

基于半分析算法的香港邻近海域叶绿素 a 浓度反演*

席红艳¹, 张渊智^{1**}, 丘仲锋², 何宜军², 简伟军³

(1: 香港中文大学太空与地球信息科学研究所, 香港)

(2: 中国科学院海洋研究所, 青岛 266071)

(3: 深港产学研基地海岸与大气重点实验室, 深圳 518057)

摘要: 为进一步了解香港近海水体特性及监测其水质状况, 根据 2001 年 3-5 月在香港邻近海域调查取得的实测资料, 对该海域水体光谱进行解析, 开发该海域叶绿素 a 浓度与色素吸收系数 $a_{ph}(675)$ 的经验模型, 具有较高相关性; 用剖面数据外推及水体光谱模拟方法完成对水下表面遥感反射率光谱的推导; 进而建立反演低浓度区叶绿素 a 浓度的半分析算法, 反演结果与实测值比较平均相对误差为 45%, 均方根差 0.933, 相关系数 0.78, 误差主要来源于外推演算及散射模型. 结果表明该算法在低悬浮物低叶绿素浓度区域有一定适用性.

关键词: 香港近海; 半分析算法; 叶绿素 a

A semi-analytical algorithm to retrieve chlorophyll-a concentrations in the coastal region of Hong Kong and its vicinity

XI Hongyan¹, ZHANG Yuanzhi¹, QIU Zhongfeng², HE Yijun² & JIAN Weijun³

(1: *Institute of Space and Earth Information Science, the Chinese University of Hong Kong, Shatin, N.T., Hong Kong, P.R.China*)

(2: *Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, P.R.China*)

(3: *PKU-HKUST Shenzhen-Hongkong Institution, Key Laboratory for Coastal and Atmosphere Research, Shenzhen 518057, P.R. China*)

Abstract: Based on the *in-situ* data collected around Hong Kong sea area and its vicinity from March to May in 2001, spectral characteristics of water color components are analyzed. For establishing retrieval algorithm, the empirical mode between chlorophyll-a concentrations (*Chl.a*) and phytoplankton pigment absorption coefficients $a_{ph}(675)$ is developed with a significant correlation. Relationship between total suspended matter concentrations (*TSM*) and de-pigment absorption coefficients $a_d(440)$ is calculated. Underwater data which contain apparent optical property spectra are used to extrapolate water remote sensing reflectance (r_{rs}). A semi-analytical algorithm is developed to retrieve *Chl.a* which is compared with *in-situ* measurements lastly. The mean relative error is 45%, the correlation coefficient is 0.78, and the root mean standard error is 0.933. Results show that the algorithm is suitable for the study area with low concentrations of *TSM* and chlorophyll-a.

Keywords: Coastal region of Hong Kong; semi-analytical algorithm; chlorophyll-a

香港海域属于典型的二类水体, 海岸带水大量用于娱乐、水产养殖、工业用冷却水源、废水排放以及航运等, 水域东部是半封闭海湾式, 叶绿素 a 浓度较高, 新界西北部的吐露港、赤门海峡及九龙维多利亚港等水域, 由于是天然半封闭的海湾, 其空气和水体的流动受到周围地形的限制, 污染物一旦进入即很难排出, 造成水质恶化, 水体呈高度富营养状态. 西部水域则属于珠江河口, 由于珠江口沿岸经济发展迅速, 上游及沿岸的工业区和居民生活污水均对海域水质造成了极大的影响. 因此, 对香港海域水色水质

* 国家自然科学基金(40801137)和湖泊与环境国家重点实验室开放基金项目联合资助. 2008-10-28 收稿; 2008-12-04 收修稿. 席红艳, 女, 1983 年生, 博士, E-mail: hongyanxi@cuhk.edu.hk.

** 通讯作者; E-mail: yuanzhizhang@cuhk.edu.hk.

进行全面监测已刻不容缓。

随着遥感技术的不断深入, 水体生物光学算法已经成为水色遥感的研究热点之一, 尤其针对区域性强、水体成分复杂的二类水体。叶绿素作为水体重要成分可用来估测浮游植物初级生产力, 反映水质状况和水体营养化程度, 所以发展区域性适用的叶绿素a浓度反演算法是水色遥感研究的一个重要环节。二类水体的水色要素反演算法中应用较多的是半分析算法, 即基于生物光学模型, 通过结合辐射传输模型与经验方程实现水体组分的反演^[1]。其主要原理是通过分析水体组分与固有光学量、固有光学量与表观光学量之间的关系来反演水质参数, 精度较传统经验算法高, 并比分析算法具有较强的可行性和应用性。

