

东海赤潮高发区半分析算法色素浓度反演

丘仲锋^{1,2}, 席红艳^{1,2}, 何宜军^{1*}, 陈介中³, 简伟军⁴

(1. 中国科学院海洋研究所, 青岛 266071; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039; 3. 深港产学研基地海岸与大气研究重点实验室, 深圳 518100; 4. 国家海洋局第二海洋研究所, 杭州 310012)

摘要: 为研究赤潮机理和预测预报以减少其危害, 根据 2002-04 东海赤潮调查航次实测资料, 得出经验系数, 建立方程, 发展了东海赤潮高发海区的叶绿素 a 浓度反演半分析算法. 由现场实测数据对算法进行检验, 叶绿素 a 吸收系数 $a_{ph}(675)$ 及浓度的反演结果误差基本在 30% 以内, 其中浓度反演结果比较, 均方根偏差为 0.24, 最大相对偏差为 40.93%, 平均相对偏差为 18.83%, 相关系数 R^2 为 0.83. 从检验的结果来看, 算法反演的精度较好, 对于研究海区相对适用.

关键词: 赤潮; 半分析算法; 色素

中图分类号: X55; P715.7 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2006)08-1516-06

Semi-Analysis Algorithm to Retrieve Pigment Concentrations in the Red Tide Area of the East China Sea

QIU Zhong-feng^{1,2}, XI Hong-yan^{1,2}, HE Yi-jun¹, CHEN Jay-chung³, JIAN Wei-jun⁴

(1. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China; 3. Shenzhen Key Laboratory of Coastal & Atmospheric Research, Shenzhen 518100, China; 4. The Second Institute of Oceanography State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China)

Abstract: For the purpose of detecting and forecasting research of red tides to reduce the loss, a semi-analytic algorithm to retrieve chlorophyll a concentrations was established in the area where red tides often brought out, according to the data collected during the red tides cruise in the East China Sea in April 2002. In the algorithm, empirical equations were made based on the coefficients from the in-situ data, including the optical properties of the research area. The in-situ data were used to validate the algorithm. The discrepancy of chlorophyll a absorption coefficients and concentrations are mainly located in the region of 30%. The root mean deviation of the chlorophyll a concentrations between the observed and the calculated is 0.24, the maximum relative deviation 40.93%, the mean relative deviation 18.83% and the correlation coefficient 0.83. The results show that the precision of the algorithm is high and the algorithm is fit for the research area.

Key words: red tides; semi-analytic algorithm; pigment

赤潮日益严重危害着中国海洋环境, 造成大量损失, 对其机理和预测预报的研究刻不容缓. 由于赤潮会引起水体颜色 (即水体的光谱特性) 发生改变, 因此, 可以利用水色遥感技术来探测和研究赤潮. 水色遥感赤潮研究分 2 部分组成: 水色成分反演算法及赤潮信息提取技术.

海水按其光学性质不同可划分为一类水体和二类水体^[1]. 东海赤潮高发区属二类水体. 因此, 对二类水体的遥感应用研究, 对于赤潮的预测和预报研究具有紧迫的现实意义. 二类水体水色成分反演, 采用较多的是半分析算法, 即通过结合辐射传输模型与经验方程实现水体组分的反演. 自从 Morel 等^[2]对该算法作了明确的科学描述以来, 不断有较成功的研究结果、应用实例发表. Tassan^[3]建立了针对 SeaWiFS 波段的近海三要素反演模型. Carder 等^[4]为 MODIS 发展的色素反演模式, 是建立在遥感反射比 (r_{rs}) 和后向散射系数 (b_b) 与吸收系数 (a) 比值

