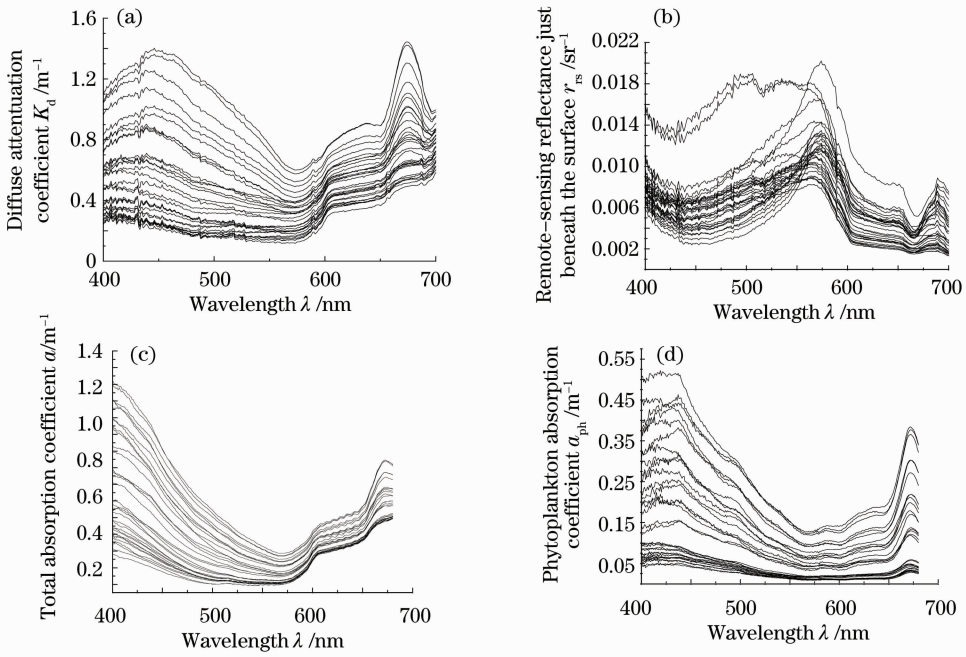


图 1 光学浮标数据得到的水样漫衰减系数(a);刚好在水面下的遥感反射率(b);由采集水样测量的水体光束总吸收系数(c)和浮游植物吸收系数(d)

Fig.1 Diffuse attenuation coefficient (a), remote-sensing reflectance just beneath the surface (b), total absorption coefficient from the optical buoy's data (c) and phytoplankton absorption coefficient (d) from water samples

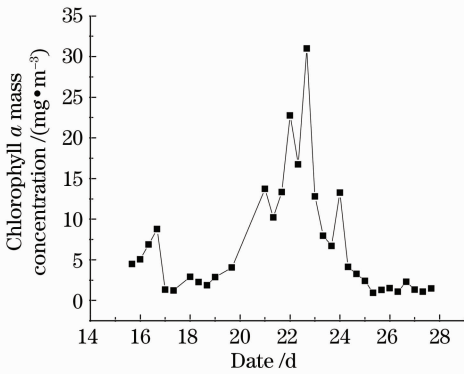


图 2 赤潮生消过程叶绿素 a 质量浓度的变化

Fig.2 Variation of chlorophyll a mass concentration during the process of red tide

3 方 法

本文基于浮标数据计算得到的漫衰减系数和刚好在水面下的遥感反射率数据,通过平均余弦反演总吸收系数,再利用 Lee 等^[15]的算法由总吸收系数估算浮游植物吸收系数,并进而得到叶绿素 a 质量浓度。

漫衰减系数与总吸收系数存在如下关系:

$$a = \bar{\mu}_d K_d - b_b, \quad (1)$$

式中 a 为水体总吸收系数, K_d 为向下漫衰减系数, $\bar{\mu}_d$ 为光谱下行平均余弦, b_b 为后向散射系数。

根据 Gordon 模型^[18],刚好在水面下的遥感反射率 r_{rs} 可表示为

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

式中 g_0, g_1 随颗粒相函数变化,对于近岸二类水体取 $g_0 = 0.084, g_1 = 0.17$ ^[18,19], u 定义为

$$u = \frac{b_b}{a + b_b}. \quad (3)$$

将(2),(3)式代入(1)式可得

$$a = \frac{2g_1 + g_0 - (g_0^2 + 4g_1 r_{rs})^{1/2}}{2g_1} \bar{\mu}_d K_d. \quad (4)$$