自Morel和Gordon^[1]对半分析算法作了明确的科学描述以来, 诸多成功的研究成果和应用相继发表。Carder等^[2]针对MODIS传感器发展的半分析算法, 以675nm的浮游植物吸收系数和400nm的黄色物质吸收系数为变量进行反演; 随后Carder等^[3]又将此算法做了进一步改进使其适合于高纬度强上升流区域环境。与传统基于可见光波段发展算法不同, Ruddick^[4]发展了基于红光和近红外两波段672nm和704nm反射率比值的半分析算法。但这些算法仅仅局限于大洋水体, 在近岸水体并不可行。Lee^[5]发展了多波段准分析算法反演近岸水体总吸收、总后向散射系数以及浮游植物、黄色物质的吸收系数的光谱模型。但模型对经验关系的依赖性较强。此外, Gitelson等^[6]提出了适用混浊多产河口水体的三波段式半分析模型, 并提取出利用SeaWiFS及MODIS反演叶绿素浓度的最佳两波段; 随后又对该模式分别在湖泊、河口、水库及海岸带等混浊水体进行了验证^[7], 三波段算法在混浊二类水体目前适用性较好, 但其仅为遥感反射率与色素浓度之间的模型, 需依据不同水体找寻最优波段。国内学者对半分析的发展算法也层出不穷, 贺明霞等^[8]在一组半分析模型模拟数据的基础上针对中国东海二类水体发展了多光谱模型; 唐军武等^[9]发展了基于局域水体的多成分反演算法, 不同于以往一种算法反演一种物质成分的模式, 此算法可以同时反演出3种成分的浓度, 但对经验关系的依赖较强; 丘仲锋等^[10]利用半分析算法对东海赤潮高发区色素浓度进行反演得到了较好的效果, 也仅适用于东海低浓度区域及赤潮未爆发区域。

由于二类水体具有极大的时空差异性, 水体光学特性的差异性导致各参数间的关系特别是经验系数差异很大, 所以黄东海及其他海域的半分析算法在珠江河口及香港近岸水域并不能直接应用。本文根据2001年3月至5月间香港科技大学展开的航次实测资料, 通过分析叶绿素浓度与某些波段吸收散射特性的关系, 并由剖面光谱推导遥感反射率, 建立了适合香港海域低浓度海区的叶绿素a浓度半分析反演算法, 以期区域性水色遥感反演模式的发展做出贡献。

1 数据采集及处理

2001年3-5月期间在中国香港附近海域进行了4次航次调查, 分别称为0301, 0315, 0426, 0501, 站点分布在香港周围的珠江河口、博寮海峡及牛尾海, 测量站点分布见图1。在牛尾海中, 取样站点覆盖2条断面, 一条是西向断面包含站点P13-(P14)-P1-P2-P3-P4-P5-P6-P7, 另一条是东向断面包含站点P7-P8-P9-P10-P11-P12。在博寮海峡站点轨迹为L1-L2-L3, 而珠江河口断面站点轨迹是E4-E3-E2-E1。但4航次并未对全部站点进行测量, 只是选取了部分典型站点。

本文采用的数据资料主要有总颗粒物吸收系数 a_p 、非色素颗粒吸收系数 a_d 、浮游植物色素吸收系数 a_{ph} 、黄色物质吸收系数 a_d 、叶绿素浓度 $Chl.a$ 、悬浮颗粒物浓度 TSM , 以及水体向上辐照度 E_d 、向下辐亮度 L_u 、由此外推出的水体遥感反射率 r_{rs} 等。表1详细给出了本文主要采用的数据参数及测量范围。

1.1 总颗粒物、非色素颗粒、浮游植物色素及黄色物质吸收系数

参照Mitchell等^[11]介绍的分光光度计的透射测量方法, 用Cary100测量得到总颗粒物吸收系数和非色素颗粒吸收系数, 测量范围为300-800nm, 在研究海区共采集了42组。浮游植物色素吸收系数由总颗粒物吸收系数与非色素颗粒吸收系数的差值得到。黄色物质吸收系数的测量先用Niskin采水器采集得到海水水样, 用盐酸浸泡, 再用超纯水清洗干净的聚碳酸酯滤纸过滤海水水样得到黄色物质样品, 利用分光光度计测量其吸收光谱。黄色物质吸收数据光谱范围为250-800nm, 剔除误差较大的几组数据, 共取得37组数据。440nm处黄色物质吸收系数最大值为 $0.317m^{-1}$, 最小值为 $0.0463m^{-1}$, 平均值为 $0.132m^{-1}$ 。