$b_b/(a + b_b)$ 两者之间关系的基础上. 以 675nm 的浮游植物吸收系数 $a_{ph}(675)$ 和 400nm 的黄色物质吸收系数 $a_g(400)$ 为变量, 使用可见光波段的 r_{rs} 来反演 $a_{ph}(675)$, 再利用 $a_{ph}(675)$ 和叶绿素 a 浓度的经验关系得出叶绿素 a 浓度值. Garver 等^[5]发展了基于 r_{rs} 和 $b_b/(a + b_b)$ 之间二次方关系的半分析模式. 通过预先确定比吸收系数和单位后向散射系数, 采用非线性统计方法来反演 $a_{ph}(441)$ 、其它颗粒物与溶解物质吸收系数 $a_{dm}(441)$ 以及颗粒物后向散射系数 $b_{bp}(441)$, 进而反演出色素浓度. Ruddick 等^[6]发展了基于红光和近红外 2 波段 672nm 和 704nm 反射率比值的半分析算法. Lee 等^[7]发展了多波段准分析算法 (QAA) 反演近岸水体总吸收、总

收稿日期: 2005-08-15; 修订日期: 2005-11-07

基金项目: 国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (2001CB409708)

作者简介: 丘仲锋 (1979~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为海洋水色遥感, E-mail: twinkleblue@163.com

* 通讯联系人, E-mail: heyj@ms.qdio.ac.cn

后向散射系数以及浮游植物、黄色物质吸收系数的光谱模型. 此外, Maritorena 等^[8], Boynton 等^[9]也采用半分析算法, 对固有光学量, 水体组分浓度进行反演.

由于二类水体成分的时空分布差异性极大及复杂的光学特性, 上述模式或实例并不能直接应用到中国近海, 特别是东海赤潮高发区. 因此, 发展适合中国近海水体的色素浓度算法是必要的.

本文根据 2002-04 东海赤潮调查航次(以下简称 2002 航次)的实测资料, 建立了半分析色素浓度反演算法. 以期为赤潮信息提取, 赤潮机理及预测预报研究提供帮助.

1 水体光学特性初步分析

如图 1 所示, 2002 航次测量了 46 个站点的水体组分吸光系数及叶绿素及悬浮物浓度等物理量.

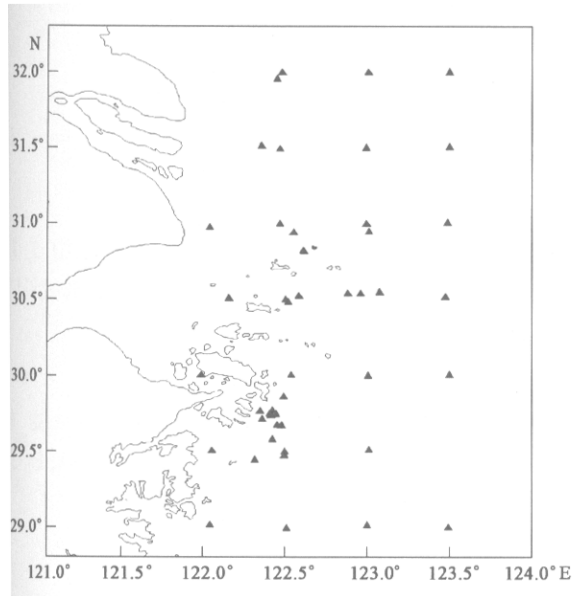


图 1 2002 航次站位图
Fig. 1 Location of the stations

由剖面辐射仪系统(PRR-800s)测量了 12 个站位的剖面光辐射数据, 推算出恰好位于水面下不同波长的 E_d 和 L_u , 即水面下行辐照度以及水面上行辐亮度. 将 L_u 和 E_d 的比率表示为遥感反射率 r_{rs} , 即 $r_{rs} = L_u / E_d$, 图 2 给出了部分特征光谱曲线.

用 Niskin 采水器采集分装水样, 得到用来测量黄色物质和非色素颗粒的样品. 总颗粒吸收系数、颗粒碎屑吸收系数及黄色物质吸收系数测量依据 NASA 海洋光学测量规范^[10, 11], 由 Carry-100 测量得到, 浮游植物吸收系数通过总颗粒吸收系数及颗

粒碎屑吸收系数求得. 叶绿素浓度测量根据 NASA 测量规范, 采用现场萃取荧光法和美国 Waters 公司生产的高效液相色谱仪 HPLC 系统(分析液氮保存样品)进行. 总悬浮物测定采用 NASA 规范介绍的重量法^[12].