基于(4)式实现总吸收系数的反演。其中光谱下行平均余弦 $\bar{\mu}_d$ 是表观光学量,通常在 0.7~0.9 之间^[20],混浊水体中变化范围更小,如波罗的海的研究表明 $\bar{\mu}_d$ 为 0.7(427 nm)~0.77(633 nm)^[10],对于太阳和天空光照射的自然水体 $\bar{\mu}_d$ 典型值为 0.75^[20],本文取 $\bar{\mu}_d = 0.75$ 。有关平均余弦取值对反演结果的影响分析详见讨论部分。

考虑到 b_b 通常较 a 小一个量级,当忽略 b_b 时,可得反演总吸收系数

$$a = \bar{\mu}_d K_d. \quad (5)$$

浮游植物吸收系数的反演采用了 Lee 等^[15]算法,如表 1 所示,其中 a_{ph} 为浮游植物的吸收系数, a_{dg} 为黄色物质和碎屑的吸收系数, a_w 为纯海水的吸收系数。

表 1 浮游植物吸收系数反演步骤^[15]

Table 1 Retrieving steps of phytoplankton absorption coefficient

Step	Property	Math formula
1	$\zeta = a_{ph}(410)/a_{ph}(440)$	$= 0.71 + \frac{0.06}{0.8 + r_{rs}(440)/r_{rs}(555)}$
2	$\xi = a_{dg}(410)/a_{dg}(440)$	$= \exp[S(440 - 410)] \quad S = 0.015 \text{ nm}^{-1}$
3	$a_{dg}(440)$	$= \frac{[a(410) - \zeta a(440)]}{\xi - \zeta} - \frac{[a_w(410) - \zeta a_w(440)]}{\xi - \zeta}$
4	$a_{ph}(\lambda)$	$= a(\lambda) - a_{dg}(440)\exp[-s(\lambda - 440)] - a_w(\lambda)$

叶绿素质量浓度与浮游植物吸收系数满足指数关系:

$$a_{ph}(\lambda) = A(C_a)^B, \quad (6)$$

式中 C_a 代表叶绿素 a 质量浓度, A, B 是与波长有关的常数。由于浮游植物吸收系数的特征峰为 440 nm 和 675 nm, 因此本文提出的赤潮半分析监测方法只关注这两个特征波段。 A, B 的取值参考 Bricaud 等^[21, 22], $A(440)=0.0654, B(440)=0.728, A(675)=0.02005, B(675)=0.842$ 。

选取中值相对误差 (MRE) 和均方根误差 (RMSE) 作为评价参数, 如 (7), (8) 式所示。

$$\epsilon_{MR} = \text{med}[(x_{ir} - x_{im})/x_{im}], \quad (7)$$

$$\epsilon_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{ir} - x_{im})^2}{n - 1}}, \quad (8)$$

式中 x_{ir} 为反演值, x_{im} 为实测值, n 为测量次数。

4 结 果

基于上述半分析方法的固有光学量反演结果如表 2 和图 3, 4 所示。

表 2 固有光学量反演结果统计

Table 2 Statistics of the retrieved inherent optical properties

	$\lambda=440 \text{ nm}$				$\lambda=675 \text{ nm}$			
	Considering b_b		Ignoring b_b		Considering b_b		Ignoring b_b	
	a	a_{ph}	a	a_{ph}	a	a_{ph}	a	a_{ph}
$\epsilon_{MR}/\%$	27.0	62.0	23.8	70.7	8.6	34.9	10.8	41.0
$\epsilon_{RMS}/\text{m}^{-1}$	0.14	0.17	0.12	0.18	0.09	0.09	0.10	0.11
R^2	0.91	0.91	0.91	0.91	0.86	0.83	0.87	0.83
N	32	32	32	32	32	25	32	25

