

文章编号: 1007-4619(2006)05-0732-10

中国近岸浑浊水体大气修正的迭代与优化算法

丁 静, 唐军武, 宋庆君, 王晓梅

(国家卫星海洋应用中心, 北京 100081)

摘 要: 中国近岸水体泥沙含量较高,且变化梯度大;泥沙浓度可从几千 mg/l 变化到 1mg/l 以下。针对上述浑浊二类水体的大气修正一直是水色遥感应用的难点之一。利用水体近红外固有光学特性的 A mone 光谱迭代算法在泥沙含量较低时适用,其近红外光谱迭代关系与根据 2003 年春季黄东海水色试验数据得出的现场光谱关系大致相当。当泥沙含量达到某一程度时,该算法失效,导致蓝光等较短波段的离水辐亮度为负。根据现场数据分析结果,这一分界点大概在泥沙浓度 10—20mg/l 因此,本文首次提出将中国近岸浑浊水体进一步区分为中低和中高浑浊水体,并给出初步的划分标准,采用光谱优化方法对中高浑浊水体进行水色大气修正。优化误差函数的选取以现场试验获取的可见光波段光谱关系式为基础。结果表明,优化算法在近岸高浑浊水体可给出满足光谱分布规律的反演结果。与其他大气校正方法一样,优化方法也需要进一步的微调。将 Gordon 标准算法、A mone 光谱迭代和优化方法结合,对 SeaWiFS 图像进行处理,分别得出归一化离水辐亮度和总悬浮物 (TSM) 浓度分布图像,结果令人满意。

关键词: 大气修正; 水体浑浊度; 泥沙浓度; 光谱迭代; 优化

中图分类号: P407/P71 **文献标识码:** A

Atmospheric Correction for Chinese Coastal Turbid Waters Using Iteration and Optimization Method

DING Jing TANG Junwu SONG Qingjun WANG Xiaomei

(National Satellite Ocean Application Service Beijing 100081, China)

Abstract The suspended matter concentrations are very high in coastal waters of China and the variations of concentrations gradients are also great. The concentrations may vary from several thousands mg/l to less than 1mg/l. Atmospheric correction for above turbid waters has been always the unsolved problem in ocean color remote sensing. The A mone iteration method using inherent optical properties of near-infrared (NIR) bands is just applicable in lowly turbid waters whose spectral relations between red and NIR bands are mostly similar to that derived from ocean color experiment data in Yellow Sea and East China sea spring 2003. But the iteration method failed and the water-leaving radiances at shorter bands such as blue bands are negative when the suspended matter concentrations exceed 10—20mg/l which is the result of in situ data mentioned above. Therefore in this article we distinguish turbid waters into low and high turbid waters and give the preliminary criterion. Optimization method has been applied to atmospheric correction of highly turbid waters whose error function is determined by spectral relations between various visible bands from above in situ data. The results show that the optimization method could get reasonable water-leaving radiances although it needs further fine-tuning. The normalized water-leaving radiances and total suspended matter concentrations derived from SeaWiFS are mostly satisfied when Gordon standard algorithm. A mone iteration method and optimization are used in

收稿日期: 2006-04-20; 修订日期: 2006-05-25

基金项目: HY-1 卫星地面应用系统辐射校正与真实性检验分系统项目, 国家 863 计划课题 (2001AA636010), 遥感科学国家重点实验室开放基金 (编号: LRSS0604), 中国科学院百人计划项目 (编号: KZCX0415), 国家教育部留学回国人员科研启动基金重点项目 (编号: HX040013), 国防科学技术工业委员会项目 (编号: KJSX0401)。

作者简介: 丁 静 (1977—), 女, 博士, 助理研究员, 2004 年毕业于中国海洋大学海洋环境学院。目前主要从事水色卫星资料处理及二类水体相关算法的研究。

atmospheric aorrection

Key words atmospheric correction; turbidity; suspended matter concentration; spectral iteration; optimization

1 引 言

在水色产品反演算法中,一般用到离水辐亮度或遥感反射比、辐照度比等物理量。而星载水色传感器接收的信号为 TOA (Top of Atmosphere)总辐亮度,其中包括离水辐亮度、大气分子散射(也称 Rayleigh 散射)和气溶胶散射、海面白帽及太阳直射辐射在海面的反射等的贡献。在蓝绿波段又以大气分子散射贡献最大,在蓝波段的总信号中一般占 80% 以上;而带有水体信息的离水辐射信号在总信号中不足 10%。国际上通用的 Gordon 标准算法在清洁大洋水体中精度较高,一般可达 5% 左右^[1]。但对中国近海高浑浊度的二类水体而言,该算法的一个基本假设——“近红外波段的离水辐射为零”不再成立,从而导致算法失效。为获得具有较高可信度的水质参数,建立适用的大气修正算法是必需的。

目前,国际上针对二类水体提出的水色大气修正算法主要有以下几类:(1)在 Gordon 标准算法基础上提出的光谱迭代法,着重解决近红外波段的离水辐射量^[2-4];(2)将叶绿素、泥沙等水体成分浓度参与近红外光谱迭代^[5-7];(3)优化方法,也称光谱优化(Spectral Optimization),重点在于大气气溶胶模型、海面离水反射光谱模拟及误差函数(Error Function)的选取^[8,9];(4)神经网络模型,也属于优化方法,但与传统的优化方法相比非线性逼近能力更强,模型的推广能力更好,且该模型用网络权值进行多项式计算,运算速度大大提高^[10];(5)主成分分析法^[11],该方法以最优加权系数和多变量线性回归为基础,而典型二类水体的各成分与光谱之间是高度非线性相关的,因而限制了其在复杂二类水体中的应用。国内一些研究人员针对中国近岸水体的大气修正也进行不同的尝试^[12-17]。

研究表明,二类水体水色遥感模型具有很强的区域性。由于区域水体光学性质的剧烈变化,相应的大气修正模型也会有所区别。在 Gordon 标准算法基础上进行光谱迭代一般是基于以下两个假设:(1)红光和近红外波段的水体总吸收系数主要由纯水的吸收系数决定;(2)颗粒物后向散射在上述波段范围内随波长是线性变化的。对近岸高浑浊水体