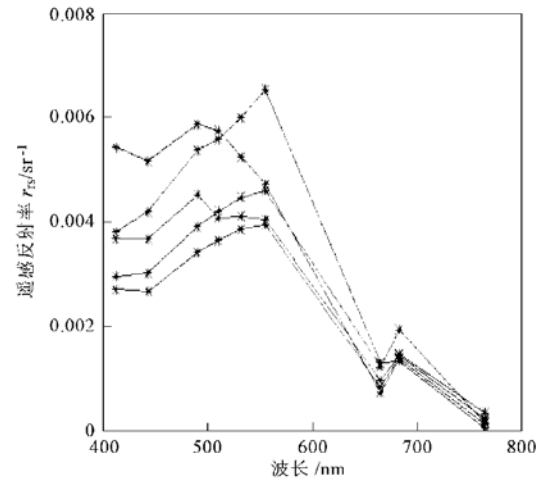


图 2 研究海区部分遥感反射率特征光谱
Fig. 2 Remote sensing reflectance spectrum in the studied waters

研究海区测量的叶绿素 a, 总悬浮物和黄色物质浓度范围如表 1.

表 1 研究海区水色三要素浓度的变化范围

项目	最小值	最大值	平均值
叶绿素 a / $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	0.246	62.91	8.132
总悬浮物 / $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	3.69	432.31	31.49
黄色物质 / m^{-1}	0.053 353 3	0.668 161	0.189 598 4

东海赤潮高发区固有光学特性复杂, 且有季节性变化, 目前尚没有可信度较高的、可用的固有光学特性数据直接用于半分析模式来反演水色要素. 本文根据 2002 航次实测资料, 对研究海区的水体光学特性进行初步分析.

叶绿素 a 吸收系数波段关系, 不同研究者采用不同的参考波段和拟合函数^[4, 13], 本文取 675nm 为参考波段, 采用 2 种不同方法.

一种是简单二阶函数拟合, 如下所示:

$$a_{ph}(\lambda) = a_0(\lambda) + a_1(\lambda) a_{ph}(675) + a_2(\lambda) a_{ph}(675)^2 \tag{1}$$

其中, $a_0(\lambda)$ 、 $a_1(\lambda)$ 和 $a_2(\lambda)$ 是与波长有关的经验系数.

另一种采用乘幂关系拟合, 如下所示:

$$a_{ph}(\lambda) = A(\lambda) a_{ph}(675)^{B(\lambda)} \tag{2}$$

其中, $A(\lambda)$ 和 $B(\lambda)$ 是与波长有关的经验系数. 由于有些吸收光谱曲线受测量过程中残余颗粒碎屑物等因素影响明显异常, 拟合过程中给予去除, 只选取质量良好的 38 个站位测量数据. 表 2 给出 2 种方法拟合结果的比较, 图 3 给出 2 种方法的偏差检验.