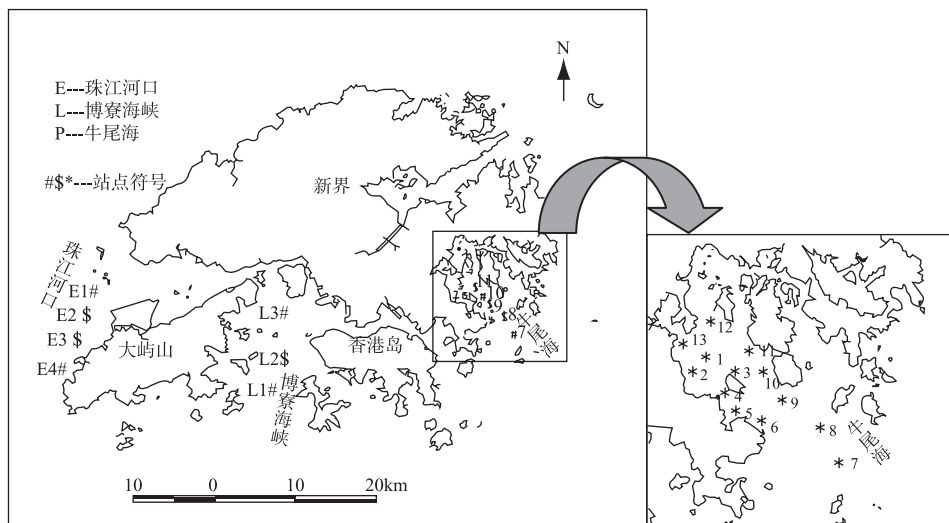


图 1 2001 年 3-5 月航次站点分布

Fig.1 Location of cruise stations from March to May, 2001

1.2 叶绿素 a 浓度及悬浮颗粒物浓度

水体叶绿素 a 浓度及其他相关色素浓度数据是利用 Waters 600E 系统的高性能液相色谱法分析液氮保存样品, 获得水体表层叶绿素 a 浓度数据共 42 组, 最大值 $40.3\text{mg}/\text{m}^3$, 最小值仅为 $0.73\text{mg}/\text{m}^3$. 由于调查期间并未发生明显赤潮, 航次在春季进行, 只是浮游植物水华期的开始, 因此近 80% 的叶绿素 a 浓度值在 $10\text{mg}/\text{m}^3$ 以下. 总悬浮颗粒物浓度的测量采用 NASA 光学规范中的重量法^[12], 浓度值范围为 $9.52\text{--}65.87\text{g}/\text{m}^3$, 平均值为 $25.88\text{g}/\text{m}^3$.

1.3 水体遥感反射率

水体遥感反射率采用剖面法测量, 唐军武、李铜基等^[13-15]对有关水体光谱测量方法做了详细介绍. 按照 NASA 海洋光学规范的要求, 航次中采用 PRR800 剖面仪测量得到水中向下辐照度剖面、向上辐亮度剖面 and 海面入射辐照度, 通过外推方法, 获得水下表面上行辐亮度和下行辐照度, 从而得到水下表面遥感反射率, 共获得 27 组.

表 1 研究海区水体生物光学参数的变化范围

Tab.1 Range of water optical parameters and spectra in the study area

参数	最大值	最小值	平均值	数据个数
$TSM (\text{g}/\text{m}^3)$	9.52	65.87	25.88	42
$Chl.a (\text{mg}/\text{m}^3)$	40.30	0.28	3.79	42
$a_p(440) (\text{m}^{-1})$	2.160	0.048	0.381	42
$a_{ph}(440) (\text{m}^{-1})$	1.888	0.023	0.224	42
$a_d(440) (\text{m}^{-1})$	0.739	0.016	0.157	42
$a_g(440) (\text{m}^{-1})$	0.317	0.0463	0.132	37
$E_d (\mu\text{W}/(\text{cm}^2\cdot\text{nm}))$	PRR800 剖面测量仪测量站点剖面数据			27
$L_u (\mu\text{W}/(\text{cm}^2\cdot\text{nm}\cdot\text{sr}))$	依据实测辐照度和辐亮度剖面法推导得到			27
$r_{rs} (\text{sr}^{-1})$				