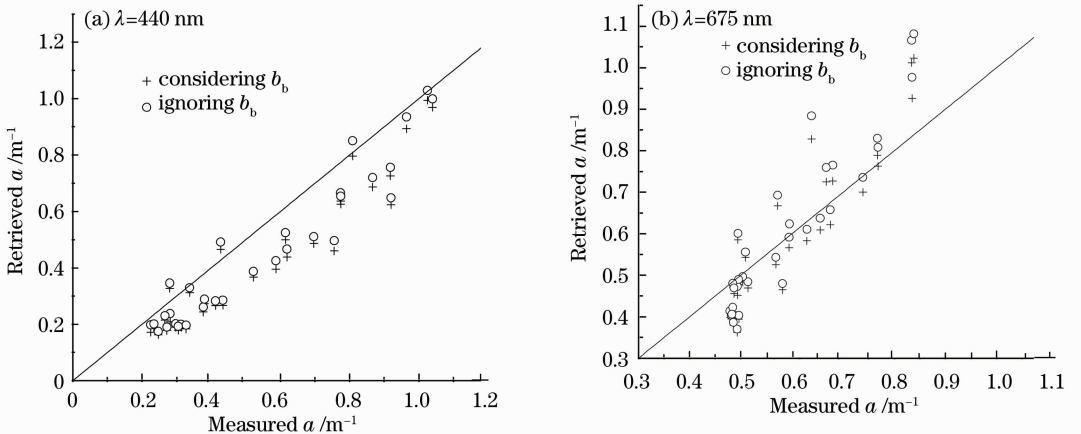


图 3 总吸收系数反演值与实测值的散点图

Fig. 3 Scatter plot of retrieved and measured total absorption coefficients

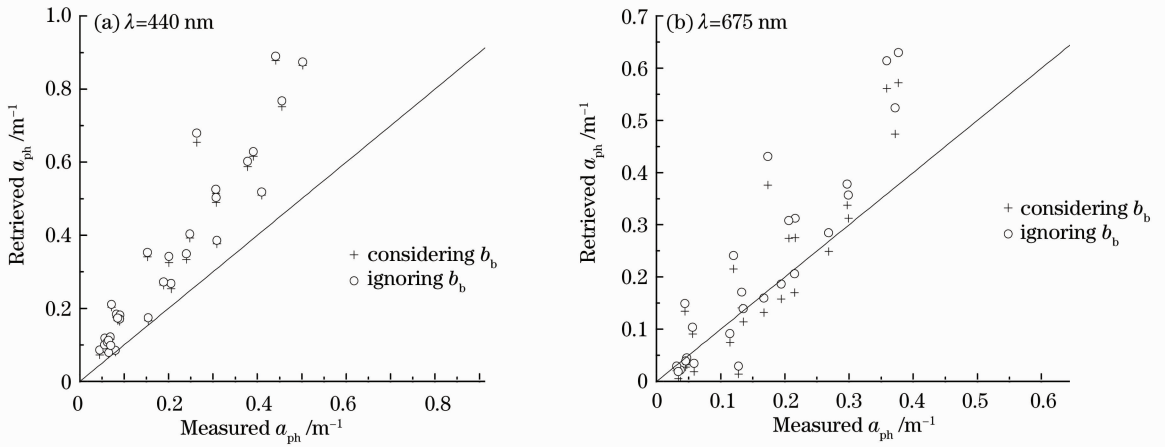


图 4 浮游植物吸收系数反演值与实测值的散点图

Fig. 4 Scatter plot of retrieved and measured phytoplankton absorption coefficients

$a(440)$ 反演误差为 27%，反演值总体上低估实测值，相关系数为 0.91，均方根误差为 0.14 m^{-1} 。 $a(675)$ 反演误差小于 10%，绝大部分反演值与实测值分布在 1:1 线附近，相关系数为 0.86，均方根误差为 0.09 m^{-1} 。当忽略 b_b 时， $a(440)$ 和 $a(675)$ 的反演误差分别为 23.8%和 10.8%，相关系数分别为 0.91 和 0.87， $a(440)$ 和 $a(675)$ 反演精度变化不明显。

$a_{ph}(440)$ 反演误差为 62.0%，反演值总体上高估实测值，相关系数为 0.91。 $a_{ph}(675)$ 反演误差为 34.9%，相关系数为 0.83。当忽略 b_b 时， $a_{ph}(440)$ 和 $a_{ph}(675)$ 反演误差有所增加，分别为 70.7%和 41.0%。通过对比可见，忽略 b_b 时 a_{ph} 的反演误差升高约 10%。

440 nm 处总吸收系数和浮游植物吸收系数的反演精度均不及 675 nm，主要原因在于黄色物质和碎屑在 675 nm 处的吸收贡献可以忽略，而其在 440 nm 波段的吸收贡献对于浮游植物吸收的估算