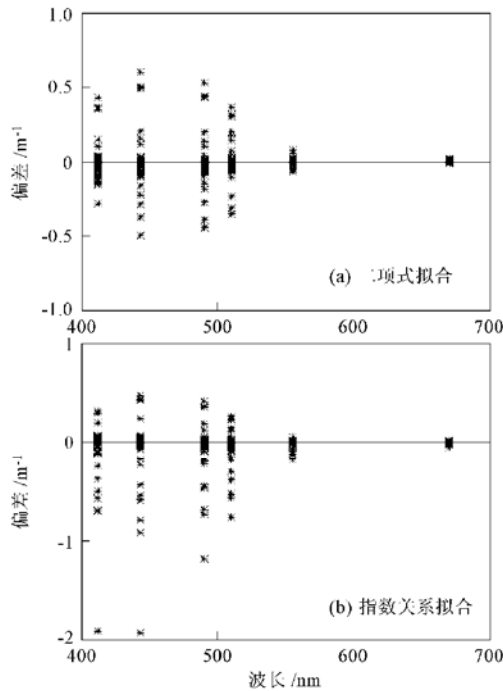


图 3 2 种拟合方法偏差比较

Fig. 3 Comparison of discrepancy between two simulation methods

从表 2 可见, 2 种拟合方法的相关性都很好; 从图 3 可以看出, 二项式拟合的结果更好于指数关系拟合. 图 3 中偏差最大的为 443nm 波段, 其与参考波段(675nm)的拟合效果比较用图 4 表示. 从图 4 也可以看出, 二项式的拟合结果比指数关系来得好. 因此, 这里采用二项式关系来拟合不同波段叶绿素 a 吸收系数. 叶绿素 a 浓度与吸收系数 $a_{ph}(675)$ 的关系可以表示为: $c_{chl a}=P_0\times a_{ph}(675)^{P_1}$ (3) 其中, P_0 和 P_1 为经验系数. 根据 2002 航次实测资料, 统计回归的结果为, P_0 取 21.728 039, P_1

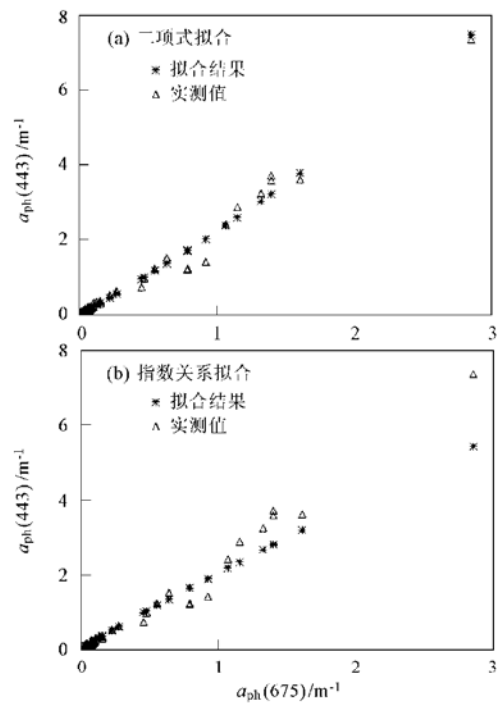


图 4 叶绿素 a 吸收系数拟合结果比较

Fig. 4 Comparison of chlorophyll a absorption coefficient between two simulation methods

取 0.996 22 ($R^2=0.960\ 164$), 回归曲线见图 5. 颗粒物吸收系数采用与叶绿素吸收类似乘幂形式^[14], 本文取参考波长为 440nm,

$$a_d(440)=A_0TSM^{-B_0}$$

(4)

其中, A_0 、 B_0 为经验系数, TSM 为总悬浮物浓度. 根据实测资料, 统计回归结果为, A_0 取 0.009 163, B_0 取 1.253 753 ($R^2=0.976\ 923$), 回归曲线见图 6.

2 多波段半分析算法

根据辐射传输理论分析及数值模拟基础, 水表下遥感反射率 $r_{rs}(\lambda)$ 可以表达为后向散射系数与吸收系数的函数. 特别地, $r_{rs}(\lambda)$ 的测量是后向散射系数与后向散射系数吸收系数之和比率 $u(\lambda)$ 的测

表 2 不同波长叶绿素吸收系数拟合结果/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 2 Simulation results of different wavelength chlorophyll absorption coefficients/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

波长/nm	$a_0(\lambda)$	$a_1(\lambda)$	$a_2(\lambda)$	R^2	$A(\lambda)$	$B(\lambda)$	R^2
412	0.035 388	1.517 833	0.185 534	0.996 003	1.580 728	0.852 831	0.997 164
443	0.011 289	2.005 821	0.214 451	0.996 777	2.061 345	0.924 058	0.999 258
490	−0.015 799	1.676 637	0.156 75	0.997 417	1.675 956	0.994 429	0.999 996
510	0.019 971	1.366 664	0.102 897	0.998 211	1.329 939	1.021 33	0.999 943
555	−0.002 131	0.483 035	0.004 097	0.999 971	0.447 921	0.961 954	0.999 815
670	0.000 349	0.889 472	0.010 946	0.999 939	0.898 184	1.002 467	0.999 999

量,通过已知 $r_{rs}(\lambda)$ 模型, $u(\lambda)$ 可从 $r_{rs}(\lambda)$ 通过关系式解析得出. 这里采用 Gordon 等^[15] 的公式,从 $r_{rs}(\lambda)$ 推导 $u(\lambda)$:

$$r_{rs}(\lambda) = g_0 u(\lambda) + g_1 [u(\lambda)]^2 \quad (5)$$

式(5)中 g_0 和 g_1 为经验系数.

$$u(\lambda) = \frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda) + b_b(\lambda)} \quad (6)$$

对于式(5)的系数, Lee 等^[7] 取 $g_0 = 0.0895$, $g_1 = 0.1247$, 这里采用 Lee 等^[7] 的取法.

