

基于两种半分析算法的水体吸收系数反演 *

汪文琦¹, 董 强¹, 商少凌¹, 吴璟瑜¹, 李忠平²

(1. 福建省教育部共建海洋环境科学联合重点实验室(厦门大学、福建海洋研究所), 福建 厦门 361005;

2. Northern Gulf Institute, Mississippi State University, MS 39529)

摘要: 基于 42 组不同年份不同季节获得的遥感反射率、水体各组分吸收系数的实测数据, 对 QAA (Quasi-Analytical Algorithm) 和 GSM (Garver-Siegel-Maritorena) 算法在寡营养的南海和富营养的福建沿岸两种不同类型水体的吸收系数反演进行了检验。以水样测量值为参考, 两种算法在本研究水体中的反演成效与他在其它水域的研究结果相当。QAA 算法在南海的反演成效高于福建沿岸水体。对于 443nm 的总吸收系数 $a(443)$, 南海的对数均方根误差 RMSE 为 0.044, 平均相对误差 ε 为 7.9%, 对数平均偏差 δ 为 0; 福建沿岸水体 RMSE=0.190, $\varepsilon=30.6%$, $\delta=-0.167$ 。GSM 算法在两类水体的反演成效类似, $a(443)$ 之 RMSE 和 ε , 南海分别为 0.156 和 27.7%, 福建沿岸分别为 0.146 和 32.1%; 但从 $a(443)$ 的 δ 值看, 其在南海反演值低于实测值 ($\delta=-0.142$), 在福建沿岸则略呈高于实测值 ($\delta=0.016$)。两种算法中的部分经验参数与实测值之间的差异是产生反演误差的主要原因, 为了提高反演精度, 对算法中经验参数的更进一步区域化调整可能是必要的。

关键词: 半分析算法; 吸收系数; 南海; 福建沿岸

中图分类号: TP79 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2009)05-0035-08

An evaluation of two semi-analytical ocean color algorithms for waters of the South China Sea

WANG Wen-qi¹, DONG Qiang¹, SHANG Shao-ling¹, WU Jing-yu¹, LEE Zhong-ping²

(1. Joint Key Laboratory of Coastal Study (Xiamen University, Fujian Institute of Oceanography), Xiamen 361005, China;

2. Northern Gulf Institute, Mississippi State University, MS 39529)

Abstract: With 42 in situ measurements of remote sensing reflectance and component absorption coefficients taken in the South China Sea and coastal waters off Fujian, China during different seasons, the authors evaluate the performance of the Quasi-Analytical Algorithm (QAA) and the Garver-Siegel-Maritorena (GSM) algorithm for water absorption coefficients. It is found that the retrieval performances of the two algorithms are similar to those of the algorithms by other researchers conducted in other regions. In this study, QAA performs better in the South China Sea than in the waters off coastal Fujian. For the total absorption coefficient at 443 nm $a(443)$, the root-mean-square error (RMSE) is 0.046 in the South China Sea, with an averaged percentage error (ε) of 7.9%, and averaged error in log scale (δ) close to 0. For the waters off coastal Fujian, RMSE, ε and δ are 0.194, 30.6%, and -0.167, respectively. The performance of the GSM is similar for the two waters. For $a(443)$, RMSE and ε are 0.161 and 27.7% in the South China Sea and 0.149 and 32.1% in the waters off coastal Fujian, respectively; their δ values, however, are negative (-0.142; indicating underestimation) in the South China Sea and positive (0.016; indicating slight overestimation) in the waters off coastal Fujian. Further analysis indicates that the differences between the empirical parameters employed in the algorithms and actual values of the studied waters are the main reasons causing the errors in remote sensing retrievals, therefore, it is necessary to regionally refine those parameters in order to improve the algorithm performance.

Key words: semi-analytical algorithm; absorption coefficient; South China Sea; coastal Fujian

收稿日期: 2009-01-12; 修订日期: 2009-04-07。孙淑杰编辑

基金项目: 863 计划项目(2006AA09A302, 2008AA09Z108); 国家自然科学基金项目(40521003)

通讯作者: 商少凌。slshang@xmu.edu.cn; slshang@gmail.com

* 厦门大学遥感与数值模拟研究组毕业及在学研究生马晓鑫、曾银东、周雯、李雪丁、朱钰和隋晓飞先后参加本研究各现场航次, 付出艰辛劳动。谨此一并致谢。

吸收系数属于水体固有光学特性 (IOPs) 之一, 其量值取决于水中有色成分的含量^[1], 而这些有色组分通常粗略区分为浮游植物、非藻类颗粒及有色溶解有机物质 (CDOM)。每一组分的吸收系数不但表示该组分在水中的含量, 也对环境变化起着调制作用。例如, 浮游植物吸收光进行光合作用, 就此启动整个碳链, 因此浮游植物的吸收系数是估算初级生产力的物理基础, 对于碳循环收支的估算具有决定性的作用。对于环球大洋和近岸水体, 尽可能地获取这些水体的 IOPs, 不但有利于水环境的监测, 对掌握碳通量的区域分布和时间变化也有非常重要的意义^[2,3]。受时空限制, 如同测量所有其他海洋学参数一样, 现场测量吸收系数不可能获得对水体的全面描述, 因而通过水色卫星反演成为获取多次、大范围海洋表层测量参数不可或缺的重要手段^[3]。

近年来, 水色遥感开始从早年的以叶绿素为中心的经验反演模式朝着以辐射传输理论为基础的物理反演的方向转换, IOPs 的反演逐渐得到重视。反演算法主要有经验算法、半分析算法、分析算法