2 水体光学特性分析

2.1 固有光学特性分析

香港近海水体光学特性复杂且季节性变化明显, 其他研究区域的光学模型经验系数并不能直接应用于此, 本文在基于实测数据对该海域水体固有光学特性已有的研究基础上^[16], 建立起叶绿素 a 浓度 $Chl.a$ 与吸收系数 $a_{ph}(675)$ 的关系, 可表示为

$$Chl.a = P_0 a_{ph}(675)^{P_1} \quad (1)$$

其中 P_0 和 P_1 均为经验系数. 根据 4 航次的叶绿素 a 浓度和色素吸收系数的实测数据, 统计回归的结果为: $P_0=28.669$, $P_1=0.890$, $R^2=0.94$, 曲线图见图 2a. 总悬浮物浓度 TSM 与非色素颗粒物吸收系数的关系同样采用乘幂形式, 取 440nm 为参考波长, 统计回归结果为 $TSM=52.19a_d(440)^{0.36}$, $R^2=0.72$, 如图 2b.

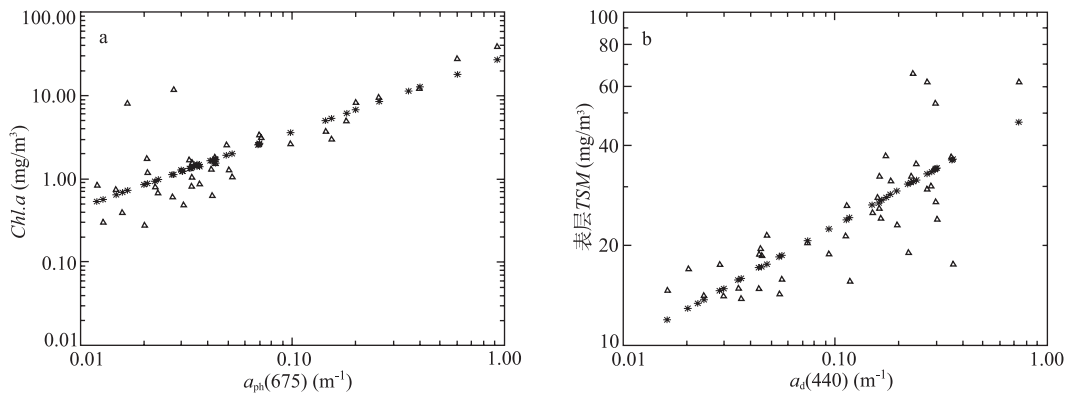
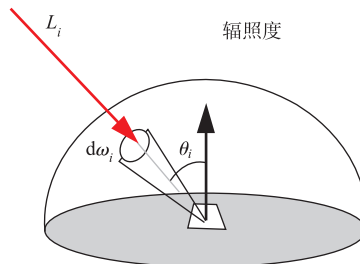


图 2 叶绿素 a 浓度与 $a_{ph}(675)$ 关系(a); 总悬浮物浓度与 $a_d(440)$ 关系(b) (*表示反演值, Δ 表示实测值)

Fig.2 Relationship between $Chl.a$ and $a_{ph}(675)$ (a); and relationship between TSM and $a_d(440)$ (b)

2.1 遥感反射率的获取

通常, 单位面积接收到的辐射通量, 称为该处的辐照度 E (图 3), 海洋光学中常用单位为 $\mu W/(cm^2 \cdot nm)$. 文中提到的有以下辐照度参数: 水体剖面向下辐照度 $E_d(z)$, 向上辐照度 $E_u(z)$, 刚好处于水表面以下的辐照度包括刚好处于水表面以下的向下辐照度 $E_d(0^-)$ 和刚好处于水表面以下的向上辐照度 $E_u(0^-)$, 0^- 含义为刚好处于水表面以下. 而辐射度是指单位投影面积、单位立体角上的辐射通量, 常用单位为 $\mu W/(cm^2 \cdot nm \cdot sr)$. 同样文中用到的有以下辐亮度参数: 水体剖面向下/向上辐亮度 ($L_d(z)/L_u(z)$), 刚好处于水表面以下的向下(upwelling)辐亮度 $L_d(0^-)$ 及刚好处于水表面以下的向上辐亮度 $L_u(0^-)$.