而言,以上两个假设有可能不成立。至少泥沙在近红外波段仍有相当大的吸收^[5]。

目前,国际上在对大气修正算法做切换时仅对一类水体和二类水体做简单区分,如 NASA 针对 SeaWiFS 和 MODIS 开发的浑浊水体识别算法^[18]及 Aiken & Moore 针对 MERIS 开发的泥沙为主的二类水体识别算法^[19]。但中国近海的泥沙浓度可从几千 mg/l 变化到 1mg/l 以下,且有机无机成分的比例变化很大,单一的水体浑浊度识别算法不再适用于大跨度的浑浊水体,而需要在浑浊水体的基础上进一步区分中低和中高浑浊水体。

中国的渤、黄、东海均属于典型的二类水体区域,其中渤海的情况更为复杂。受现场试验仪器和测量规范的限制,上述海区的生物光学特性测量数据还很少。中国于 2002 年 5 月成功发射了第一颗海洋卫星 HY-1,其业务化数据处理及同期其他有关研究课题也面临近岸水体监测算法的问题。为此,2003 年春、秋季国家卫星海洋应用中心组织了对中国黄、东海区大面积海域的水色试验。试验以建立水色遥感算法为主要目的,获取了上述海区高质量的水色要素浓度、水体表观与固有光学特性以及环境参数等,为水色反演模式的建立和验证奠定了基础。

2 黄东海水色试验数据

2003 年 3 月 19 日至 4 月 25 日,国家卫星海洋应用中心组织国内多家优势单位,包括国家海洋技术中心、香港科技大学、中国科学院海洋研究所、国家海洋局北海分局、国家海洋局第二海洋研究所等,在中国黄、东海区的部分海域进行了二类水体算法建立与检验的水色试验,试验站位如图 1 所示。这次试验共获得 83 个站位的数据,涵盖清洁水体、中等浑浊水体和高浑浊水体,尤其是十分难得的江苏浅滩数据。本次试验主要测量水体的表观光学量、固有光学量、大气光学、叶绿素与相关色素、总悬浮物与悬浮泥沙、黄色物质,以及水文和气象辅助要素等。关键参数都采取两组或三组独立测量的方式,以确保数据之间可以相互验证和比对^[20]。图 2 为黄东海部分典型水体光谱。

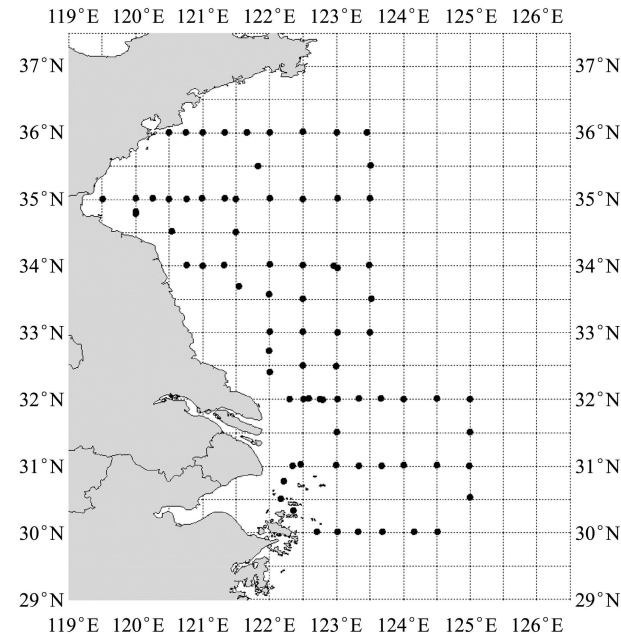


图 1 2003年春季黄海、东海水色联合试验站位示意图

Fig 1 The stations of ocean color experiment in Yellow Sea and East China Sea spring 2003

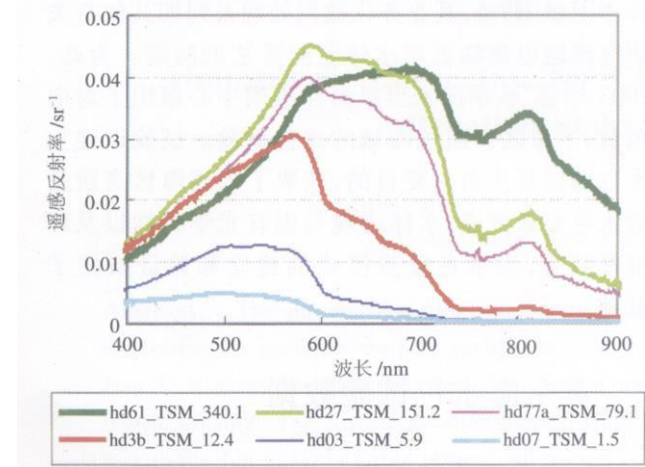


图 2 黄、东海部分典型水体光谱

(hd61_TSM_340.1表示 61号站位的总悬浮物浓度为 340 1mg/l 其余以此类推)

Fig 2 Remote Sensing Reflectances of Yellow Sea and East China Sea

(Note: hd61_TSM_340.1 means that the total suspended matter(TSM) concentration at station 61 is 340 1mg/l and the others are similar)

3 中低浑浊水体的光谱迭代算法

A mone等利用离水辐射在近红外波段的迭代关系,提出如下改进算法^[2]。根据简化的生物 光学模型,

$$R_{rs}(\lambda) = Q\ 051b_b(\lambda) / a(\lambda) \tag{1}$$

式中, R_{rs} 为遥感反射率, b_b 为水体的后向散射系数, a 为水体的吸收系数, λ 为波长。在浑浊水体中,当 $\lambda > 600\text{nm}$ 时,水体的总吸收系数主要是纯水的贡献,而叶绿素、黄色物质和悬浮泥沙的吸收则很微弱。水体的散射系数则主要由颗粒物的散射特性决定。因此,上式可简化为:

$$R_{rs}(\lambda) = Q\ 051b_{bp}(\lambda) / a_w(\lambda) \tag{2}$$

式中, b_{bp} 为颗粒物引起的后向散射系数, a_w 为纯海水的吸收系数。当 $\lambda > 700\text{nm}$ 时,此表达式更为合理。根据 Gould等的研究结果^[21],在 600— 865nm 范围内,颗粒物散射是随光谱线性变化的,则有:

$$\frac{b(765)}{b(670)} = \frac{-Q\ 001243 \times 765 + 1.6915}{-Q\ 001243 \times 670 + 1.6915} \tag{3}$$