三类^[3], 其中最具代表性并得到广泛接受和应用的是 QAA (Quasi-Analytical Algorithm)^[4,5]和 GSM (Garver-Siegel-Maritorena)^[6,7]两种半分析算法。2006 年, IOCCG (International Ocean-Colour Coordinating Group)^[3]基于全球 SeaBASS 实测生物光学数据集^[8]开展算法比较, 在 443 nm 波段各组分吸收系数的反演结果, QAA 算法的对数均方根误差 (RMSE) 和偏差 (bias) 略低于 GSM 算法 (表 1); 但是 QAA 算法在高吸收水体出现明显的低估, 而 GSM 算法则在低吸收水体出现明显的低估。Melin 等^[9]基于 SeaWiFS 卫星离水辐射率反演计算欧洲亚德里亚海北部一个近岸站点的吸收系数, 与 AC-9 现场测量结果相比, GSM 算法得到的 443nm 总吸收系数 $a(443)$ 、浮游植物吸收系数 $a_{ph}(443)$ 的反演误差低于 QAA 算法, CDOM 与非藻类颗粒吸收系数 $a_{dg}(443)$ 的反演结果则相反 (表 1)。但这些比较都未统一有效反演量, 由此而来的统计结果不一定具有代表性。除此之外, 算法在实际应用中的比较报道尚不多见。人们对于两种主流算法在各种水体中的表现如何、可能存在哪些问题仍缺乏了解。

表 1 不同研究者 QAA 算法、GSM 算法结果比较

Tab.1 Comparison of derived results between QAA and GSM by different researchers

	QAA				GSM				
	<i>n</i>	RMSE	bias	δ	<i>n</i>	RMSE	bias	δ	
IOCCG ^[3]	$a(443)$	656	0.175	-0.051	—	646	0.223	-0.129	—
	$a_{ph}(443)$	630	0.321	-0.062	—	646	0.350	-0.221	—
	$a_{dg}(443)$	630	0.221	-0.072	—	646	0.246	-0.103	—
Melin 等 ^[9]	$a(443)$	68	0.14	—	-0.03	69	0.11	—	0.02
	$a_{ph}(443)$	70	0.21	—	-0.13	51	0.16	—	0.08
	$a_{dg}(443)$	70	0.19	—	-0.01	70	0.22	—	-0.02

为了进一步促进 IOPs 半解析算法在中国水域的应用, 并进一步理解 QAA 和 GSM 的结果特征, 本研究将用在两类完全不同的水体中采集的实测遥感反射率 (R_{rs}) 光谱数据, 分别采用 QAA 和 GSM 算法进行反演, 将所获得的吸收系数与实测数据进行对比, 并对统计误差进行分析。这一结果对于大洋和近岸水体的反演都将具有参考价值。

1 数据来源和方法

本研究的第一类水体为寡营养的南海水, 南海虽属边缘海, 但其水体性质与大洋水体相近^[10], 通过 2006 年 11 月 26 日—12 月 27 日南海航次调查 (图 1a), 共获得 15 组数据。第二类水体为福建沿

岸典型二类水体 (图 1b), 通过 2003 年 6 月 2 日福建连江黄岐湾调查、2004 年 9 月福建沿岸航次、2004 年 5 月和 2005 年 6 月厦门湾定点调查, 共获取 27 组数据。

遥感反射率 (R_{rs} , sr^{-1}) 通过 GER1500 光谱仪采用水面之上法测量获得, 观测几何采用目前国际水色 SIMBIOS 计划推荐方法^[11,12], 具体操作过程参见美国 NASA (National Aeronautics and Space Administration) 发布的操作规范^[12]。 R_{rs} 按 (1) 式求得, 其中 L_w 为离水辐射率, $E_d(0_+)$ 为海面入射辐照度, 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, $\rho=50\%$ (50% 反射率漫反射板), r 为气-水界面对天空光的反射率, 取值 0.028^[13-15], Δ 取 R_{rs} 在 750nm 或 850nm (分别用于南海、福建沿岸水体)

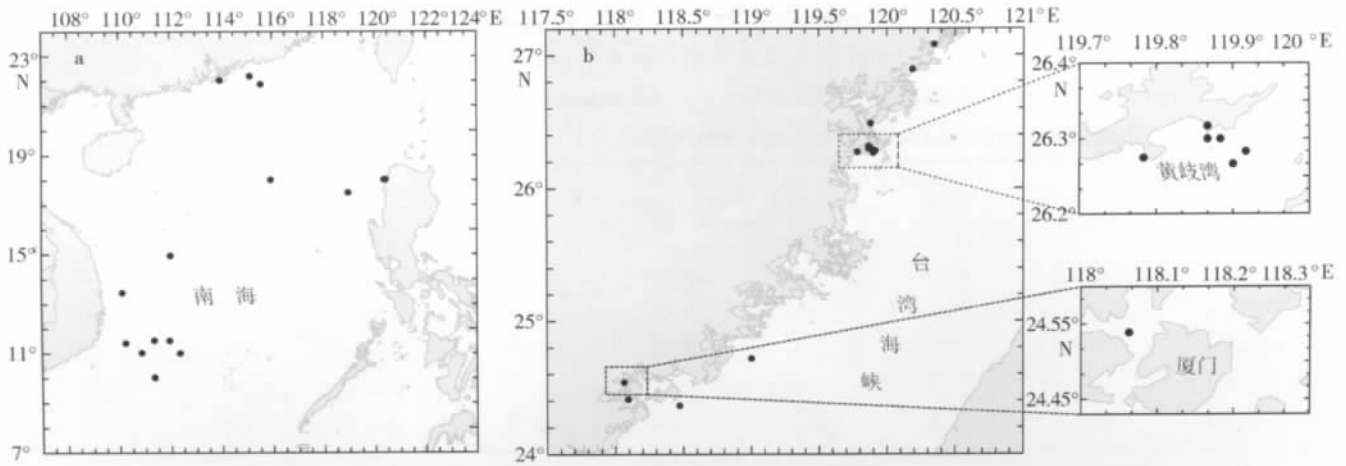


图 1 数据匹配站位图

a. 南海; b. 福建沿岸水体

Fig.1 Stations in the South China Sea(a)and waters off coastal Fujian(b)