造成了显著的干扰。440 nm 处反演值与实测值的相关系数均大于 675 nm 处并实现了全部数据的有效反演。675 nm 处 a_{ph} 反演有效值少，主要原因在于该处纯海水的吸收在水体总吸收系数中所占的比例高，且黄色物质和碎屑的吸收贡献小，因此总吸收反演值的低估导致了浮游植物吸收系数反演值出现无效的负值。

如图 5 所示，叶绿素 a 质量浓度反演值与实测值的时序趋势基本一致，叶绿素 a 质量浓度较高时模型误差较大。基于 $a_{ph}(440)$ 的叶绿素 a 质量浓度反演误差为 38.9%，优于基于 $a_{ph}(675)$ 的结果(75.5%)。上述反演误差可主要归因于公式(6)中 A, B 经验取值的不确定性^[23]， A 和 B 主要是大洋清洁水体数据统计确定的，但有较大的时空变化，因此有必要针对典型赤潮过程进行参数的优化调整。忽略 b_b 时反演误差升高，其中基于 440 nm 浮游植物吸收的叶绿素 a 质量浓度反演受影响较大(约 10%)。

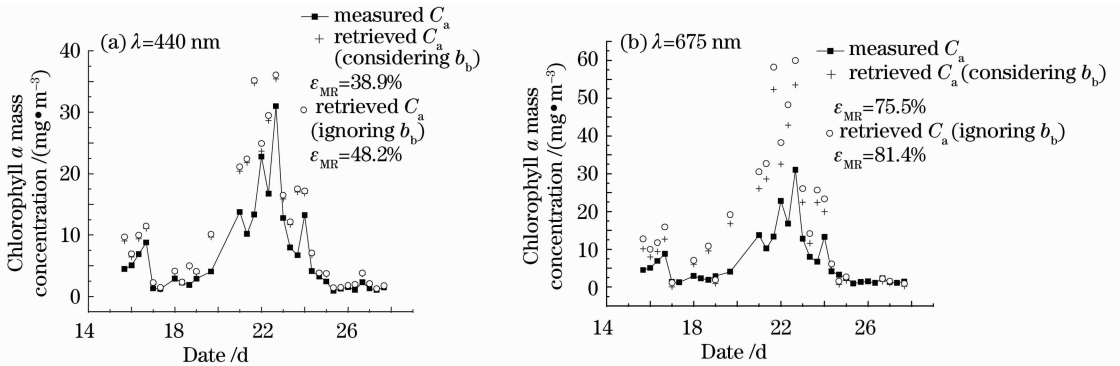


图 5 叶绿素 a 质量浓度反演值与实测值

Fig. 5 Retrieved and measured chlorophyll a mass concentration

5 讨 论

5.1 经验参数选取对半分析模型精度的影响

本方法涉及的经验参数有 g_0 , g_1 , S , ζ , A , B 和 $\bar{\mu}_d$, 其中 g_0 , g_1 , S , ζ 的取值对反演结果的影响已在 Lee 等^[15] 文献中讨论; A 和 B 的取值 Bricaud 等^[24~29] 文献中讨论。本文主要讨论平均余弦 $\bar{\mu}_d$ 对总吸收系数反演的影响。