$$E_i = \int_{\Omega_i} L_i \cos \theta_i d\omega_i$$

图 3 辐照度示意图

Fig.3 Illustration of irradiance

根据剖面法测量原理^[17], 在假设观测深度水域内水体光学特性均匀的条件下, 由于海表面波动的影

响, 刚好处于水下表面 0 深度的值是无法直接测量的, 必须用某一深度 z 的值, 或更一般的用某一层水体外推出 0 深度的值. 以向下辐照度 E_d 为例, 水下表面的 $E_d(0^-)$ 与某一深度的 $E_d(z)$ 的关系为:

$$E_d(z) = E_d(0^-) \exp\left(-\int_0^z K_d(z) dz\right) \quad (2)$$

其中, $K_d(z)$ 为 E_d 的 z 深度处漫衰减系数, 因此有:

$$K_d(z) = -\frac{d[\ln(E_d(z'))]}{dz'} \Big|_z \quad (3)$$

差分运算为:

$$K_d(z) = -[\ln(E_d(z_2)) - \ln(E_d(z_1))]/(z_2 - z_1) \quad (4)$$

如果 0^-z_2 深度范围为均匀混合水层, 其中 z_1-z_2 深度范围的 K_d 可以代表 $z(<z_2)-0^-$ 的值, 则可导出:

$$E_d(0^-) = E_d(z) \exp(+K_d(z)) \quad (5)$$

否则, 只能用公式(3), 将积分号用分层求和形式计算, 得出 $E_d(0^-)$. 一般而言, 只要 z 在均匀混合水层(K_d 无太大变化), 可用式(5)近似计算.

同理, 对向上辐照度 E_u 和向上辐亮度 L_u , 在计算出他们的漫衰减系数 K_d 和 K_L 之后, 可由 z 深度处的值计算出 $E_u(0^-)$ 、 $L_u(0^-)$ 的值.

结合本研究海区数据, 对 27 个站点的剖面数据做如上处理, 分别推导出水下表面的向下辐照度 $E_d(0^-)$ 和向上辐亮度 $L_u(0^-)$, 再依据公式:

$$r_{rs} = L_u(0^-) / E_d(0^-) \quad (6)$$

计算得到水下表面遥感反射率 r_{rs} . 3 航次中有剖面数据的站点分布如表 2(0501 航次未测表观光学数据).

表 2 3 航次中表观光学数据站点
Tab.2 Cruise stations with apparent optical spectra data

航次	测量站点								
0301	13	1	5	7	10	L1	L3	E1	E4
0315	13	1	5	7	10	L1	L3	E1	E4
0426	13	14	1	5	7	L1	L3	E1	E4

根据剖面法光学数据处理原理, 首先外推出该站点在 412, 443, 490, 532, 555, 665 和 683nm 7 个典型可见光波段的水下表面向下辐照度和向上辐亮度的值, 并得出在 7 个波段的水下表面遥感反射率 r_{rs} . 根据剖面数据实际测量情况, 尝试不同的深度范围进行拟合, 选择最优结果, 最终计算出所有站点的 7 波段水下表面遥感反射率 r_{rs} , 平滑曲线如图 4.

3 算法应用

3.1 算法建立

表观光学量与固有光学量的关系采用 Gordon 等^[18]的公式:

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

其中, g_0 和 g_1 为经验系数, 仍然采用 Lee 等^[19]的值, 取 $g_0=0.0895$, $g_1=0.1247$, 此为 Lee 将算法适用于二类水体后得出的经验值.

$$u(\lambda) = \frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda) + b_b(\lambda)} \quad (8)$$

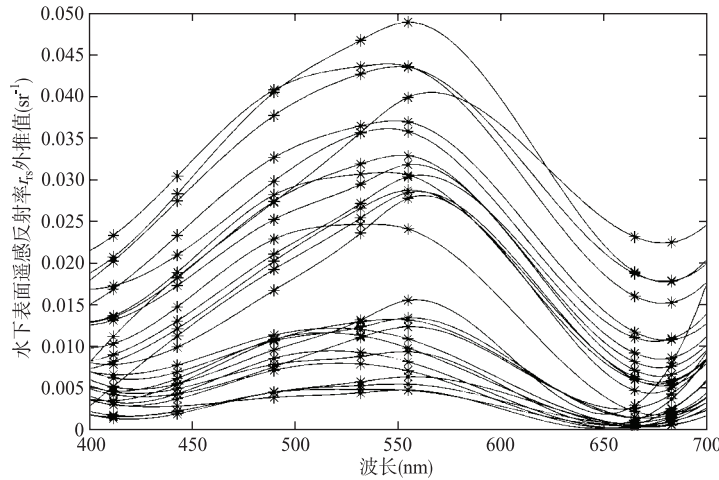


图4 剖面法得到的水下表面遥感反射率光谱平滑图

Fig.4 Spectra of remote sensing reflectance r_{rs} from apparent optical data

联立式(7)和(8)可得:

$$\frac{b_0(\lambda)}{a(\lambda)+b_0(\lambda)} = \frac{-g_0 + [g_0^2 + 4g_1 r_{rs}(\lambda)]^{1/2}}{2g_1} \quad (9)$$