的值，用于 R_{rs} 的归零。

$$R_{rs}(\lambda) = \frac{L_w(\lambda)}{E_d(0_+, \lambda)} = \rho \frac{L_u(\lambda) - rL_{sky}(\lambda)}{\pi L_{plaque}(\lambda)} - \Delta \quad (1)$$

浮游植物、非藻类颗粒、CDOM 吸收系数（前二者合称颗粒吸收系数）的采集、测量均严格按照国际通用操作方法^[16]。简言之，过滤一定体积的水样（滤膜为 $0.7\mu\text{m}/25\text{mm}$ GF/F），获取颗粒吸收样品膜；在积分球模式下用 Cary 100 紫外可见分光光度计测定样品膜相对空白膜的吸光度，计算总颗粒吸收系数；用甲醇萃取去除样品膜上的色素，重新测定样品膜的吸光度，计算可得非藻类颗粒吸收系数，浮游植物吸收系数为二者的差值。其中，光程放大系数采用 Cleveland 等^[17]的研究结果，具体流程参考吴璟瑜文^[18]。CDOM 水样过滤采用 $0.2\mu\text{m}$ 聚碳酸酯滤膜，样品测定仪器同样为 Cary 100（10 cm 石英比色皿），详细方法参考 Hong 等^[19]。

水体吸收系数反演方法分别采用 QAA (v5) 和 GSM01 算法，具体计算方法分别参见 Lee 等 (<http://www.ioccg.org/groups/software.html>)^[4,5] 和 Maritorena 等^[7]。简言之，QAA 先据经验关系推算出某一参考波长（通常取 550nm 或 555nm）的总吸收系数，再根据 R_{rs} 的物理模式算出在该波长的后向散射系数，通过散射系数的波长关系式将此散射系数推至其它波段，则可由 R_{rs} 经其物理模式算出水的总吸收系数。考虑到 a_{ph} 和 a_{dg} 的不同光谱特征，二者可由总吸收系数进一步分解得到，因而 QAA 求解是纯解析过程。而 GSM 虽也采用同一 R_{rs} 物理模式，但其是用优化法数值求解，具体做法是先模拟 a_{ph} 和 a_{dg} 光谱和颗粒后向散射光谱，由此将 R_{rs} 光谱用 3 个变量来表述，当实测 R_{rs} 有 3 个以上的光谱通道时，这 3 个变量则有可能通过比较 R_{rs} 的模拟值和实测

值，采用优化法进行数值求解。

比较反演结果与实测结果的统计参数采用平均相对误差 (ε)、对数均方根误差 (RMSE) 和对数平均偏差 (δ)^[9]。各参数计算公式如下，其中 x_i^{der} 表示反演结果， x_i^{mea} 表示实测值， n 表示样本的数量。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\lg x_i^{dir} - \lg x_i^{mea})^2} \quad (2)$$

$$\varepsilon = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{x_i^{dir} - x_i^{mea}}{x_i^{mea}} \right| \right) \times 100\% \quad (3)$$

$$\delta = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\lg x_i^{dir} - \lg x_i^{mea}) \right) \times 100\% \quad (4)$$

2 结果

2.1 QAA 算法在两类水体中的反演结果

QAA 算法的反演结果如表 2、图 2a—c 所示（篇幅所限，仅用 443nm 波段结果作图）。

就 443nm 的总吸收系数 $a(443)$ 而言，反演结果与实测值在两种水体均具有较好的相关性（南海： $r^2=0.97$ ；福建沿岸水体： $r^2=0.80$ ）。然而，误差统计结果在两种水体之间存在较大差异。首先，南海 $RMSE=0.044$ ， $\varepsilon=7.9\%$ ，均小于福建沿岸水体的结果 ($RMSE=0.190$ ， $\varepsilon=30.6\%$)；其次，由对数平均偏差结果可见，福建沿岸水体反演结果明显偏低 ($\delta=-0.167$)，而南海反演结果与实测结果非常接近 ($\delta=0.000$)。由此可见，总吸收系数的反演精度在南海要高于福建沿岸水体。

a_{dg} 反演结果，在南海表现为与实测结果较为接近 ($RMSE=0.154$ ， $\delta=0.038$)，而在福建沿岸水体则表现为明显低估 ($\delta=-0.319$)， $RMSE$ 在南海 (0.154) 低于

表 2 QAA 算法在两类水体中的总吸收系数 (a)、浮游植物吸收系数 (a_{ph})、
CDOM 与非藻类颗粒吸收系数 (a_{de}) 反演结果

Tab.2 Comparison of total absorption coefficients (a), phytoplankton absorption coefficients (a_{ph}), CDOM and detrital absorption coefficients (a_{de}) derived by QAA between the two types of water