对 865nm 波段有类似结果。同样根据 Gould等的研究,颗粒物后向散射系数与散射系数的关系为 $b_b \cong Q\ 02b^{[21]}$ 。由式 (2)可得:

$$L_w(\lambda) = R_{rs}(\lambda) \times E_d(\lambda) = Q\ 051b_{bp}(\lambda) \times E_d(\lambda) / a_w(\lambda) \tag{4}$$

式中, L_w 为离水辐亮度, E_d 为海面入射辐照度。由于红光和近红外波段的大气透过率可近似为 1,则

$$E_d(\lambda_1) / E_d(\lambda_2) \cong F_0(\lambda_1) / F_0(\lambda_2),$$

式中, F_0 为大气层外太阳辐照度,即有如下近似结果:

$$L_w(765) = Q\ 1212 \times L_w(670) \tag{5}$$

$$L_w(865) = Q\ 0432 \times L_w(670) \tag{6}$$

根据 Gordon标准算法得出 $L_w(670)$,然后将式 (5) 和 (6)代入大气顶总信号,有:

$$L_i^*(765) = L_i(765) - t(765) \times L_w(765) \tag{7}$$

$$L_i^*(865) = L_i(865) - t(865) \times L_w(865) \tag{8}$$

利用新的 L_i 值,再代入标准算法进行大气修正计算,如此循环迭代,直到 $L_w(670)$ 收敛。一般情况下 3— 4次迭代即可收敛。

上述方法的建立是基于两个假设:(1)红光和近红外波段的水体总吸收系数主要由纯水的吸收系数决定;(2)颗粒物后向散射在上述波段范围内随光谱是线性变化的。对近岸高浑浊水体而言,以上两个假设有可能不成立。至少泥沙在近红外波段仍有相当大的吸收^[5]。

根据 2003年春季黄东海试验的现场光谱数据,可得到不同水体浑浊度情况下、670nm 波段与近红外的光谱关系式(图 3和图 4)。该数据由美国 ASD 公司生产的双通道地物光谱仪 FieldSpec Dual VN IR (350— 1050nm)测得的连续光谱经波段平均后得到

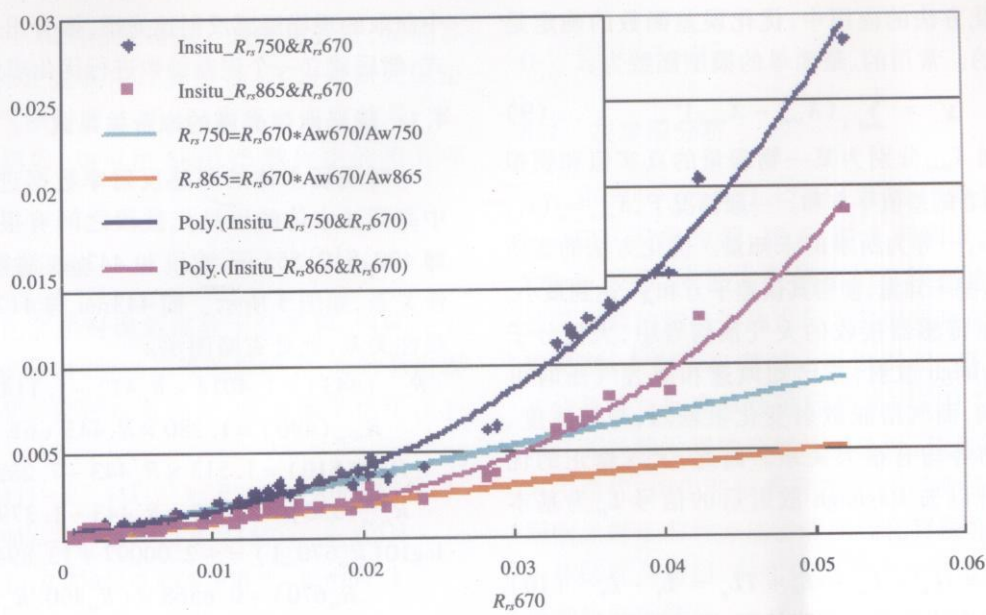


图 3 考虑全部站位时近红外波段与 670nm 波段的光谱关系

Fig.3 Relations between R_{rs670} and R_{rs750} & R_{rs865} when all stations considered

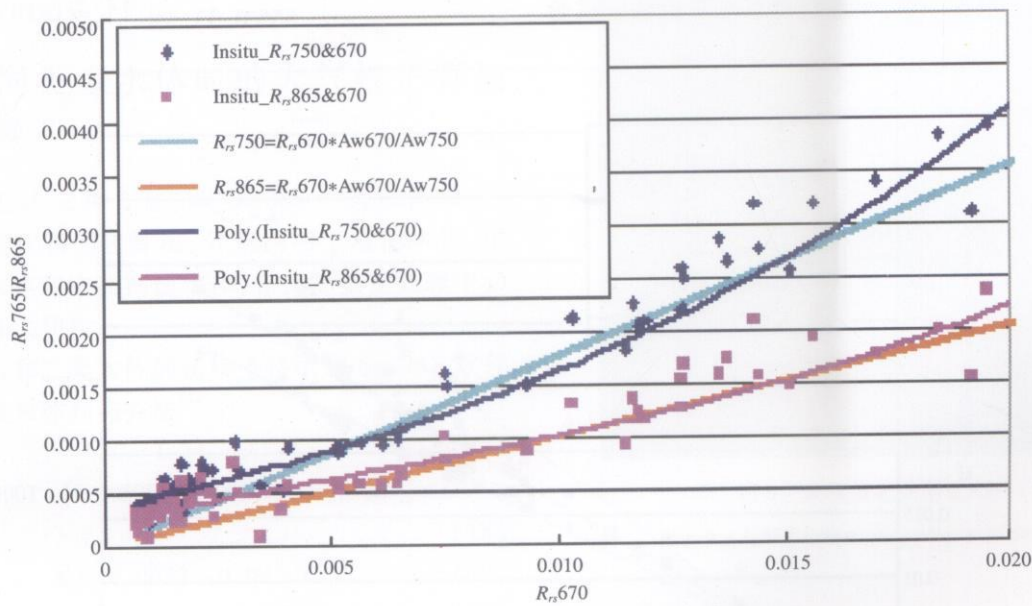


图 4 中低浑浊水体时近红外波段与 670nm 波段的光谱关系

Fig.4 Relations between R_{rs670} and R_{rs750} & R_{rs865} when only stations of lowly turbid waters considered