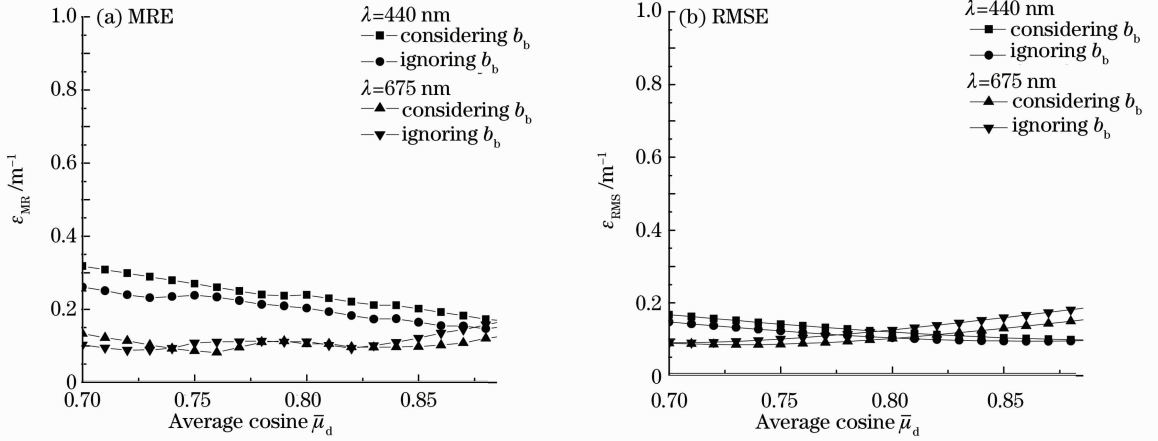


图 6 不同平均余弦取值的总吸收系数反演的统计结果

Fig. 6 Statistic results of retrieving total absorption coefficients under different average cosine

平均余弦是波长的函数^[20], 下一步的工作中考虑平均余弦的光谱性质将有助于进一步提高反演精度。

5.2 与已有方法的比较

QAA 算法是目前的主流分析算法, 以遥感反射率为输入。利用浮标数据计算得到的水表面之下的遥感反射率根据 QAA 算法反演赤潮水体吸收系数和浮游植物吸收系数结果如图 7, 8 所示。

总吸收系数的反演值与实测值的中值相对误差为 31.3% (440 nm) 和 30.1% (675 nm), 均方根误差

在 0.7~0.9 之间改变平均余弦的取值, 由漫衰减系数和水表面之下的遥感反射率反演总吸收系数, 计算反演值与实测值的相对偏差, 统计结果如图 6 所示。440 nm 处, 中值相对误差变化范围小于 16%; 675 nm 处, 中值相对误差变化范围小于 10%; 均方根误差的变化范围均小于 0.1 m^{-1} , 由此可见总吸收系数的反演对平均余弦的取值较不敏感。

为 0.21 m^{-1} 和 0.25 m^{-1} ; 浮游植物吸收系数的反演值和实测值的中值误差为 79.3% (440 nm) 和 85.8% (675 nm), 均方根误差为 0.17 m^{-1} 和 0.60 m^{-1} 。675nm 处的实测值与反演值的相关性差, 浮游植物吸收系数的反演有效值仅为 6 个。本方法的反演结果均优于基于遥感反射率的 QAA 算法结果。此外, 与 QAA 算法相比, 本方法同时利用了漫衰减系数和遥感反射率做为输入, 简化了对总吸收系数的反演步骤。

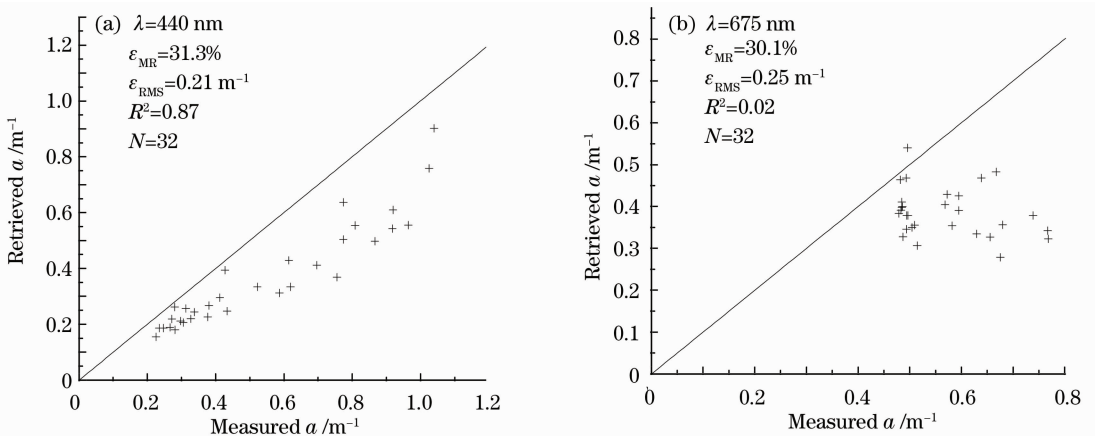


图 7 基于 QAA 算法的总吸收系数反演值与实测值散点图

Fig. 7 Scatter plot of measured and retrieved total absorption coefficients by QAA