	南海水体 ($n=15$)				福建沿岸水体 ($n=27$)			
	RMSE	$\epsilon / \%$	r^2	δ	RMSE	$\epsilon / \%$	r^2	δ
$a(412)$	0.072	12.5	0.97	0.020	0.203	30.9	0.61	-0.170
$a(443)$	0.044	7.9	0.97	0.000	0.190	30.6	0.80	-0.167
$a(490)$	0.048	8.9	0.96	0.020	0.138	23.6	0.91	-0.113
$a(510)$	0.034	7.8	0.94	0.020	0.121	20.8	0.90	-0.090
$a(555)$	0.016	3.0	0.94	0.001	0.094	16.4	0.75	-0.053
$a_{ph}(412)$	0.100	19.6	0.96	-0.011	0.223	43.6	0.80	-0.031
$a_{ph}(443)$	0.105	20.8	0.94	-0.021	0.209	38.0	0.83	-0.038
$a_{ph}(490)$	0.160	34.6	0.90	0.080	0.251	62.8	0.87	0.095
$a_{ph}(510)$	0.272	74.9	0.84	0.154	0.292	82.9	0.86	0.150
$a_{ph}(555)$	0.510	192.6	0.88	0.129	0.427	168.8	0.69	0.309
$a_{de}(412)$	0.149	27.4	0.95	0.045	0.399	43.1	0.01	-0.285
$a_{de}(443)$	0.154	32.8	0.94	0.038	0.426	45.8	0.02	-0.319
$a_{de}(490)$	0.181	37.7	0.91	0.009	0.471	52.3	0.05	-0.386
$a_{de}(510)$	0.198	38.8	0.91	-0.009	0.492	55.4	0.06	-0.415
$a_{de}(555)$	0.243	38.9	0.89	-0.061	0.541	61.7	0.08	-0.482

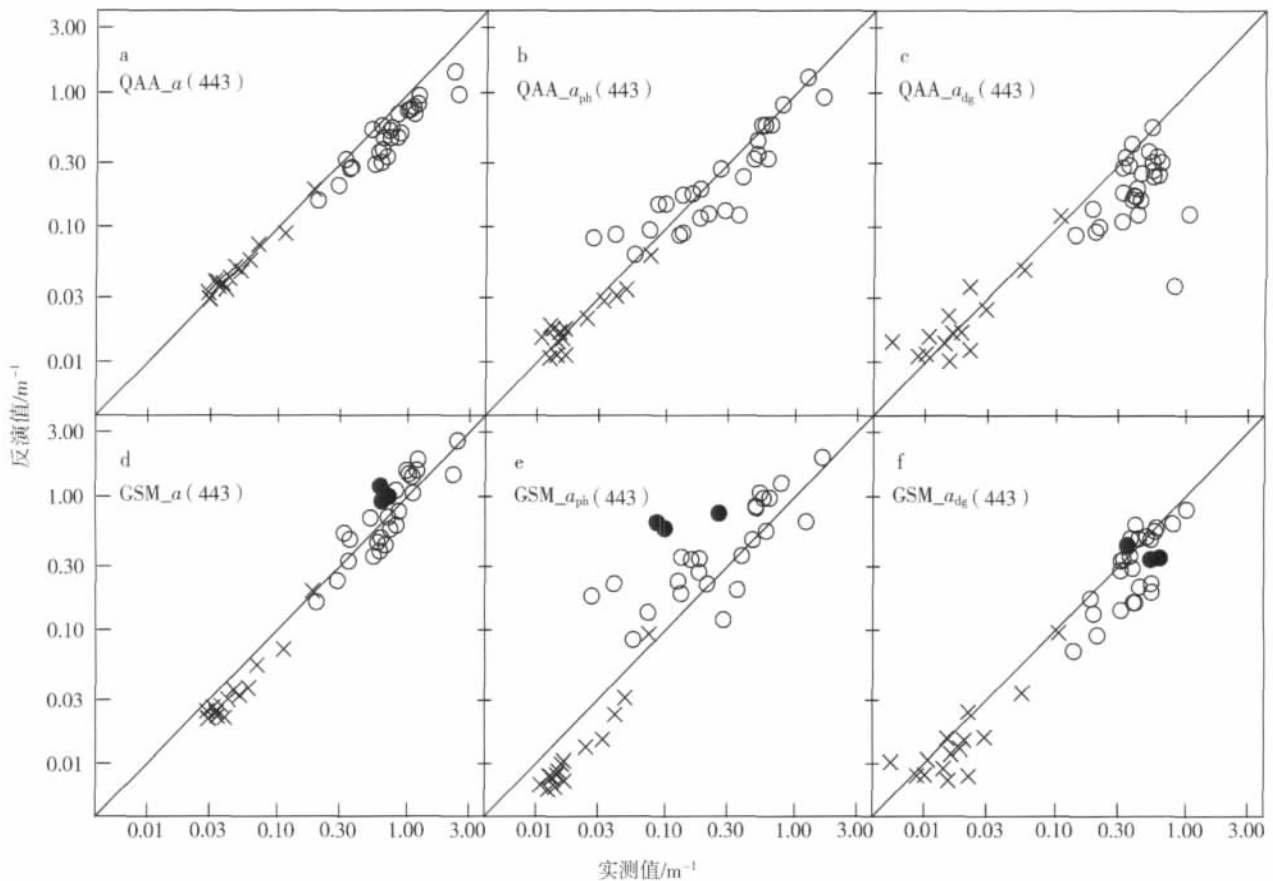


图 2 QAA 与 GSM 算法反演在 443nm 的吸收系数与实测值的比较

a—c.QAA 算法; d—f. GSM 算法。其中实心圆为 GSM 算法中超出范围的数据点; ×为南海水体; ○为福建近岸水体

Fig.2 Scatter plots of the QAA and GSM algorithm derived absorption coefficients versus measured data at 443 nm for different components, with (a-c) for QAA and (d-f) for GSM. Symbols × and ○ represent the South China Sea and the coastal Fujian waters, respectively. The solid lines represent 1:1 ratio, and the solid circles refer to data beyond the GSM ranges

