

韩留生, 陈水森, 李丹, 陈修治, 李勇, 陈燕乔, 方立刚. 近岸二类水体生物光学模型参数优化[J]. 热带地理, 2014, 34(3): 351-358.

## 近岸二类水体生物光学模型参数优化

韩留生<sup>1,2,3</sup>, 陈水森<sup>3</sup>, 李丹<sup>3</sup>, 陈修治<sup>4</sup>, 李勇<sup>3</sup>, 陈燕乔<sup>3</sup>, 方立刚<sup>5</sup>

(1. 中国科学院 广州地球化学研究所, 广州 510640; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 广州地理研究所, 广州 510070;  
4. 中国科学院 华南植物研究院, 广州 510650; 5. 苏州市职业大学, 苏州 215104)

**摘要:** 为了优化生物光学模型中的悬浮物后向散射模型系数 ( $b_{bx}$ ) 和双向反射因子 ( $f/Q$ ), 基于珠江口、韩江河口、徐闻珊瑚礁保护区实测数据 (遥感反射率、叶绿素 a 质量浓度、悬浮物质量浓度、CDOM 吸收系数), 采用模拟退火算法同时优化了  $b_{bx}$  以及  $f/Q$  ( $N=43$ ), 并开发了生物光学正演模型 ( $N=22$ )。文章优化的  $f/Q$  为 0.104 9, 悬浮物在参考波长 531 nm 处后向散射系数  $b_{bx}$  为  $0.268 \times [TSS]^{0.295}$ 。通过输入实测的水质数据模拟出 531 nm 处的遥感反射率, 并外推到其他波段 (412、443、490、551、667 nm)。模拟得到的 531 nm 处遥感反射率与实测值的均方根误差  $RMSE=0.000 8$ ,  $N=22$ , 除了模拟的 667 nm 处遥感反射率误差较大外 ( $RMSE=0.003 6$ ,  $N=22$ ), 其他波段都具有较好的精度 ( $RMSE < 0.002 3$ )。结果表明, 该研究区与其他研究区 (如黄、东海) 的  $b_{bx}$  和  $f/Q$  不一致, 这 2 个参数需要根据研究区的数据进行优化。验证结果说明迭代优化的  $b_{bx}$  以及  $f/Q$  能够适用于广东近岸河口生物光学参数模拟。

**关键词:** 二类水体; 生物光学模型; 模拟退火算法; 水质参数

**中图分类号:** TP79

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-5221(2014)03-0351-08

DOI:10.13284/j.cnki.rddl.002519

近岸二类水体与人类活动密切相关, 但由于人为因素和自然因素的综合干扰, 近岸二类水体水质较差, 严重影响了经济的可持续发展以及人类的身体健康。常规的地面调查费时、费力、不经济, 遥感技术有快速、大范围、周期性的特点, 有常规水质监测不可比拟的优越性。对水质的遥感监测主要有经验模型和生物光学模型。经验模型需要大量的实测点建模, 且缺乏物理意义。而基于生物光学的反演模型能够计算水体吸收系数和散射系数等固有光学参量, 同时也能计算水色3要素 (叶绿素a、悬浮物、CDOM) 的质量浓度; 生物光学模型具有较好的物理意义和一定的普适性, 因而得到了越来越多的水色遥感学者的关注<sup>[1]</sup>。

表观光学量和固有光学量是生物光学模型的重要参数, 最早由Preisendorfer<sup>[2]</sup>定义。Gordon等<sup>[3]</sup>对固有光学量与表观光学量进行了深入研究, 对各个参数的计算方法以及不同量之间的关系进行了详细阐述, 并基于辐射传输理论导出了生物光学算法。随后, 大量的水色遥感学者进一步研究了表观光学量与固有光学量之间的关系, 并开发了多种生物光学模型。如Maritorena等<sup>[4]</sup>开发了具有一定普适性的