单波段遥感反射比^[20]。由图 3 和图 4 可以看出,中低浑浊水体时(即 $R_{rs670} < 0.015$),现场光谱拟合关系曲线与 A mone 等给出的直线理论关系吻合较好。从而表明,在中低浑浊水体时可以直接利用 A mone 等提出的近红外迭代算法。在中高浑浊水体中,光谱拟合关系曲线则与 A mone 直线关系有很大出入,因而对黄东海的中高浑浊水体就不能采用 A mone 算法,而应该采用其他的新算法。后面给出的实际图像反演结果也证实了这一点。

4 针对中高浑浊水体的优化算法

在近岸高浑浊水体中,由于二类水体在近红外波段散射特性变化的不确定性,仅靠单纯的物理模式反演来分离海面离水辐射和气溶胶散射信号可能是难以实现的。因此,一些学者开始寻求数学方法来解决这一问题。优化策略是一种很好的选择,因为它可以有效分离各种物质对多波段的光谱响应。

在优化方法的应用中,优化误差函数的确定是至关重要的。常用的、最简单的模型函数为:

$$x^2 = \sum_{\lambda} (X_{\text{sim}} - X_{\text{mod}})^2, \tag{9}$$

式中, X_{sim} 和 X_{mod} 分别为某一物理量的真实值和模拟值, x^2 为两者的差值平方和。一般情况下, $X_{\text{mod}} = f(x_1, x_2, \cdots)$, x_1, x_2, \cdots 等为所求的未知量。优化方法的实质就是调整这些未知量,使得其误差平方和 x^2 达到最小。

在卫星传感器接收的大气顶信号中,大气分子的精确 Rayleigh 散射,在已知风速和海表气压时可以计算得到,而气溶胶散射变化很剧烈,与其浓度、粒子谱分布等均有很大关系。因此,大气修正的优化算法中将去 Rayleigh 散射后的信号 L_{r} 为基本参数,且有:

$$L_{\text{r}} = L_{\text{w}} + L_{\text{a}} + L_{\text{r}} + TL_{\text{g}} = L_{\text{t}} - L_{\text{r}} \tag{10}$$

本优化方法的基本思路如下:以气溶胶在 865nm 波段的散射 L_{a} (865)和 Wang & Gordon提出的中等精度气溶胶算法中^[22]、气溶胶散射随波段变化的指数 c 为优化变量;根据 2003年春季黄东海水色联合试验

中获取的现场遥感反射比光谱,拟合出一些光谱关系式;然后建立一个误差函数进行优化求解。

4 1 现场水体光谱的拟合关系式

对现场水体的遥感反射率数据进行分析发现,中高浑浊水体的可见光波段之间有很大的相关性,即 490, 510, 555nm 波段和 443nm 波段有较好的线性关系,如图 5 所示。而 443nm 与 412nm 波段也有线性关系,此处省略图示。

$$R_{\text{rs}, \text{m}}(443) = 1.4014 \times R_{\text{rs}, \text{m}}(412) - 1.1143 \times 10^{-3} \tag{11a}$$

$$R_{\text{rs}, \text{m}}(490) = 1.280 \times R_{\text{rs}, \text{m}}(443) + 6 \times 10^{-4} \tag{11b}$$

$$R_{\text{rs}, \text{m}}(510) = 1.513 \times R_{\text{rs}, \text{m}}(443) - 7.289 \times 10^{-5} \tag{11c}$$

$$R_{\text{rs}, \text{m}}(555) = 1.890 \times R_{\text{rs}, \text{m}}(443) - 1.379 \times 10^{-3} \tag{11d}$$

$$\log_{10}(R_{\text{rs}, \text{m}}(670_1)) = -2.00097 + 13.894 \times (R_{\text{rs}, \text{m}}(555) + R_{\text{rs}, \text{m}}(670)) - 0.6568 \times (R_{\text{rs}, \text{m}}(490)/R_{\text{rs}, \text{m}}(555)) \tag{12a}$$

$$R_{\text{rs}, \text{m}}(670_2) = -0.0014 + 0.3816 \times R_{\text{rs}, \text{m}}(670)/R_{\text{rs}, \text{m}}(555) \times 3 \tag{12b}$$

$$\ln(R_{\text{rs}, \text{m}}(670_3)) = -0.696 + 1.1223 \times \ln(R_{\text{rs}, \text{m}}(670)/R_{\text{rs}, \text{m}}(555) \times 3) \tag{12c}$$

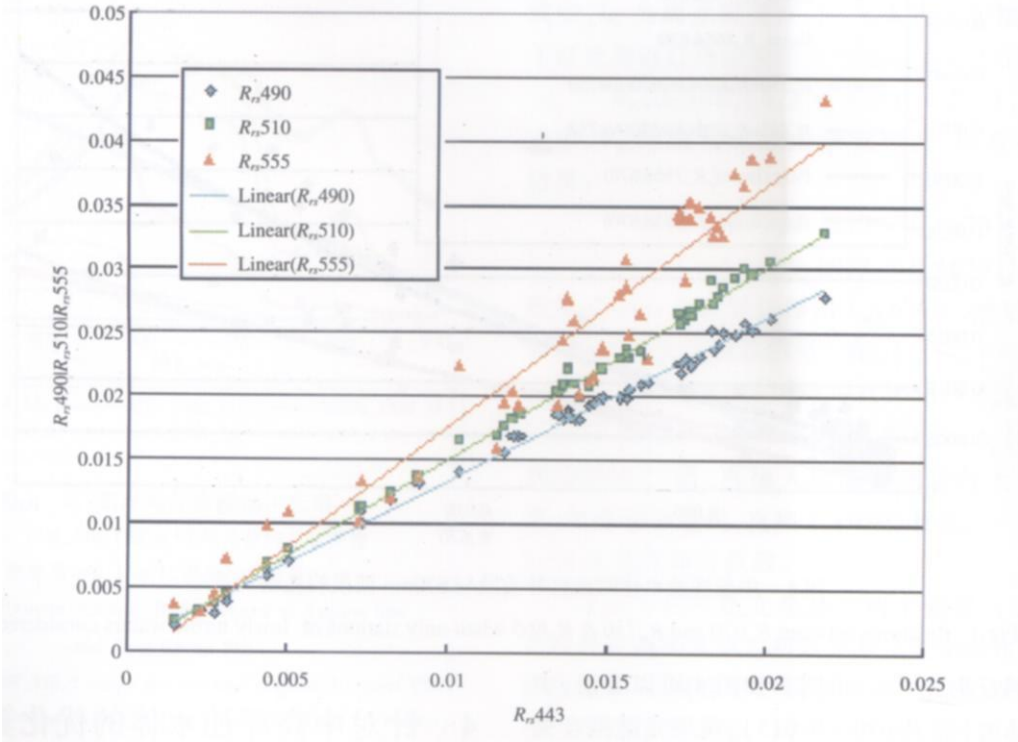


图 5 可见光波段遥感反射率之间的线性关系

Fig 5 Linear relations between remote sensing reflectances of various visible bands