福建沿岸水体 (0.426)，福建沿岸水体反演结果与实测值相关系数极低 ($r^2=0.02$)，其原因是有两个点出现极低的反演值。

a_{ph} 反演精度各指标，南海 (RMSE=0.105, $\varepsilon=20.8\%$, $\delta=-0.021$) 优于福建沿岸水体 (RMSE=0.209, $\varepsilon=38.0\%$, $\delta=-0.038$)。由 δ 结果可以看出，QAA 算法在南海与福建沿岸均与实测结果较为接近。

比较表 2 与表 1，可见南海各组分反演结果的 RMSE 低于 IOCCG^[3]、Melin 等^[9]的结果，而福建沿岸水体 a 与 a_{dg} 的反演结果的 RMSE 较大， a_{ph} 反演结果与 Melin 等^[9]的结果非常接近。就总体趋势而言，则与 Melin 等^[9]的研究结果类似，即两类水体 a 的反演精度在 412nm 较其它波段略有下降，与 a 相比， a_{ph} 与 a_{dg} 反演精度下降。

2.2 GSM 算法在两类水体中的反演结果

GSM 算法反演结果如图 2d—f、表 3 所示。据 GSM 算法输出结果限制条件 ($0 < [Chl.a] < 100.0 \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $0 < a_{dg}(443) < 2.0 \text{m}^{-1}$ 、 $0.0001 < b_{bp}(443) < 0.1 \text{m}^{-1}$ ， b_{bp} 为颗粒后向散射系数)，福建沿岸水体中有 3 个站位数据的颗粒后向散射系数反演结果超出此范围 (2003 年连江黄岐湾的两个站位和 2004 年厦门湾 5 月 24 日数据， $b_{bp}(443)$ 的反演结果为 $0.176\text{—}0.200 \text{m}^{-1}$)，但其它两个

输出参数则落在算法限制范围内。考虑到本研究水域为极近岸二类水体，本研究仍将此 3 个点的结果 (图 2d—f 中的实心圆点) 纳入到算法的有效反演结果中并进行统计。

各参数反演结果的相关系数在南海均高于福建沿岸水体。 $a(443)$ 在两类水体反演结果的 RMSE、 ε 的值比较接近，但 δ 值在南海偏低 ($\delta=-0.142$)，在福建沿岸则偏高 ($\delta=-0.016$)。 $a_{ph}(443)$ 反演结果，南海 RMSE=0.247，低于福建沿岸水体 (RMSE=0.384)，但是在南海水体呈现低估实测值的趋势 ($\delta=-0.225$)，而在福建沿岸水体则表现为高估 ($\delta=0.230$)； $a_{dg}(443)$ 反演结果在南海 (RMSE=0.197, $\delta=-0.113$) 与福建沿岸水体 (RMSE=0.228, $\delta=-0.135$) 类似，均有明显低估。

由表 3 与表 1 比较可见，两类水体各组分 (除 $a_{ph}(443)$ 外) 反演的 RMSE 均小于 IOCCG^[3] 的结果，但大于 Melin 等^[9]的结果，这可能源于它们三者的数据量和范围的不同。若论总体趋势， $a_{ph}(412)$ 反演结果偏低最为严重 (南海：RMSE=1.045, $\delta=-1.042$ ；福建沿岸水体：RMSE=0.715, $\delta=-0.641$)，这与 Melin 等^[9]的研究结果类似 (RMSE=0.78, $\delta=-0.76$)。

表 3 GSM 算法在两类水体中的总吸收系数 (a)、浮游植物吸收系数 (a_{ph})、CDOM 与非藻类颗粒吸收系数 (a_{dg}) 反演结果

Tab.3 Comparison of total absorption coefficients (a), phytoplankton absorption coefficients (a_{ph}), CDOM and detrital absorption coefficients (a_{dg}) derived by GSM between the two types of water

	南海水体 (n=15)				福建沿岸水体 (n=27)			
	RMSE	$\varepsilon / \%$	r^2	δ	RMSE	$\varepsilon / \%$	r^2	δ
$a(412)$	0.203	33.1	0.96	-0.183	0.208	30.0	0.71	-0.165
$a(443)$	0.156	27.7	0.94	-0.142	0.146	32.1	0.70	0.016
$a(490)$	0.177	31.6	0.92	-0.168	0.208	30.5	0.71	-0.160
$a(510)$	0.076	13.9	0.95	-0.066	0.173	27.4	0.66	-0.110
$a(555)$	0.030	4.5	0.95	-0.020	0.142	26.2	0.55	-0.072
$a_{ph}(412)$	1.045	90.7	0.92	-1.042	0.715	69.7	0.63	-0.641
$a_{ph}(443)$	0.247	42.0	0.86	-0.225	0.384	133.8	0.65	0.230
$a_{ph}(490)$	0.440	61.9	0.85	-0.430	0.300	62.0	0.64	-0.002
$a_{ph}(510)$	0.204	35.4	0.95	-0.195	0.320	89.0	0.61	0.116
$a_{ph}(555)$	0.274	79.1	0.98	0.199	0.398	147.7	0.57	0.257
$a_{dg}(412)$	0.153	24.5	0.94	-0.039	0.181	31.3	0.55	-0.051
$a_{dg}(443)$	0.197	30.2	0.93	-0.113	0.228	29.6	0.54	-0.135
$a_{dg}(490)$	0.306	44.4	0.90	-0.243	0.337	42.9	0.46	-0.277
$a_{dg}(510)$	0.358	49.7	0.89	-0.304	0.389	49.2	0.42	-0.338
$a_{dg}(555)$	0.481	60.8	0.87	-0.453	0.512	62.7	0.37	-0.477