其中总吸收系数 $a(\lambda) = a_w(\lambda) + a_{ph}(\lambda) + a_g(\lambda) + a_d(\lambda)$, w 、 ph 、 g 和 d 分别代表纯水、浮游植物色素、黄色物质以及非色素颗粒。 $a_w(\lambda)$ 表示纯海水吸收系数, 常态下稳定, 引用 Pope & Fry^[20] 的结果, $a_{ph}(\lambda) = A(\lambda)a_{ph}(\lambda)^{B(\lambda)}$; $a_g(\lambda) = a_g(440)\exp(-S_g(\lambda-440))$, S_g 取 $0.0170^{[16]}$; $a_d(\lambda) = a_d(440)\exp(-S_d(\lambda-440))$, S_d 取 $0.0116^{[16]}$ 。 S_g 与 S_d 值均为对四航次所有吸收数据统计计算后的结果。总后向散射系数 $b_b(\lambda) = b_{bw}(\lambda) + b_{bp}(\lambda)$, $b_{bw}(\lambda)$ 表示纯水的后向散射系数, $b_{bw}(\lambda) = 0.5b_w(\lambda)$, 也为定值, 采用 Smith&Baker^[21] 的结果; $b_{bw}(\lambda) = b_{bp}(532)(532/\lambda)^n$, $b_{bp}(532) = 0.049TSM^{1.2652}$, 由于缺乏研究区域后向散射数据, 文中采用黄东海的研究成果^[22]。

这样, 将 $r_{rs}(\lambda)$ 表示成 4 个未知量 $a_g(440)$, $a_d(440)$, $a_{ph}(675)$ 和 $b_{bp}(532)$ 的函数。以 $r_{rs}(\lambda)$ 为方程输入, 根据式(8)采用 4 个波段建立非线性方程组, 求解得到对应 4 个未知量。解方程采用 IDL 软件自带的 BROYDEN 函数。得到 $a_{ph}(675)$ 之后, 再由式(1)建立的经验关系模型, 可以求解得到叶绿素 a 浓度。

3.2 结果与讨论

为使算法在一般情况的水体得到更好的应用, 通常剔除一些由于高悬浮物、高叶绿素 a 浓度导致测量结果明显异常的站点值。在航次 27 个站点中, 有 4 站点叶绿素 a 浓度值明显高与其他站点, 大于 $10\text{mg}/\text{m}^3$, 有 4 站点黄色物质吸收系数数据异常, 另有 8 站点 TSM 值远大于 $30\text{g}/\text{m}^3$ 。剔除这些站点数据后, 共有 11 组站点数据参与算法检验。

输入波段组合时, 本文从 7 波段中选择任意 4 个组合, 反演结果都相差无几, 最终以 412, 443, 490, 532nm 4 个波段作为非线性方程组的输入。非线性方程组的解法采用 IDL 自带的 BROYDEN 函数, 尝试多种初始值, 调整得到最优结果。图 5 给出算法反演得到的 675nm 波段色素吸收系数及叶绿素 a 浓度与实测值的比较图。

为检验反演值和实测值是否一致, 本文采用统计方法中的均方根误差(RMSE)和相对误差(RE)作为评价标准。表 3 分别给出算法的 $a_{ph}(675)$ 反演值与实测值及叶绿素 a 浓度反演值与实测值的误差分析结果。以 $a_{ph}(675)$ 的反演效果来看, 平均相对误差为 37%, RMSE 为 0.021, 相关系数为 0.845; 以 $Chl.a$ 的反演效果来看, 平均相对误差为 45%, RMSE 为 0.933, 相关系数为 0.775。对于全部 27 个站点数据及 16 个高浓度站点数据输入算法的应用效果, 表 4 给出详细的偏差比较。可见, 在研究区域利用半分析算法对较高浓度值进行反演的效果较差, 影响整体反演效果, 而在低浓度值区域相对适用。