4 2 中间变量的计算

上述现场水体光谱之间的关系式中需要用到的遥感反射比 $R_{\text{rs}}(\lambda_i)$ 由卫星数据计算得到:

$$L_{\text{a}}(\lambda_i) = L_{\text{a}}(865) \times \exp[c \times (865 - \lambda_i)] \tag{13}$$

$$L_{\text{w}}(\lambda_i) = L_{\text{r}}(\lambda_i) - L_{\text{a}}(\lambda_i) - TL_{\text{g}}(\lambda_i) - L_{\text{a}}(\lambda_i) \tag{14}$$

$$R_{\text{rs}}(\lambda_i) = L_{\text{w}}(\lambda_i) / E_{\text{s}}(\lambda_i) \tag{15}$$

式中, $L_a(865)$ 和气溶胶指数 c 为优化变量, 其他参数均为大气修正过程中计算所得。 t 为海面到卫星传感器的大气漫射透过程率, I_{rf} 为海面白帽信号, TL_g 为大气直射辐射, 均可由 SeaDAS 软件中的相关程序计算得到。

4.3 优化误差函数

由于优化算法对误差函数十分敏感, 因此在采用不同误差函数时, 所得结果差异很大, 有时会出现不收敛的情况。经过反复测试, 得到如下优化误差控制函数:

$$\begin{aligned} x^2 = & [R_{rs,m}(443) - R_{rs}(443)]^2 + [R_{rs}(412) - 0.015]^2 / 2 + \\ & [R_{rs,m}(490) - R_{rs}(490)]^2 + [R_{rs,m}(510) - R_{rs}(510)]^2 + \\ & [R_{rs,670,1} - R_{rs}(670)]^2 / 2 + [R_{rs,670,2} - R_{rs}(670)]^2 + \\ & [R_{rs,670,3} - R_{rs}(670)]^2 \end{aligned} \tag{16}$$

反演结果表明, 该误差函数在实际数据应用中有较好的适用性, 但在某些波段结果有待进一步调整, 详见第 6 节的结果分析。

5 不同类型水体时的大气校正算法切换

将上述三种方法, 即 Gordon 一类水体算法、A mone 迭代和优化算法, 分别应用于清洁水体、中低浑浊水体和中高浑浊水体, 在实际数据处理中必须进行算法切换。

一类和二类水体的切换条件引用 SeaDAS 软件中的浑浊水体判别方法^[18]:

$$C = 1.34 \times chl^{1.98} \tag{17}$$

$$b_b = 0.0007 + [0.005955 - 0.002478 \times \log_{10}(C)] \times C^{0.62} \tag{18}$$

$$K_d = 0.0683 + 0.04 \times C^{0.645} \tag{19}$$

$$B = 0.33 \times b_b / K_d \tag{20}$$

$$R_{lim555} = [(1 - 2.5 \times B) - \sqrt{(1 - 2.5 \times B)^2 - 4.44 \times B}] / 2.0 \tag{21}$$

$$turbid = (1 - r(\theta)) \times R_{lim555} / (3.42 \times 1.34^2) \tag{22}$$

式中, chl 为 Gordon 标准大气修正算法得出的叶绿素浓度, $r(\theta)$ 为卫星天顶角对应的菲涅尔反射率。若 $R_{rs555} > turbid$, 则判断为二类水体。二类水体在本研究中又被划分为中低浑浊和中高浑浊水体。经数据处理分析表明, 以 R_{rs490} 作为切换点是可行的。若 Gordon 算法得出的 $R_{rs490} > 0$, 此时采用 A mone 迭代方法进行修正; 若 $R_{rs490} < 0$, 则采用优化算法进行修正。

6 结果分析

6.1 灰度图分析

以 2003 年 4 月 15 日 (儒略日为 105) 接收的 SeaWiFS 图像为例, 图 6、图 7 和图 8 分别给出了 555nm 波段, 未经大气修正的总辐亮度 L_{555} 和分别采用两种切换方法进行大气修正后的归一化离水辐亮度 nL_w555 灰度图。可以看出, 仅采用 A mone 迭代算法与标准算法进行切换时 (图 7), 在长江口和江苏浅滩沿岸的高浑浊水体区, 迭代算法失效; 而采用迭代、优化和标准算法同时切换的结果 (图 8) 则明显好于前种方法。表明优化算法在上述高浑浊水体区较为适用, 对水体信号产生干扰的大气效应得到较好的修正。

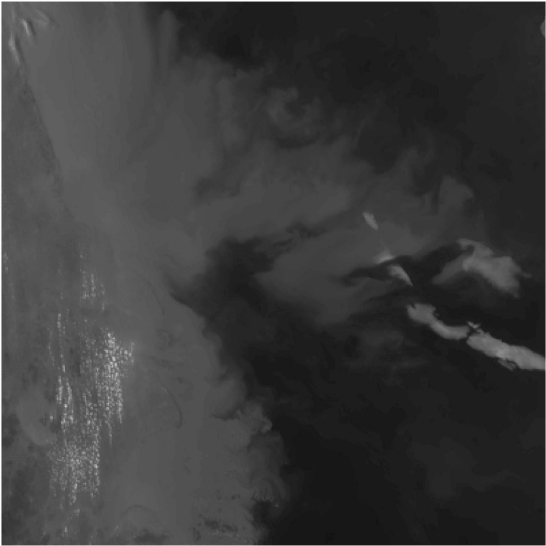


图 6 大气修正前的 L_{555}

Fig 6 L_{555} before atmospheric correction

6.2 光谱分析

为进一步检验上述算法所得结果的准确性, 在江苏浅滩附近由沿岸区域至内取一横断面, 并选取 6 个样点做光谱分析。图 9 给出了各样点对应 SeaWiFS 传感器 8 个波段的归一化离水辐亮度及总悬浮物 (TSM) 浓度, 其中 TSM 的算法参见 Tang 等人的经验统计结果^[23]。可以看出, 优化算法所得的离水辐亮度在较短波段有些偏高, 需要进一步微调; 在其他波段则比较接近真实情况, 尤其是 555nm 和 670nm 波段的离水辐射信号随总悬浮物浓度增加的变化趋势与现场测量结果非常相似 (图 2)。图 10—图 12 分别