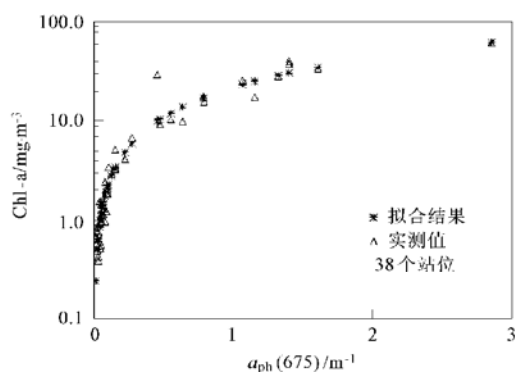


图5 叶绿素 a 浓度与吸收系数 $a_{ph}(675)$ 关系

Fig. 5 Relationship between chlorophyll-a concentrations and $a_{ph}(675)$

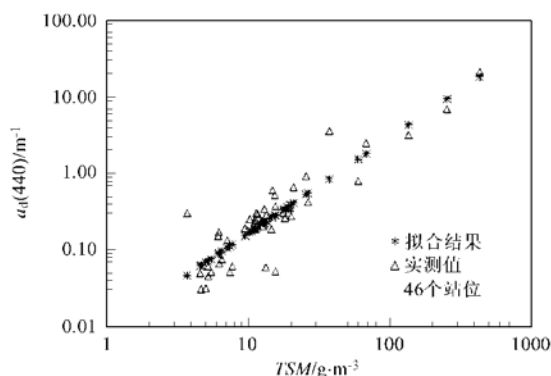


图6 TSM 与颗粒物吸收系数 $a_d(440)$ 的关系

Fig. 6 Relationship between TSM and $a_d(440)$

从式(5)可得:

$$u(\lambda) = \frac{-g_0 + [(g_0)^2 + 4g_1 r_{rs}(\lambda)]^{1/2}}{2g_1} \quad (7)$$

这样, $u(\lambda)$ 就从测量的 $r_{rs}(\lambda)$ 推导得出. 式(6)中, $a(\lambda)$ 为总吸收系数, $b_b(\lambda)$ 是总后向散射系数, λ 为波长.

总吸收系数 $a(\lambda)$ 为纯海水、黄色物质、颗粒碎屑和浮游植物吸收系数之和:

$$a(\lambda) = a_w(\lambda) + a_g(\lambda) + a_d(\lambda) + a_{ph}(\lambda) \quad (8)$$

其中, $a_w(\lambda)$ 表示纯海水吸收系数, 这里引用 Pope 等^[16] 的测量结果.

黄色物质吸收光谱一般采用如下形式:

$$a_g(\lambda) = a_g(\lambda_0) \exp[-S(\lambda - \lambda_0)] \quad (9)$$

其中 λ_0 为参考波长, 通常取为 400, 440 或 443nm, 这里取 λ_0 为 400nm. S 为光谱斜率, 表示吸收值随波长增加而下降的速率. 唐军武^[17] 通过黄、东海试验初步结果分析提出 S 取 0.0176. 这里沿用这一系数.

颗粒碎屑吸收光谱与黄色物质吸收光谱非常类似, 随波长增加呈指数规律下降:

$$a_d(\lambda) = a_d(\lambda_0) \exp[-S(\lambda - \lambda_0)] \quad (10)$$

这里采用朱建华等^[18] 的研究成果, 取 λ_0 为 440nm, S 值为 0.0103.