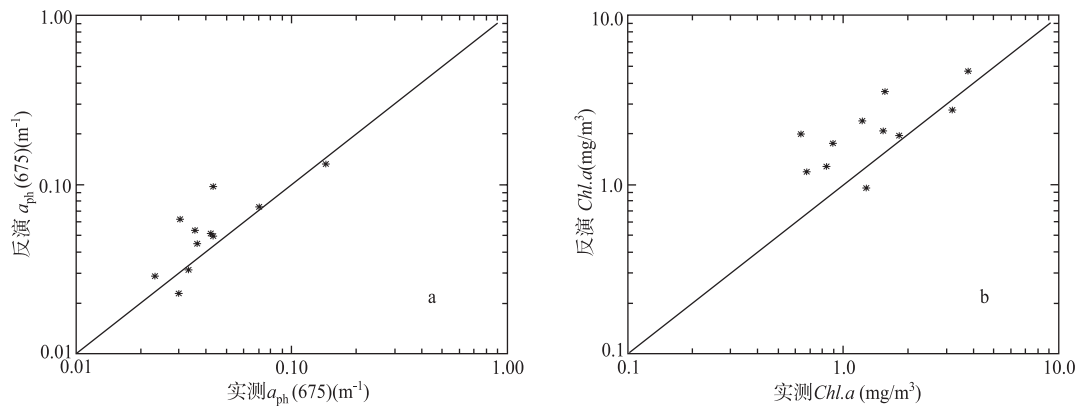


图 5 实测值与反演值比较: $a_{ph}(675)$ (a); 叶绿素 a 浓度(b)

Fig.5 Comparison of retrieved values and in-situ values: $a_{ph}(675)$ (a); $Chl.a$ (b)

表3 反演效果偏差比较

Tab.3 Discrepancy of results

反演要素	RMSE	RE最大值(%)	RE最小值(%)	RE平均值(%)	R^2
$a_{ph}(675)$	0.021	90.82	6.33	37.08	0.85
$Chl.a$	0.933	92.35	6.72	45.20	0.78

表4 不同站点数据组合参与算法反演效果偏差比较

Tab.4 Discrepancy comparison among results of 3 different data combinations

站点个数	全部站点(27个)	低浓度站点(11个)	中高浓度站点(16个)
相关系数 R^2	0.37	0.78	0.02
平均相对误差RE(%)	96.43	45.20	148.65
RMSE	4.77	0.933	21.91

总体而言,对于香港附近海域,半分析算法对低悬浮物及低叶绿素a浓度的反演相对适用,在高浓度区域进行模拟偏差较大甚至出现负值.统观算法全局,造成较大误差的主要因素为:1)外推法所得遥感反射率.缺少直接使用光谱仪测得的遥感反射率数据,外推数据与真实结果有一定偏差;2)后项散射经验模型.缺少可信度较高的香港近海区域水体光学散射数据,黄东海区域水体虽与研究区域有相似性,但仍存在较大空间差异;3)非线性方程求解误差.非线性方程求解具有不确定性,初始值的选择输入往往对结果造成显著影响.若提高算法的一般适用性,还需有更多实测数据参与模拟和算法反演,加入优化模型,改善中间参量及经验关系,进而提高反演精度.但浓度值较高的数据并未被完全放弃,在以后的研究中会尝试利用其他算法,例如Geltson的三波段模型^[6]及其他优化算法对高混浊区高产区的色素浓度进行反演,以期得到良好效果及较高精度,使其适用于高水体组分浓度区域.

4 结论

(1) 根据2001年3-5月航次实测数据,建立了研究海区叶绿素a浓度与色素吸收系数的经验模型,系数分别为28.669和0.890($R^2=0.94$);以及总悬浮物浓度与非色素颗粒吸收系数经验关系,系数为52.19和0.36($R^2=0.72$).

(2) 根据剖面数据外推法原理,利用航次所测剖面数据包含的辐照度与辐亮度信息,外推得到在7个典型波段的水表面下遥感反射率.