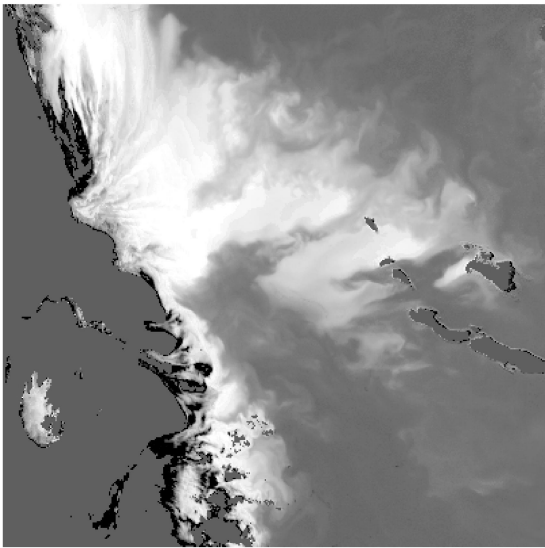


图 7 仅用迭代算法进行切换的 nL_w 555
Fig 7 nL_w 555 when only iteration method used

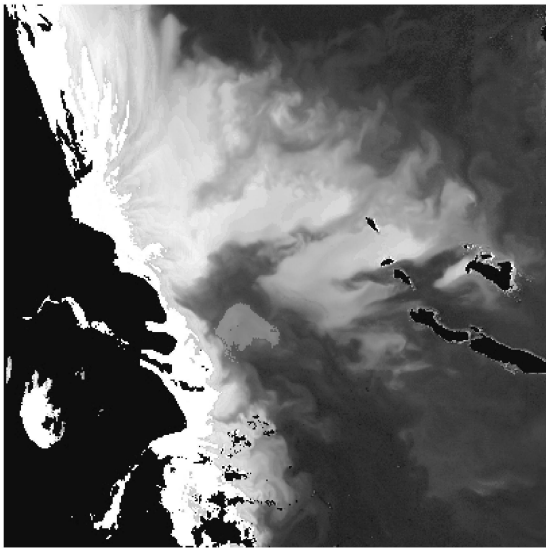


图 8 迭代和优化算法同时切换的 nL_w 555
Fig 8 nL_w 555 when both iteration and optimization methods used

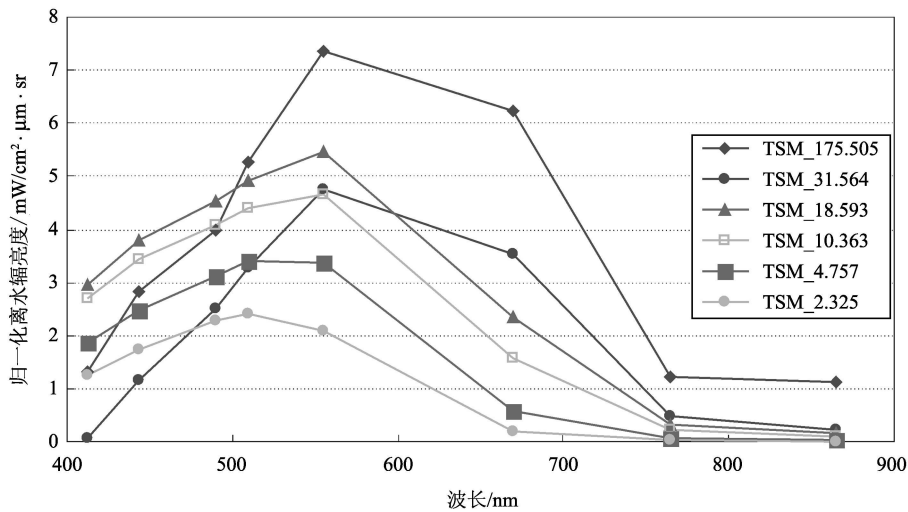


图 9 SeaWiFS 数据反演得到的江苏浅滩附近一横断面样点光谱
(TSM_175.505 表示该样点的总悬浮物浓度为 175.505mg/l 其余以此类推)
Fig 9 Normalized water-leaving radiances of several samples in a cross section of Jiangsu shallow bank for SeaWiFS
(Note: TSM_175.505 means that the total suspended matter(TSM) concentration is 175.505mg/l and the others are similar)

给出了 555nm 和 670nm 波段的归一化离水辐亮度及总悬浮物浓度的反演图像。

7 结 论

本文以中国黄东海作为研究海区,试图初步解决针对中国近岸较高浑浊水体的大气修正问题。该系统方案包括三个算法及其切换。在清洁一类水体

中采用 Gordon 标准算法;在中低浑浊水体时采用 A more 近红外迭代算法;中高浑浊水体时则采用优化算法。各个算法之间的切换条件分别如下:清洁水体和浑浊二类水体的判别标准引用 SeaDAS 软件中的浑浊水体判别程序;中低和中高浑浊水体则以经一类水体标准算法修正后得到的、490nm 处的离水辐亮度为准进行判断,若 $nL_w(490) > 0$,采用 A more 迭代算法;反之则采用优化算法进行修正。