海水总后向散射系数可以分解为所有散射物质的贡献(因为黄色物质是溶解物, 故不考虑其散射):

$$b_b(\lambda) = b_{bw}(\lambda) + b_{bp}(\lambda) \quad (11)$$

其中, $b_{bw}(\lambda)$ 表示纯水后向散射系数, 采用 Smith 等^[19] 的研究结果; $b_{bp}(\lambda)$ 表示颗粒物的后向散射系数, 通常表示为:

$$b_{bp}(\lambda) = b_{bp}(\lambda_0) \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^n \quad (12)$$

这里根据丁静^[20] 的研究成果, 取 λ_0 为 532nm, n 用如下关系式表示:

$$n = 0.1954 b_{bp}(532)^{-0.326}$$

$$b_{bp}(532) < 0.01 \text{ m}^{-1} \quad (13)$$

对应 $TSM < 3 \text{ mg/L}$;

$$n = 0.81, b_{bp}(532) > 0.01 \text{ m}^{-1}$$

$$\text{对应 } TSM > 3 \text{ mg/L} \quad (14)$$

这样, $r_{rs}(\lambda)$ 可以表示成几个未知量 $a_g(400)$, $a_d(440)$, $a_{ph}(675)$ 和 $b_{bp}(532)$ 的函数. 对应 4 个未知量, 采用 4 个波段来建立方程, 根据式(6)可以建立非线性方程组.

$$u(\lambda) = \frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda) + b_b(\lambda)}$$

$$\lambda = 412, 443, 490, 555 \quad (15)$$

等式左边各项可以根据公式(7)求得, 右边各项可以表示成 $a_g(400)$, $a_d(440)$, $a_{ph}(675)$ 和 $b_{bp}(532)$ 的函数. 以 $r_{rs}(\lambda)$ 作为方程组的输入, 4 个未知量可以通过 4 个方程得到. 解方程采用 IDL 软件自带的 BROYDEN 函数.

得到 $a_{ph}(675)$, 通过关系式(3)就能算出叶绿

素 a 浓度.

3 结果与讨论

本文使用统计方法作为检验反演值和实测值是否一致的评判标准. 统计标准引用 2 种方法, 即均方根误差 (*RMS*) 和相对误差 (*RE*), 表达式分别见 (16) 和 (17).

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (X_{mod,j} - X_{obs,j})^2}{n}}$$

(16)

$$RE = \left| \frac{X_{mod} - X_{obs}}{X_{obs}} \right| \times 100\%$$

(17)

其中, $X_{mod,j}$ 是第 j 个反演值, $X_{obs,j}$ 是第 j 个实测值, n 是数据总量.

2002 航次得到 12 组 $r_{rs}(\lambda)$ 和叶绿素实测数据. 12 组数据获取时赤潮尚未发生, 而赤潮发生过程及发生后的实测光谱数据缺乏, 因此本文只能检验赤潮发生前算法的反演情况. 12 组实测数据中, 有 3 组 TSM 远大于 $30\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$, 且测量所得 $r_{rs}(\lambda)$ 及吸收光谱明显异常, 因此不参与算法检验.

算法反演得到的 675nm 波段叶绿素 a 吸收系数与实测值的偏差如图 7 所示, 叶绿素 a 浓度实测值与计算值的偏差见图 8.

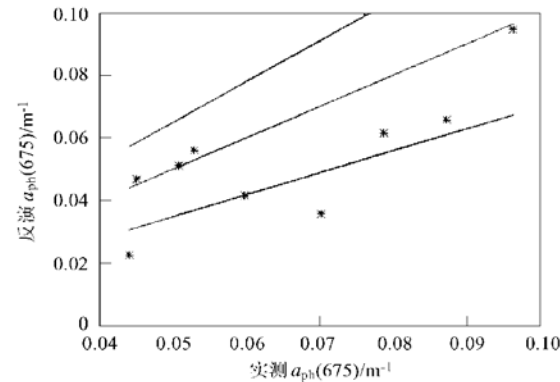


图 7 $a_{ph}(675)$ 实测与反演值比较

Fig. 7 Comparison of $a_{ph}(675)$ between the observed and retrieved

图 7 中上下 2 条实线分别为将实测值添加 $\pm 30\%$ 偏差的结果, 中间为 1:1 对角线, 星点表示计算结果. 从图 7 中可以看出, 一些 675nm 波段叶绿素 a 吸收系数 $a_{ph}(675)$ 反演结果很好地分布在 1:1 对角线上, 其它比实测值偏低, 基本分布在 -30% 线上. 从图 8 可以看到, 叶绿素 a 浓度反演结果基本位于 $\pm 30\%$ 偏差范围, 散落在 1:1 对角线两侧, 没有明显分布规律. 从图 7、图 8 看出, 反演与实测值误差基本在 30% 误差之内. 表 3 给出叶绿素 a 浓度反演