GSM (Garver, Siegel, Maritorena Model) 模型, 但该模型只考虑了叶绿素和纯水的后向散射贡献; Lee等<sup>[5]</sup>基于实测的固有光学量与表观光学量给出了适用于二类水体的QAA (Quasi-Analytical Algorithm) 半分析算法, 由于555 nm处的总吸收系数的准确性随水体的复杂性而发生变化, 从而导致总的吸收系数被低估。目前, 对生物光学模型中的部分参数多是凭经验获取, 不同研究区的这些参数存在差异, 尤其对于我国比较混浊的近岸二类水体, 直接应用国外开发的生物光学模型会产生较大误差<sup>[6-9]</sup>。为此, 唐军武等<sup>[7]</sup>基于地面实测的固有光学量和表观光学量构建了黄、东海的生物光学模型; 张兵<sup>[8]</sup>、李云梅<sup>[10]</sup>、黄昌春<sup>[11]</sup>等基于前人给出的单位吸收和单位散射系数模型构建了太湖水体的生物光学模型, 并进行了水质参数的反演。

上述研究中的生物光学模型参数都是基于地面实测数据得到, 然而大量的研究<sup>[9,11-13]</sup>表明, 近岸二类水体固有光学特性参数难以获取。目前吸收系数的测量与计算具有足够的精度, 曹文熙<sup>[14]</sup>等基于实测浓度与吸收系数研究了珠江口浮游植物和非藻类颗粒物的吸收, 并给出了相关参数计算公式, 这为

收稿日期: 2014-03-10; 修回日期: 2014-05-12

基金项目: 广东省科技计划重点项目 (2011B031100003); 国家自然科学基金项目 (41201338)

作者简介: 韩留生 (1983-), 男, 山东人, 博士研究生, 主要从事高光谱遥感和水色遥感的研究, (E-mail) hanliusheng6@126.com

通信作者: 陈水森 (1965-), 男, 江西人, 研究员, 博士, 主要从事定量遥感研究, (E-mail) css@gdas.ac.cn.

本研究吸收计算提供了基础；但是总的后向散射系数获取误差较大，限制了生物光学模型的应用<sup>[12]</sup>。张民伟<sup>[9]</sup>、李俊生<sup>[13]</sup>等提出了一种基于表观光学特性计算水体后向散射系数的方法，但是没有考虑双向反射因子 ( $f/Q$ ) 随区域变化而改变；Aurin等<sup>[1]</sup>研究表明  $f/Q$  取值影响生物光学模型的反演精度；刘忠华<sup>[15]</sup>、陆超平<sup>[16]</sup>等基于实测数据拟合了悬浮物的质量浓度和悬浮物后向散射系数 ( $b_{bx}$ ) 关系式，但对于缺乏实测  $b_{bx}$  的研究区还是难以应用该方法。

鉴于此，本研究基于实测的遥感反射率和主要水质参数数据（叶绿素a、悬浮物的质量浓度和CDOM吸收系数），结合生物光学模型，采用模拟退火算法对  $b_{bx}$  和  $f/Q$  同时进行优化，并在此基础上开发广东近岸二类水体生物光学的正演模型，以期近岸二类水体的  $b_{bx}$  获取提供一种新的手段，为广东近岸河口生物光学反演模型开发应用提供必要的参数。

### 1 野外试验及数据获取

笔者于2010-12-03、2012-11-02、2013-12-01分别在徐闻珊瑚礁自然保护区(25个点)、珠江口(18个点)、韩江河口(22个点)行了水体采样并同步测量了水体表面反射率(图1、表1)，同时采用GPS记录采样点的位置 ( $RMS=0.5\text{ m}$ )。实测站位平均水深为2~20 m，实验区的透明度为0.4~1.5 m(表2)，本区域水体可视作光学深水，可以忽略底质的影响。水体采样样本装在棕色瓶内密封冷冻保存，10 h内送到广州实验室测量。水体采样与水质的测量由国家海洋局南海分局环境监测中心负责，水体采样、保存、测量的整个过程依照中华人民共和国地表水和污水监测技术规范<sup>[17]</sup>。CDOM的吸收系数由中国科学院南海海洋研究所测量，测量依据NASA于2003年发布的海洋光学协议版本<sup>[18]</sup>。