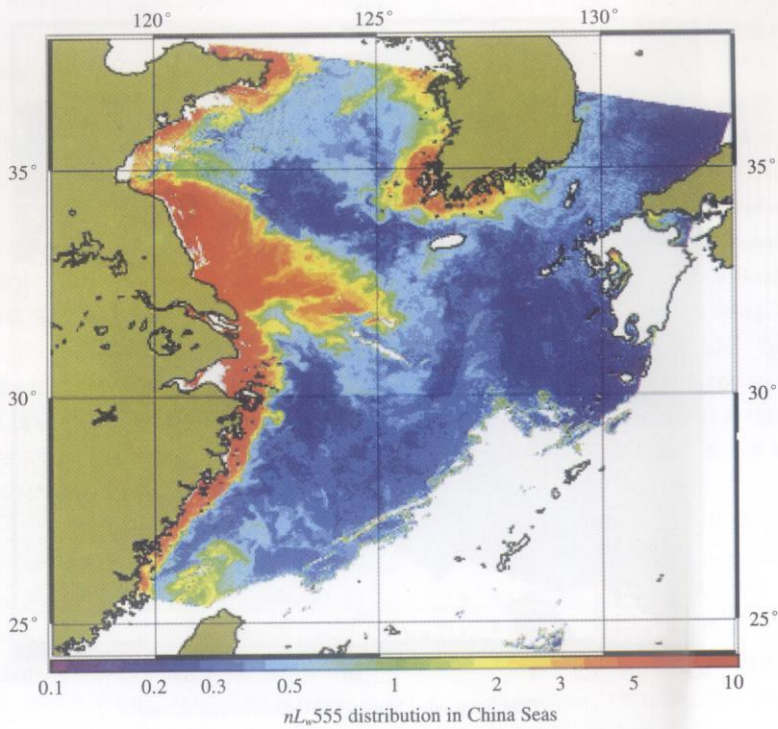


图 10 经大气修正后的 SeaWiFS 555nm 波段归一化离水辐亮度(2003 年 4 月 15 日)
Fig.10 Normalized water-leaving radiance at 555nm of SeaWiFS(April 15, 2003)

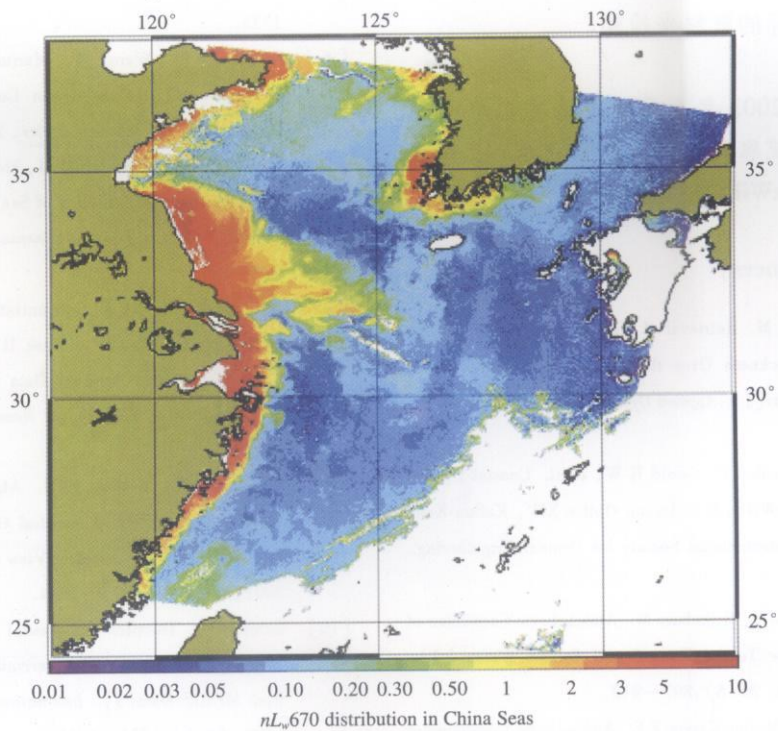


图 11 SeaWiFS 数据经大气修正后 670nm 处的离水辐亮度(2003 年 4 月 15 日)
Fig.11 Normalized water-leaving radiance at 670nm of SeaWiFS (April 15, 2003)

通过对实际卫星数据 (SeaWiFS) 的检验表明, 该系
统算法在中国黄东海区的适用性较强, 反演结果比
较接近真实情况, 尤其是针对中高浑浊水体的优化
算法取得了良好结果。
二类水体大气校正算法结果的检验存在一定的
困难, 只能在趋势上予以肯定, 难以定量, 只能依靠

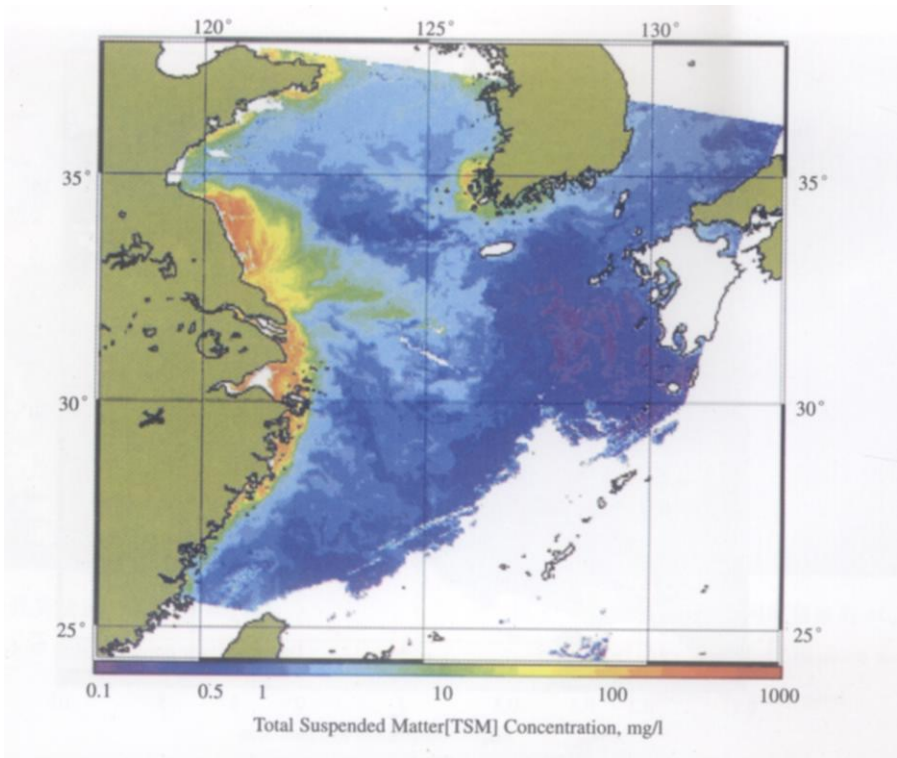


图 12 SeaWiFS 数据反演的总悬浮物浓度分布图 (2003 年 4 月 15 日)
Fig 12 Total suspended matter(TSM) concentration of SeaWiFS(April 15, 2003)