结果与实测值均方根偏差和相对误差. 从表中看出, 误差在一个较小范围, 相对误差最大为 40.93%, R^2 达到 0.83.

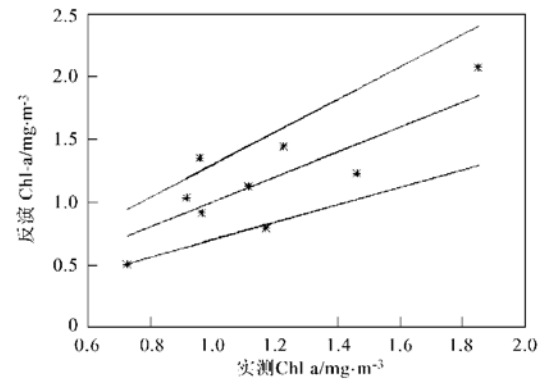


图 8 叶绿素 a 浓度实测与反演值比较

Fig. 8 Comparison of chlorophyll a concentrations between the observed and retrieved

表 3 叶绿素 a 浓度反演值与实测值的误差
Table 3 Discrepancy of chlorophyll a concentrations between the retrieved and observed

<i>RMS</i>	<i>RE</i> 最大值/%	<i>RE</i> 平均值/%	R^2
0.239 953	40.933 7	18.828 4	0.827 631

由此可见, 对于东海赤潮高发区, 本文研究的半分析算法对叶绿素 a 浓度的反演相对适用. 然而, 因为用来检验的实测数据均取自于赤潮发生前, 数据个数较少, 且基本上在叶绿素 a 浓度较低的站位取得, 不具有一般代表性. 因此, 要将算法实际应用, 还需更多实测数据进行检验及对算法进行调整. 此外, 算法对于 TSM 大于 $50.0\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 区域是不适用的, 计算结果出现负值. 因此, 在提高测量精度的同时, 应对算法进行调整或者发展新的算法, 以适用高 TSM 区域叶绿素 a 浓度的反演.

4 结论

(1) 根据 2002 航次实测结果, 初步分析了研究海区水体光学特性. 叶绿素 a 吸收系数波段之间的关系, 二项式拟合的结果更好于指数关系拟合; 叶绿素 a 吸收系数与浓度之间的关系, 系数分别为 21.728 039 和 0.996 22 ($R^2 = 0.960\ 164$); 颗粒物吸收系数与总悬浮物浓度之间的关系, 系数分别为 0.009 163 和 1.253 753 ($R^2 = 0.976\ 923$).

(2) 根据辐射传输理论分析及拟合的经验参数,

建立了东海赤潮高发区叶绿素 a 浓度半分析反演算法反演结果与实测数据相比, 均方根偏差为 0.239 953, 相对误差最大为 40.93%。结果表明, 对于东海赤潮高发区, 本文研究的半分析算法对叶绿素 a 浓度的反演相对适用。

致谢: 感谢东海赤潮调查 2002 航次参加人员数据采集分析工作, 感谢国家卫星海洋应用中心唐军武老师的指导, 感谢厦门大学曾银东和国家海洋技术中心朱建华提供的帮助。

参考文献:

- [1] Morel A, Prieur L. Analysis of variations in ocean color[J]. *Limnol. Oceanogr.*, **22**(4): 709~ 722.
- [2] Morel A, Gordon H R. Report of the working group of water color[J]. *Boundary Layer Meteorol.*, 1980, **18**: 343~ 355.
- [3] Tassan S. Local algorithms using SeaWiFS data for the retrieval of phytoplankton, pigments, suspended sediment, and yellow substance in coastal waters[J]. *Applied Optics*, 1994, **33**: 2369~ 2378.
- [4] Carder K L, Chen F R, Lee Z P, *et al.* Semianalytic moderate resolution imaging spectrometer algorithms for chlorophyll a and absorption with biooptical domains based on nitrate depletion temperatures[J]. *J. Geophys. Res.*, 1999, **104**: 5403~ 5421.
- [5] Garver S A, Seigel D A. Inherent optical property inversion of ocean color spectra and its biogeochemical interpretation 1. Time series from the Sargasso Sea[J]. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**(c8): 18607~ 18625.
- [6] Ruddick K G, Herman J G, Rijkeboer M, *et al.* Optical remote sensing of chlorophyll a in case 2 waters by use of an adaptive two-band algorithm with optimal error properties[J]. *Applied Optics*, 2001, **40**: 3575~ 3585.
- [7] Lee Z P, Carder K L, Arone R A. Deriving inherent optical properties from water color: a multiband quasi-analytical algorithm for optically deep waters[J]. *Applied Optics*, 2002, **41**(27): 5755~ 5772.
- [8] Maritorena S. Optimization of a semianalytical ocean color model for global scale applications[J]. *Applied Optics*, 2002, **41**(15): 2705~ 2714.
- [9] Boynton G C, Gordon H R. Irradiance inversion algorithm for absorption and backscattering profiles in natural waters: improvement for clear waters[J]. *Applied Optics*, 2002, **41**(12): 2224~ 2227.
- [10] Pegau S, Zaneveld J R V, Mitchell B G, *et al.* Inherent optical properties: instruments, characterizations, field measurements and data analysis protocols[A]. In: Mueller J L, Fargion G S, McClain C R. Ocean optics protocols for satellite ocean color sensor validation, Revision 4[C]. Maryland: NASA Goddard Space Flight Center, 2003. 76.
- [11] Mitchell B G, Bricaud A, Carder K, *et al.* Determination of spectral absorption coefficients of particles, dissolved material and hytoplankton for discrete water samples[A]. In: Mueller J L, Fargion G S, McClain C R. Ocean optics protocols for satellite ocean color sensor validation, Revision 2 [C]. Maryland: NASA Goddard Space Flight Center, 2000. 125~ 153.
- [12] Hooker S B, Zibordi G, Berthon J F, *et al.* Tower Perturbation Measurements in Above Water Radiometry[A]. In: Hooker S B, Firestone E R. NASA SeaWiFS postlaunch technical report series[C]. Maryland: NASA Goddard Space Flight Center, 2003. 6~ 43.
- [13] Lee Z P, Carder K L, Mobley C D, *et al.* Hyperspectral remote sensing for shallow waters. 1 A Semianalytical model[J]. *Applied Optics*, 1998, **37**: 6329~ 6338.
- [14] Bricaud A, Morel A, *et al.* Variations of light absorption by suspended particles with chlorophyll a concentration in oceanic (case 1) waters: Analysis and implications for biooptical models[J]. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**: 31033~ 31044.
- [15] Gordon H R, Brown O B, Evans R H, *et al.* A semi-analytic radiance model of ocean color[J]. *J. Geophys. Res.*, 1988, **93**: 90909~ 90924.
- [16] Pope R M, Fry E S. Absorption spectrum(380~ 700 nm) of pure water. 2. Integrating cavity measurements[J]. *Applied Optics*, 1997, **36**(33): 8710~ 8723.
- [17] 唐军武. 模块化二类水体相关遥感信息提取技术[R]. 北京: 国家卫星海洋应用中心, 2003.
- [18] 朱建华, 李铜基. 黄东海非色素颗粒与黄色物质的吸收系数光谱模型研究[J]. *海洋技术*, 2004, **23**(2): 7~ 13.
- [19] Smith R C, Baker K S. Optical properties of the clearest natural waters(200~ 800nm)[J]. *Applied Optics*, 1981, **20**: 177~ 184.
- [20] 丁静. 基于神经网络的二类水体大气修正与水色要素反演[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2004.