(3) 结合辐射传输理论及实测数据得出的经验关系, 建立了香港近海区域低浓度海域叶绿素 a 浓度半分析反演算法, 反演结果与实测数据比较, 相关系数为 0.78, 均方根偏差为 0.933, 平均相对误差为 45.2%, 表明该算法对研究海区在低水体组分浓度范围相对适用。

致谢: 感谢香港科技大学陈介中教授和深港产学研基地海岸与大气重点实验室简伟军老师提供数据及相关指导帮助, 感谢航次调查参加人员数据采集和分析工作。

5 参考文献

- [1] Morel A, Gordon HR. Report of the working group of water color. *Boundary Layer Meteorol*, 1980, **18**: 343-355.
- [2] Carder KL, Chen FR, Lee ZP *et al.* Semianalytic Moderate Resolution Imaging Spectrometer algorithms for chlorophyll-a and absorption with bio-optical domains based on nitrate-depletion temperatures. *J Geophys Res*, 1999, **104**: 5403-5421.
- [3] Carder KL, Chen FR, Cannizzaro JP *et al.* Performance of the MODIS semi-analytical ocean color algorithm for chlorophyll-a. *Advances in Space Research*, 2004, **33**: 1152-1159.
- [4] Ruddick KG, Herman JG, 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. *Applied Optics*, 2001, **40**: 3575-3585.
- [5] Lee ZP, Carder KL, Arone RA. Deriving inherent optical properties from water color: a multiband quasi-analytical algorithm for optically deep waters. *Applied Optics*, 2002, **41**: 5755-5772.
- [6] Gitelson AA, Schalles JF, Hladik CM. Remote Chlorophyll-a retrieval in turbid, productive estuaries: Chesapeake Bay case study. *Remote Sensing of Environment*, 2007, **109**: 464-472.
- [7] Gitelson AA, Dall'Olmo G, Moses W *et al.* A simple semi-analytical model for remote sensing estimation of chlorophyll-a in turbid waters: validation. *Remote Sensing of Environment*, 2008, **112**: 3582-3593.
- [8] He MX, Liu ZS, Du KP *et al.* Retrieval of chlorophyll from remote-sensing reflectance in the China seas. *Applied Optics*, 2000, **39**: 2467-2474.
- [9] 唐军武, 田国良. 水色光谱分析与多成分反演算法. *遥感学报*, 1997, **1**(4): 252-256.
- [10] 丘仲锋, 席红艳, 何宜军等. 东海赤潮高发区半分析算法色素浓度反演. *环境科学*, 2006, **27**(8): 1516-1521.
- [11] Mitchell BG, Bricaud A, Carder K *et al.* Determination of spectral absorption coefficients of particles, dissolved material and phytoplankton for discrete water samples. In: Fargion GS, Mueller JL, McClain CR eds. Ocean optics protocols for satellite ocean color sensor validation. Revision 2, Maryland: NASA/TM-2000-209966, Chapter 12, 2000: 125-153.
- [12] Hooker SB, Zibordi G, Berthon JF *et al.* Tower-perturbation measurements in above-water radiometry. In: Hookers SB, Firestone ER eds. NASA SeaWiFS postlaunch technical report series. Maryland: NASA Goddard Space Flight Center, 2003: 6-43.
- [13] 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. *遥感学报*, 2004, **8**(1): 37-44.
- [14] 李铜基, 陈清莲. II类水体光谱特性的剖面测量方法. *海洋技术*, 2003, **22**(3): 1-5.
- [15] 李铜基, 陈清莲, 汪小勇等. 剖面法测量近岸水体遥感反射率的新方法. *海洋技术*, 2004, **23**(3): 1-4.
- [16] Xi HY, Qiu ZF, He YJ *et al.* The absorption of water color components and spectral modes in the Pearl River estuary. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2007, **25**(4): 359-366.
- [17] Mueller JL. Overview of measurement and data analysis methods. In: Mueller JL, Fargion GS, McClain CR eds. Ocean optics protocols for satellite ocean color sensor validation, Revision 4, Maryland: NASA/TM-2003-211621, 2003: 1-20.
- [18] Gordon HR, Brown OB, Evans RH *et al.* A semianalytic radiance model of ocean color. *J Geophys Res*, 1988, **93**(D9): 10909-10924.
- [19] Lee ZP, Carder KL. Effect of spectral band numbers on the retrieval of water column and bottom properties from ocean color data. *Applied Optics*, 2002, **41**: 2191-2201.
- [20] Pope M, Fry ES. Absorption, spectrum (380-700 nm) of pure water. II Integrating cavity measurements. *Applied Optics*, 1997, **36**(33): 8710-8723.
- [21] Smith RC, Baker KS. Optical properties of the clearest natural waters. *Applied Optics*, 1981, **20**(2): 177-184.
- [22] 丁 静. 基于神经网络的二类水体大气修正与水色要素反演[学位论文]. 青岛: 中国海洋大学, 2004.