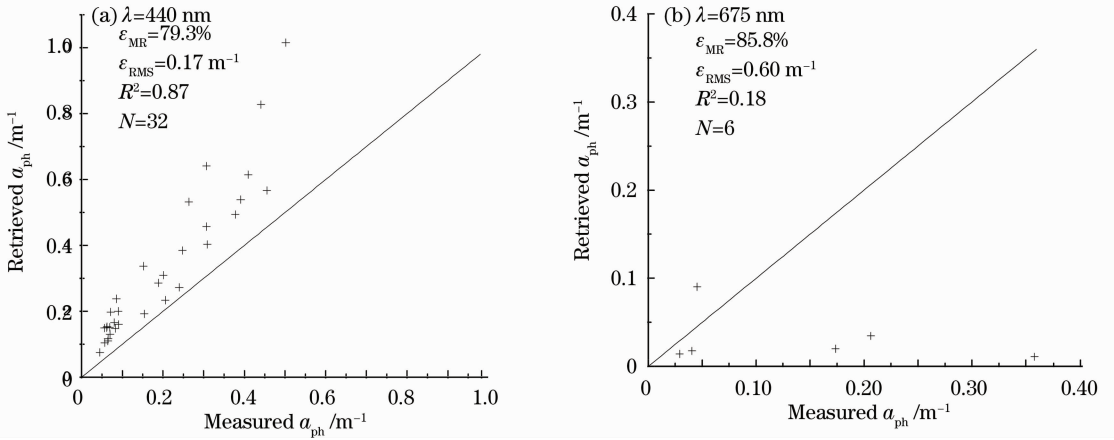


图 8 基于 QAA 算法的浮游植物吸收系数反演值与实测值散点图

Fig. 8 Scatter plot of measured and retrieved phytoplankton absorption coefficients by QAA

基于本文的数据,曹文熙等^[8]分别建立了由遥感反射率和漫衰减系数估算叶绿素 a 质量浓度的统计经验模型:

$$c_a = 81.48 \left[\frac{R_{rs}(698)}{R_{rs}(570)} \right]^{2.323}, \quad (9)$$

$$K_d(443) = K_w(443) + 0.2178c_a^{0.574}, \quad (10)$$

式中 k_w 是纯海水的漫衰减系数^[30]。根据(9),(10)式反演叶绿素 a 质量浓度,结果如图 9 所示。

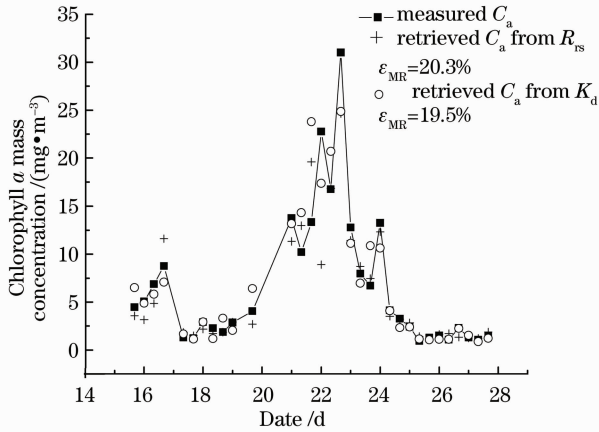

 图 9 基于统计回归方法的叶绿素 a 质量浓度反演结果

 Fig. 9 Retrieved chlorophyll a mass concentration by the statistical method

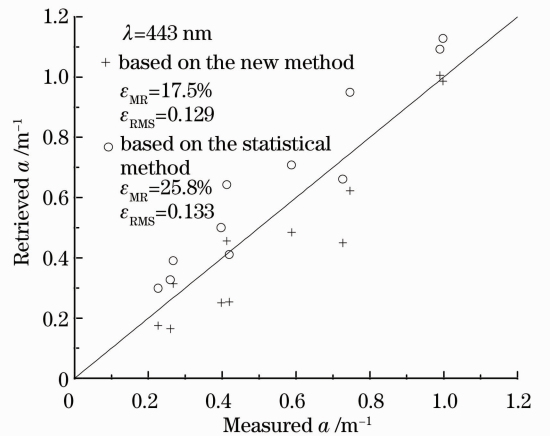
基于统计回归方法的叶绿素 a 质量浓度反演误差在 20% 左右,误差较大的数据基本集中在赤潮期,反演值普遍低估了实测值。与之比较,本文半分析方法的叶绿素 a 质量浓度反演误差相对较大,但是统计方法的建模和验证样本相同,依赖于浮标数据。