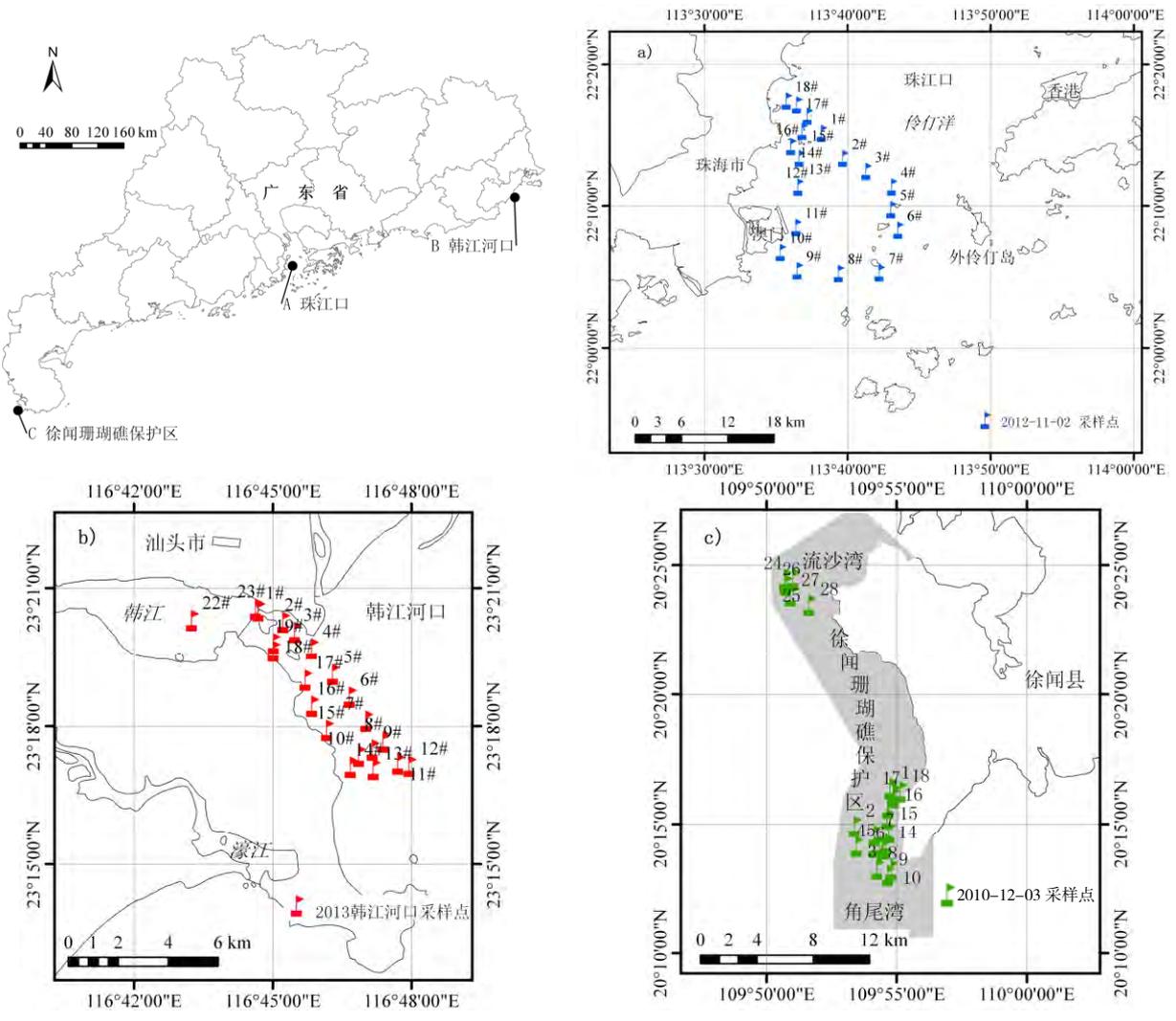


图1 野外试验点分布 (a. 珠江口; b. 韩江河口; c. 徐闻珊瑚礁保护区)