3 讨论

3.1 QAA 算法误差分析

由上可见, QAA 算法在南海的反演结果优于福建沿岸水体, 我们认为其主要原因可能在于 QAA 算法总吸收反演过程中的一个主要经验函数(555nm 的总吸收系数函数)的准确性随水体的复杂性发生变化。本研究水体中, 根据算法中的经验函数得到的 $a(555)$ 计算值低估了本数据中的部分 $a(555) > 0.3 \text{ m}^{-1}$; 而对 $a(555) \leq 0.3 \text{ m}^{-1}$ 的数据, 反演值与实测值非常一致(RMSE=0.057)。高吸收区的实测结果(图3), 据 R_{rs} 的物理模式, 由此推算的颗粒后向散射系数 $b_{bp}(555)$ 将会被低估, 进而由该波段推算出其它波段的总吸收系数也可能出现低估现象。我们试验将实测 $a(555)$ 数据取代经验函数的计算值, 重新进行 QAA 计算, $a(443)$ 的反演结果增幅达到 19.4% (δ 值由 -0.167 变化为 -0.115)。

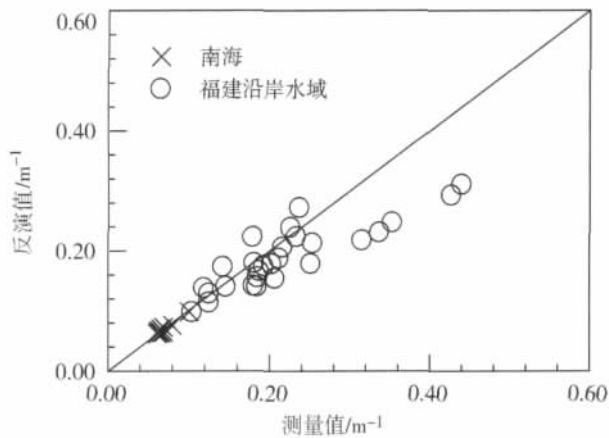


图3 水体 555nm 总吸收系数 $a(555)$ 的实测值与 QAA 计算值的比较

Fig.3 Comparison between the QAA derived total absorption coefficients and measured data at 555nm

另一方面, a_{ph} 和 a_{lg} 的反演结果来源于由总 a 的分解, 由算法计算过程^[4]可以看出, 其精度首先取决于 $a(412)$ 、 $a(443)$ 的反演精度。对于福建沿岸水体, 总吸收反演的偏低是导致 a_{ph} 和 a_{lg} 产生较大误差的最主要原因。

需要指出的是, $a_{lg}(443)$ 的反演结果出现两个显著的离散点, 相对误差分别高达 87.8%、95.5%, 这是本研究实测数据集中的两个 $a_{lg}(443)$ 最高值(图 2c), 与之对应的同样是 $a(443)$ 的峰值(图 2a), 它们出现在 2003 年 6 月连江黄岐湾(图 1b)。彼时系一场严重赤潮事件的末期, 赤潮种类为甲藻(*Gyrodinium mikimotoi* 和 *Prorocentrum triestinum*), 该两个采样站点位于水色污浊的码头, 其余 4 个采

样点在码头外, 水色相对正常。图 4 给出了该 6 个站位的实测吸收系数结果, 两个高值站(图 4 中以实线表示)均具有高 CDOM [$a_g(443)$ 分别为 0.776、0.563 m^{-1}]、高 a_{ph} [$a_{ph}(443)$ 分别为 1.216、1.613 m^{-1}] 特性, $a(443)$ 已高于 2.0 m^{-1} , 明显高于福建沿岸水体其它站位的平均结果 ($a_{ph}(443) = 0.295$ 、 $a_g(443) = 0.202$), 实际上如此极端的水色状况鲜见报道。看来 QAA 算法目前的参数设置难以实现该类极端条件的精确反演。若限制 $a(443) < 2.0 \text{ m}^{-1}$ 进行误差统计, 对于福建沿岸水体, $a(443)$ 的 RMSE、 ε 、 δ 分别为 0.178、29.1%、-0.156, $a_{lg}(443)$ 则分别为 0.301、42.1%、-0.255。

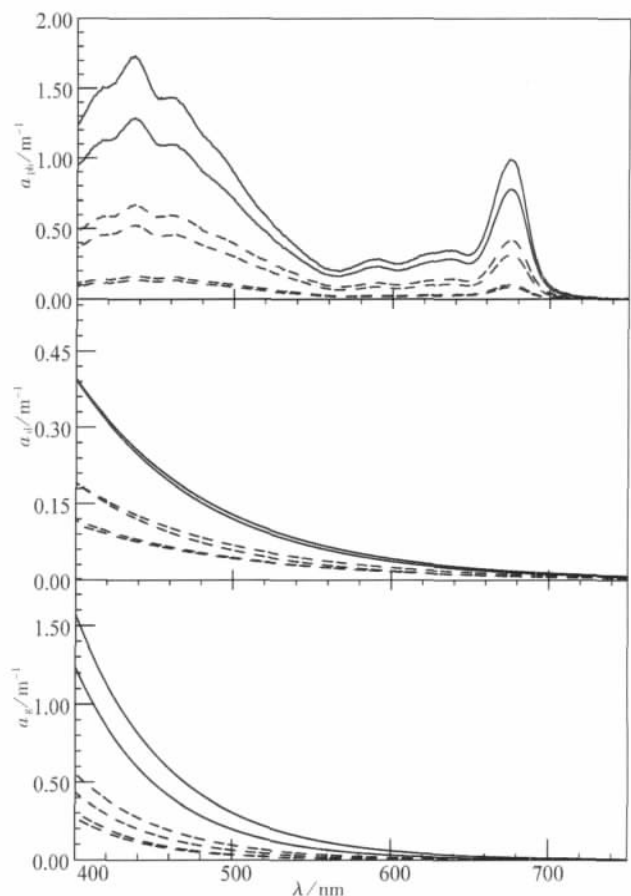


图4 2003年6月黄岐湾浮游植物(a_{ph})、非藻类颗粒(a_d)、CDOM(a_g) 实测结果

Fig.4 Spectra of absorption coefficients of phytoplankton (a_{ph}), detritus (a_d) and CDOM (a_g) at the Huangqi Bay in June 2003