基于本文 9 点和 12 点的遥感反射率数据,王桂芬等^[9]建立了 $a(443)$ 的统计经验模型:

$$a(443) = a_w(443) + 10^{-1.553\rho^2 - 2.422\rho - 0.861}, \quad (11)$$

$$\rho = \lg \frac{R_{rs}(443)}{R_{rs}(555)}. \quad (12)$$

利用浮标获得的 15 点数据,对比了上述统计回归方法和本文半分析方法, $a(443)$ 的反演值与实测值的散点图如图 10 所示,统计回归方法反演的中值相对误差为 25.8%,均方根误差为 0.133;本方法的中值相对误差为 17.5%,均方根误差为 0.129,均优于统计回归方法。此外,考虑到本方法所采用的经验参数大都源自辐射传输理论计算、不依赖于浮标数据且对反演结果的影响有限,因此本半分析方法的适用性应优于传统的统计回归方法。


 图 10 总吸收系数反演值和实测值的散点图
 Fig. 10 Scatter plot of retrieved and measured total absorption coefficients

6 结 论

利用一次赤潮生消过程的海洋光学浮标数据,发展了一种赤潮半分析监测方法。该方法首先由浮

标数据计算得到的水体光谱漫衰减系数 $K_d(\lambda)$ 和遥感反射率 $r_{rs}(\lambda)$, 结合经验确定的水下光场平均余弦进行水体光束总吸收系数 $a(\lambda)$ 的半分析估算, 然后再半分析反演浮游植物吸收系数 $a_{ph}(\lambda)$ 和叶绿素 a 质量浓度; 经检验, 该方法估算 $a(675)$ 、 $a_{ph}(675)$ 和叶绿素 a 质量浓度的中值相对误差分别为 8.6%, 34.9% 和 38.9%。将本方法与 QAA 方法和统计回归方法进行了对比分析, 本方法的优势在于反演精度较高, 所采用的经验参数大都源自辐射传输理论计算、不依赖于浮标数据且对反演结果的影响有限。本文提出的半分析方法可为海洋光学浮标赤潮业务化监测提供参考。