未来可靠的光学浮标的资料来检验。

致 谢 感谢 2003 年春季黄东海水色联合试验全体成员为数据获取所付出的辛苦努力。感谢香港科技大学提供 SeaWiFS L1B 数据。

参 考 文 献 (References)

[1] Gordon H R, Wang M. Retrieval of Water-leaving Radiance and Aerosol Optical Thickness Over the Oceans with SeaWiFS: a Preliminary Algorithm [J]. Applied Optics 1994, 33(3): 443—452

[2] Amoné R A, Martinolich P, Gould R W, et al Coastal Optical Properties Using SeaWiFS [R]. Ocean Optics XIV, Kailua Kona Hawaii SPIE—the International Society for Optical Engineering Nov 10—13, 1998

[3] Ruddick K G, Ovidio F, Rijkeboer M. Atmospheric Correction of SeaWiFS Imagery for Turbid Coastal and Inland Waters [J]. Applied Optics 2000, 39(6): 897—912

[4] Hu C, Carder K L, Muller-Karger F E. Atmospheric Correction of SeaWiFS Imagery Over Turbid Coastal Waters: A Practical Method [J]. Remote Sensing of Environment 2000, 74: 195—206

[5] Moore G F, Aiken J, Lavender S J. The Atmospheric Correction of Water Color and the Quantitative Retrieval of Suspended Particulate Matter in Case II Waters: Application to MERIS [J]. International Journal of Remote Sensing, 1999, 20(9): 1713—

1733

[6] Siegel D A, Wang M, Maritorena S, et al Atmospheric Correction of Satellite Ocean Color Imagery: the Black Pixel Assumption [J]. Applied Optics 2000, 39(21): 3582—3591.

[7] Lavender S J, Pinkerton M H, Moore G F, et al Modification to the Atmospheric Correction of SeaWiFS Ocean Color Images Over Turbid Waters [J]. Continental Shelf Research, 2005, 25: 539—555.

[8] Doerffer R, Fischer J. Concentrations of Chlorophyll, Suspended Matter, and Gelbstoff in Case II Waters Derived from Satellite Coastal Zone Color Scanner Data with Inverse Modeling Methods [J]. Journal of Geophysical Research 1994, 99(C4): 7457—7466.

[9] Chomko R M, Gordon H R. Atmospheric Correction of Ocean Color Imagery: Test of Spectral Optimization Algorithm with the Sea-viewing Wide Field-of-View Sensor [J]. Applied Optics 2001, 40(18): 2973—2984.

[10] Schiller H, Doerffer R. Neural Network for Emulation of an Inverse Model: Operational Derivation of Case II Water Properties from MERIS Data [J]. International Journal of Remote Sensing, 1999, 20(9): 1735—1746.

[11] Neumann A, Krawczyk H, Walzel T. A Complex Approach to Quantitative Interpretation of Spectral High Resolution Imagery [A]. Third Thematic Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments [C]. Seattle, USA II-641—652, 1995.

[12] Pan D L, Mao Z H. Atmospheric Correction for China's Coastal

Water Color Remote Sensing [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2001, **20**(3): 343— 354.

[13] Chen C Q. Atmospheric Correction for Red Band Ocean Color Remote Sensing Data [J]. Tropical Oceanography, 1998, **17** (2): 81— 87. [陈楚群. 海洋水色遥感资料红光波段的大气纠正 [J]. 热带海洋, 1998, **17**(2): 81— 87.]

[14] Mao Z H, Huang H Q, Zhu Q K. Atmospheric Correction for Chinese Seas Using SeaWiFS Data [J]. Oceanologia ET Limnologia Sinica, 2001, **32**(6): 581— 587. [毛志华, 黄海清, 朱乾坤. 我国海区 SeaWiFS 资料大气校正 [J]. 海洋与湖沼, 2001, **32**(6): 581— 587.]

[15] Wei J, Chen C Q, Shi P. A Practical Method for Atmospheric Correction in Case 2 Waters [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2002, **24**(4): 118— 126. [韦钧, 陈楚群, 施平. 一种实用的二类水体 SeaWiFS 资料大气校正方法 [J]. 海洋学报, 2002, **24** (4): 118— 126.]

[16] Ding J. Atmospheric Correction and Components Retrievals in Case 2 Waters Using Neural Network [D]. Dissertation for Doctor's Degree Ocean University of China Qingdao 2004. [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]. 博士学位论文, 中国海洋大学, 青岛, 2004.]

[17] Tang JW, Ding J, Li T J et al. Technical Reports of 863 High Technology Project Moduled Technologies for Ocean Color Remote Sensing Retrievals in Case 2 Waters [R]. Beijing 2005. [唐军武, 丁静, 李铜基等. 863 高技术计划 “模块化二类水体相关遥感信息提取技术 ”课题验收技术报告 [R]. 北京, 2005.]

[18] McClain C R, Arrigo K, Esaias W E, et al. SeaWiFS Algorithms [R]. SeaWiFS Technical Report Series Volume 28, Part 1, NASA Technical Memorandum 104566, 1995.

[19] Aiken J, Moor G. Case 2 Turbid Waters Flag [R]. MERIS Algorithm Theoretical Basis Document 2.5, 2000.

[20] Tang JW, et al. Reports of Ocean Color Experiment for Yellow Sea and East China Sea in Spring 2003, Sponsored by 863 High Technology Project Moduled Technologies for Ocean Color Remote Sensing Retrievals in Case 2 Waters [R]. Beijing 2003. [唐军武等. 863 高技术计划 “模块化二类水体相关遥感信息提取技术 ”课题 2003 年春季黄东海现场试验报告 [R]. 北京, 2003.]

[21] Gould R W, Amone R A, Martinolich P M. Spectral Dependence of the Scattering Coefficient in Case 1 and Case 2 Waters [J]. Applied Optics 1999, **38**(12): 2377— 2383.

[22] Wang M, Gordon H R. A Simple Moderate Accurate Atmospheric Correction for SeaWiFS [J]. Remote Sensing of Environment 1994, **50**: 231— 239.

[23] Tang JW, Wang X M, Song Q J et al. The Statistic Inversion Algorithms of Water Constituents for Yellow Sea & East China Sea [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2004, **23**(4): 617— 626.