3.2 GSM 算法误差分析

GSM 算法在两类水体中的反演效果较为接近, 都存在一定程度的误差。该优化算法主要针对全球大洋水体, 以叶绿素 a 为主要反演目标, 其主要输入参数 a_{lg} 的光谱斜率(S)、光谱依存函数指数(Y)、浮游植物比叶绿素吸收系数(a_{ph}^*), 则是在一套准实测数据库(以实测叶绿素、 R_{rs} 、443nm 的漫

衰减系数 $K_d(443)$ ，采用生物光学模型模拟出用于该算法的数据库)的基础上，进行优化得到，其结果 S 值为 0.0206， Y 值为 1.0337， a_{ph}^* 在 412、443、490、510、555、670nm 波段的值分别为 0.006 65、0.055 82、0.020 55、0.019 10、0.010 15、0.014 24。其中 a_{ph}^* 值与 Bricaud 等^[20]、Morel^[21]的研究结果相比，在 412、490nm 波段呈现明显偏低的现象^[7]。考虑到 a_{ph} 的结果是通过算法输出的叶绿素与 a_{ph}^* 的乘积得到，因此这将导致 a_{ph} 反演结果在 412、490nm 波段明显偏低，这与 Melin 等^[9]及本研究的结果是一致的。同时在进行优化数值求解时，作为对 $a_{ph}(412)$ 波段低估值的补偿， a_{443} 计算结果将会有

所高估，因此 GSM 算法对 a_{443} 的结果进行了校正^[7]。

分别将南海、福建沿岸水体实测 a_{ph} 的平均结果代入算法中，光谱依存函数指数 Y 在南海取 QAA 算法的经验结果，假定福建沿岸水 Y 值为 2.0，不改变 S 值，用 GSM 算法重新进行计算(同时不对 a_{443} 计算结果进行校正)，结果见图 5。南海水体在 443nm 处总吸收系数(RMSE=0.057、 $\varepsilon=10.1\%$ 、 $\delta=-0.026$ 、 $r^2=0.97$)与浮游植物吸收系数(RMSE=0.083、 $\varepsilon=16.5\%$ 、 $\delta=0.044$ 、 $r^2=0.96$)反演结果与表 3 相比得到明显的提高， a_{443} 则与原来的反演结果没有明显差别。对于福建沿岸水体，在高吸收的黄岐湾出现两个反演无效点，而反演最终结果没有得到明显改善。

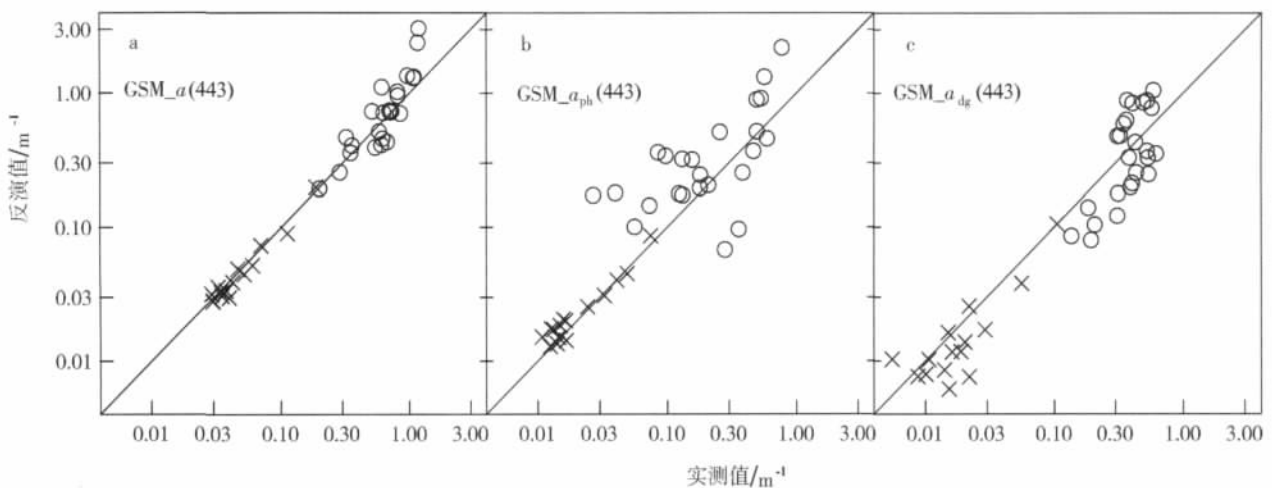


图 5 调整部分经验参数后，GSM 算法反演 443nm 吸收系数与实测值的比较

x 为南海水体， $n=15$ ；o 为福建近岸水体， $n=25$

Fig.5 Scatter plots of the GSM algorithm derived absorption coefficients versus measured data at 443 nm for different components