参 考 文 献

- 1 Y. H. Ahn, P. Shanmugam. Detecting the red tide algal blooms from satellite ocean color observations in optically complex Northeast-Asia Coastal waters [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, **103**(4): 419~437
- 2 C. Hu, F. E. Muller-Karger, C. Taylor. Red tide detection and tracing using MODIS fluorescence data: a regional example in SW Florida coastal waters [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, **97**(3): 311~321
- 3 T. Kuster, L. Metsamaa, N. Strombeck. Monitoring cyanobacterial blooms by satellite remote sensing [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2006, **67**(1-2): 303~312
- 4 S. B. Hooker, C. R. McClain. The calibration and validation of SeaWiFS data [J]. *Progress in Oceanography*, 2000, **45**(3-4): 427~465
- 5 David Antoine, Pierre Guevel, Jean-Francois Deste *et al.*. The "BOUSSOLE" buoy-a new transparent-to-swell taut mooring dedicated to marine optics: design, tests, and performance at sea [J]. *J. Atmospheric and Oceanic Technology*, 2008, **25**(6): 968~989
- 6 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): 2041~2045
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): 2041~2045
- 7 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
- 8 Cao Wenxi, Yang Yuezhong, Wang Guifen *et al.*. Hyperspectral monitoring and early warning for algal blooms [J]. *J. Tropical Oceanography*, 2010, **29**(2): 17~24
曹文熙, 杨跃忠, 王桂芬等. 赤潮的高光谱监测及预警方法 [J]. *热带海洋学报*, 2010, **29**(2): 17~24
- 9 Wang Guifen, Cao Wenxi, Yang Yuezhong *et al.*. Variations of absorption coefficient of seawater in the Pearl River Estuary and a hyperspectral retrieval model for an algal bloom [J]. *J. Tropical Oceanography*, 2010, **29**(2): 52~58
王桂芬, 曹文熙, 杨跃忠等. 珠江口藻华水体总吸收系数的变化特性及高光谱反演模式 [J]. *热带海洋学报*, 2010, **29**(2): 52~58
- 10 Hao Yanling, Cao Wenxi, Cui Tingwei *et al.*. The retrieval of oceanic inherent optical properties based on semianalytical algorithm during the red tide [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2011, **33**(1): 1~14
郝艳玲, 曹文熙, 崔廷伟等. 基于半分析算法的赤潮水体固有光学性质反演 [J]. *海洋学报*, 2011, **33**(1): 1~14
- 11 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
- 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, Zhang Jingxiang *et al.*. Design and test of moored optical buoy [J]. *J. Tropical Oceanography*, 2010, **29**(2): 1~6
曹文熙, 杨跃忠, 张敬祥等. 锚泊光学浮标浮体设计及近海实验 [J]. *热带海洋学报*, 2010, **29**(2): 1~6
- 14 Jeffrey H. Smart. Empirical algorithms for ocean optics parameters [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(12): 7152~7164
- 15 Lee Zhongping, K. L. Carder, R. A. Arnone. Deriving inherent optical properties from water color: a multiband quasi-analytical algorithm for optically deep waters [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(27): 5755~5772
- 16 Yang Yuezhong, Cao Wenxi, Sun Zhaohua *et al.*. Development of real-time hyperspectral radiation sea-observation system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 102~107
杨跃忠, 曹文熙, 孙兆华等. 海洋高光谱辐射实时观测系统的研制 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 102~107
- 17 Zhao Jun, Cao Wenxi, Yang Yuezhong *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
- 18 H. R. Gordon, O. B. Brown, R. H. Evans *et al.*. A semi-analytic radiance model of ocean color [J]. *J. Geophys. Res.*, 1988, **93**(D9): 10909~10924
- 19 Lee Zhongping, 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**(18): 3831~3843
- 20 Curtis D. Mobley. Light and Water: Radiative Transfer in Natural Waters [M]. San Diego: Academic Press, 2004
- 21 Annick Bricaud, Marcel Babin, Andre Morel *et al.*. Variability in the chlorophyll-specific absorption coefficients of natural phytoplankton: analysis and parameterization [J]. *J. Geophysical Research*, 1995, **100**(C7): 13321~13332
- 22 Annick Bricaud, Herve Claustre, Josephine Ras *et al.*. Natural variability of phytoplanktonic absorption in oceanic waters: influence of the size structure of algal populations [J]. *J. Geophysical Research*, 2004, **109**: C11010
- 23 Wang Guifen, Cao Wenxi, Yang Yuezhong *et al.*. Variations in light absorption properties during a phytoplankton bloom in the Pearl River estuary [J]. *Continental Shelf Research*, 2010, **30**(9): 1085~1094
- 24 Annick Bricaud, Marcel Babin, Andre Morel *et al.*. Variability in the chlorophyll-specific absorption coefficients of natural phytoplankton: analysis and parameterization [J]. *J. Geophysical Research*, 1995, **100**(C7): 13321~13332
- 25 Annick Bricaud, André Morel, Marcel Babin *et al.*. Variations of light absorption by suspended particles with chlorophyll a concentration in oceanic (case 1) waters: analysis and implications for bio-optical models [J]. *J. Geophysical Research*, 1998, **103**(C13): 31033~31044
- 26 Annick Bricaud, Herve Claustre, Josephine Ras *et al.*. Natural variability of phytoplanktonic absorption in oceanic waters:

- Influence of the size structure of algal populations [J]. *J. Geophysical Research*, 2004, **109**: C11010
- 27 Annick Bricaud, Marcel Babin, Hervé Claustre *et al.*. Light absorption properties and absorption budget of Southeast Pacific waters[J]. *J. Geophysical Research*, 2010, **115**: C08009
- 28 Marcel Babin, Dariusz Stramski, Giovanni M. Ferrari *et al.*. Variations of light absorption coefficients of phytoplankton, nonalgal particles, and dissolved organic matter in coastal waters around Europe[J]. *J. Geophysical Research*, 2003, **108**(C7): 3211~3230
- 29 Atsushi Matsuoka, Victoria Hill, Yannick Huot *et al.*. Seasonal variability in the light absorption properties of western arctic waters: parameterization of the individual components of absorption for ocean color applications [J]. *J. Geophysical Research*, 2011, **116**: C02007
- 30 Andre Morel, Stephane maritorena. Bio-optical properties of oceans waters: a reappraisal[J]. *J. Geophysical Research*, 2001, **106**(C4): 7163~7180

栏目编辑:谢 婧