Fig.1 Distribution of field sampling sites (a. the Pearl River Estuary; b. the Hanjiang Estuary; c. the Xuwen Coral Reef Zone)

表 1 2010—2013 年野外试验采样点的位置、时间及测量项目

Tab.1 Dates, measured projects and location for field water sampling during 2010-2013

日期	地点	采样数目/个	测量项目
2012-11-02	珠江口	18 (模型优化数据)	
2013-12-01	韩江河口	22 (验证数据)	CDOM 吸收系数、叶绿素 a、悬浮物、光谱
2010-12-03	徐闻珊瑚礁保护区	25 (模型优化数据)	

表 2 实验区叶绿素 a、悬浮物、CDOM 统计特征

Tab.2 Statistics characteristic of chlorophyll-a, total suspended solid concentrations and  $a_g(440)$  collected in the study area

统计项	叶绿素 a / ( $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )	悬浮物 / ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	$a_g(440\text{ nm}) / \text{m}^{-1}$	透明度/m
平均值	2.2	15.6	1.006	0.6
最大值	11.6	160	2.307	1.5
最小值	0.2	15.6	0.016	0.4

叶绿素 a 的测定采用 GF/C 玻璃纤维滤膜过滤水样, 然后将滤膜用质量分数为 90% 的丙酮置于冰箱中冷冻 20 h 萃取, 然后使用岛津 UV2401 分光光度计测定 665 和 750 nm 处吸光度, 并加入 1 滴质量分数为 1% 的稀盐酸酸化, 换算得到叶绿素 a 的质量浓度<sup>[19]</sup>。悬浮物质量浓度测定是采用孔径为 0.45  $\mu\text{m}$  的滤膜过滤水样, 截留在滤膜上的固体物质于 103  $^{\circ}\text{C}$  烘干至恒重, 并使用 1 : 10 000 精度的天平称重。CDOM 的光谱吸收系数测定, 首先通过 GF/F 玻璃纤维滤膜过滤, 然后经 0.22  $\mu\text{m}$  的 Millipore 膜过滤的水样在 UV2401 分光光度计下测定其光学密度, 然后经换算并进行散射效应订正得到<sup>[18,20]</sup>。

ASD 分析光谱设备 (350~2 500 nm) 用于水面光谱测量<sup>[21]</sup>, 为了避免阴影和太阳直射光照的影响, 采用以下观测几何进行光谱测量: 观测方位角为 135 $^{\circ}$  左右 (设太阳入射的方位角为 0 $^{\circ}$ ), 观测天顶角  $\theta$  为 40 $^{\circ}$  左右。测量时同时收集标准板和天空光的辐射, 以进行大气纠正。光谱仪采样间隔: 在 350~1 000 nm 范围内为 1.4 nm, 在 1 000~2 500 nm 范围内为 2 nm。测量时的风速 < 5 m/s。测量所用标准板的反射率为 30%。水面光谱观测的持续时间为 T 09:30—14:30。

野外测量的光谱数据受到天空光的直射反射的影响, 此外还有其他环境因素的影响, 需要把它转化为受外界条件影响较小且只含有水体信号的离水辐射率, 具体处理方法<sup>[21]</sup>如下:

$$R_{rs} = \frac{L_{sw}}{E_d} = \frac{L_{au} - r \times L_{sky}}{\pi \times L_{ad}} \quad (1)$$