由以上分析可以看出 GSM 算法的输入变量(经验参数)对算法反演结果产生的影响。问题在于这些经验参数本身存在时空变化，难以用常量来表达，尤其如 a_{ph}^* ，其随着浮游植物类群结构的变化以及对光的适应而变化。因此，根据区域水体生物光学特性，通过生物光学模型减小算法中输入参数与实测值的差异，可能是提高该算法反演精确度的有效途径。

4 结 论

本研究选择南海和福建沿岸水体，以表面水样的测量值为参考，检验 QAA 和 GSM 两种主流半分析算法反演水体吸收系数的适用性。结果表明，两种算法在本研究水体中的反演结果与现有的报道接近。对南海水体，QAA 的反演结果与水样测量非常一致，该结果高于现有的报道；但在福建沿岸高吸收水体中，QAA 反演的总吸收系数、CDOM 与非

藻类颗粒的吸收系数出现低估于水样测量值的趋势，且分组分吸收系数的反演精度低于总吸收系数。GSM 在两种水体中的反演没有显著差异，但在水色性质接近开阔大洋的寡营养南海水体中，反演的总吸收系数、浮游植物吸收系数出现了低于水样测量值的趋势。

我们认为，未来利用区域实测数据集对 QAA 算法中的经验值作适当改进，将有助于进一步提高其在沿岸水体(特别是高吸收水体)中的适用性；对于 GSM 算法，根据区域实测数据集调整预设的关键生物光学参数，可能是提高其精度的一个解决途径。应指出的是，本研究所依据的区域实测数据集仍相当有限，且只以水样测量值为参考，对分析、了解两算法的应用特征和误差状态难免还不够全面。在继续丰富近海数据集的基础上，同时采用多种测量方法获得的数据进行更深入的研究，对完善海岸水 IOPs 的反演将是十分必要的。

参考文献:

- [1] PREISENDORFER R W. A survey of theoretical hydrologic optics[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 1968, 8(1): 325—338.
- [2] BEHRENFELD M J, O'MALLEY R T, SIEGEL D A, et al. Climate-driven trends in contemporary ocean productivity [J]. *Nature*, 2006, 444(7120): 752—755.
- [3] LEE Z P. Remote sensing of inherent optical properties: Fundamentals, tests of algorithms, and applications [M]. Dartmouth, Canada: International Ocean-Colour Coordinating Group, 2006: 73—93.
- [4] LEE Z P, CARDER K L, AMONE 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.
- [5] LEE Z P, WEIDEMANN A, KINDLE J, et al. Euphotic zone depth: Its derivation and implication to ocean-color remote sensing [J]. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 2007, 112(C03009): doi: 10.1029/2006JC003802.
- [6] GARVER S A, SIEGEL D A. Inherent optical property inversion of ocean color spectra and its biogeochemical interpretation. Time series from the Sargasso Sea [J]. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 1997, 102(C8): 18607—18625.
- [7] MARITORENA S, SIEGEL D A, PETERSON A R. Optimization of a semi-analytical ocean color model for global-scale applications [J]. *Applied Optics*, 2002, 41(15): 2705—2714.
- [8] HOOKER S B, CENTER G S F. The SeaWiFS Bio-optical Archive and Storage System (SeaBASS), Part 1. National Aeronautics and Space Administration [M]. Goddard Space Flight Center; National Technical Information Service, 1994: 40.
- [9] MELIN F, ZIBORDI G, BERTHON J F. Assessment of satellite ocean color products at a coastal site [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 110(2): 192—215.
- [10] WU JINGYU, HONG HUASHENG, SHANG SHAOLING, et al. Variation of phytoplankton absorption coefficients in the northern South China Sea during spring and autumn [J]. *Biogeosciences Discussions*, 2007, 4: 1555—1584.
- [11] FARGION G S, MUELLER J L. Ocean optics protocols for satellite ocean color sensor validation, Revision 3 [R]. NASA/TM-2002-21004, 2002.
- [12] MOBLEY C D. Estimation of the remote-sensing reflectance from above-surface measurements [J]. *Applied Optics*, 1999, 38: 7442—7455.
- [13] 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 [J]. *海洋技术*, 2000, 19(3): 11—16.
- [14] 唐军武, 田国良, 汪小勇, 等. 水体光谱测量与分析: 水面以上测量法 [J]. *遥感学报*, 2004, 8(1): 37—44.
- [15] 隋晓飞, 商少平, 马晓鑫, 等. 剖面法与水面之上法测量水面下遥感反射率的比较 [J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2007, 46(S1): 6—11.
- [16] MITCHELL B, G, BRICAUD A, CARDER K. Determination of spectral absorption coefficients of particles, dissolved material and phytoplankton for discrete water samples [R]// FARGION G S, MUELLER J L. Ocean Optics Protocols For Satellite Ocean Color Sensor Validation, Revision 2. Greenbelt, Maryland: NASA Goddard Space Flight Space Center, 2000: 125—153.
- [17] CLEVELAND J S, WEIDEMANN A D. Quantifying absorption by aquatic particles: a multiple scattering correction for glass-fiber filters [J]. *Limnology and Oceanography*, 1993, 38(6): 1321—1327.
- [18] 吴璟瑜. 中国东南近海光吸收特性研究 [D]. 厦门: 厦门大学, 2006.
- [19] HONG HUASHENG, WU JINGYU, SHANG SHAOLING, et al. Absorption and fluorescence of chromophoric dissolved organic matter in the Pearl River Estuary, South China [J]. *Marine Chemistry*, 2005, 97(1—2): 78—89.
- [20] BRICAUD A, MOREL A, BABIN M, 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]. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 1998, 103(C13): 31033—31044.
- [21] MOREL A. Optical modeling of the upper ocean in relation to its biogenous matter content (case 1 waters) [J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 1988, 93(C9): 10749—10768.