式中:  $E_d$  为水面以上的下行辐射照度;  $L_{ad}$  为水面以上的下行辐射亮度;  $L_{sw}$  为离水辐射率;  $R_{rs}$  为遥感反射率;  $L_{au}$  为水面以上的上行辐射亮度;  $L_{sky}$  为

天空光辐射亮度;  $r = r(W, \theta_v, \Phi_v, \theta_0, \Phi_0)$  为气水界面天空光的漫射反射率,  $r = 2.1\% \sim 5.0\%$ ,  $r$  的大小取决于太阳位置 ( $\theta_0, \Phi_0$ )、观测几何 ( $\theta_v, \Phi_v$ )、风速风向 ( $W$ ) 以及水面的粗糙度等因素。在平静的水面,  $r = 0.022$ ; 在 5 m/s 左右风速条件下,  $r = 0.025$ ; 在 10 m/s 左右风速时,  $r$  取 0.026~0.028; 在本次试验中, 风速为 2~3 级, 在此  $r$  取 0.022<sup>[21]</sup>。

## 2 模型的改进与优化

Gordon<sup>[3]</sup>与 Carder<sup>[22]</sup>等基于辐射传输理论, 推导出遥感反射率  $R_{rs}(\lambda)$  与水体总的吸收系数  $a_s(\lambda)$ 、总的后向散射系数  $b_{b,s}(\lambda)$  之间的函数关系式。具体形式如下:

$$R_{rs}(\lambda) = \frac{ft}{Qn^2} \times \frac{b_{bw}(\lambda) + b_{bx}(\lambda)}{a_w(\lambda) + a_{ph}(\lambda) + a_x(\lambda) + a_g(\lambda) + b_{bw}(\lambda) + b_{bx}(\lambda)} \quad (2)$$

式中:  $R_{rs}$  为水体在波长  $\lambda$  处的遥感反射率;  $t/n^2 = 0.54$ , Morel 等<sup>[23]</sup>的研究表明  $f/Q$  为太阳天顶角、水面粗糙度、水下光场等因素的函数。纯水在波长  $\lambda$  处的吸收系数  $a_w(\lambda)$  的测量结果已具有足够的精度, 可通过文献[24]获得; 波长介于 380~700 nm 时, 多采用 Pope 等<sup>[24]</sup>的数据 (水温 22  $^{\circ}\text{C}$  时纯水的吸收)。  $a_{ph}(\lambda)$  为浮游植物在波长  $\lambda$  处的吸收系数;  $a_g(\lambda)$  为 CDOM 在波长  $\lambda$  处的吸收系数;  $a_x(\lambda)$  为非色素悬浮物在波长  $\lambda$  处的吸收系数。纯水在波长  $\lambda$  处的散射系数  $b_{bw}(\lambda)$  的测量也已相当成熟, 直接使用 Smith 等<sup>[25]</sup>测量的数据;  $b_{bx}(\lambda)$  为悬浮物在波长  $\lambda$  处的后向散射系数。

大量的研究结果<sup>[26-27]</sup>表明 CDOM 的吸收系数  $a_g(\lambda)$  可以很好地用指数函数描述, 具体形式如下:

$$a_g(\lambda) = a_g(\lambda_0) e^{-s_g(\lambda - \lambda_0)} \quad (3)$$

式中:  $\alpha_g(\lambda)$  为 CDOM 在波长  $\lambda$  处的吸收系数;  $\alpha_g(\lambda_0)$  为 CDOM 在参考波长处的吸收系数,  $\lambda_0$  是参考波长, 一般取 440 nm;  $s_g$  为斜率, 研究中取值范围为 0.010~0.020, 它与 CDOM 的组成有关, 本研究采用实测数据拟合得到,  $s_g$  均值为 0.015 (图 2)。

根据曹文熙等<sup>[14]</sup>对珠江口悬浮物吸收系数的研

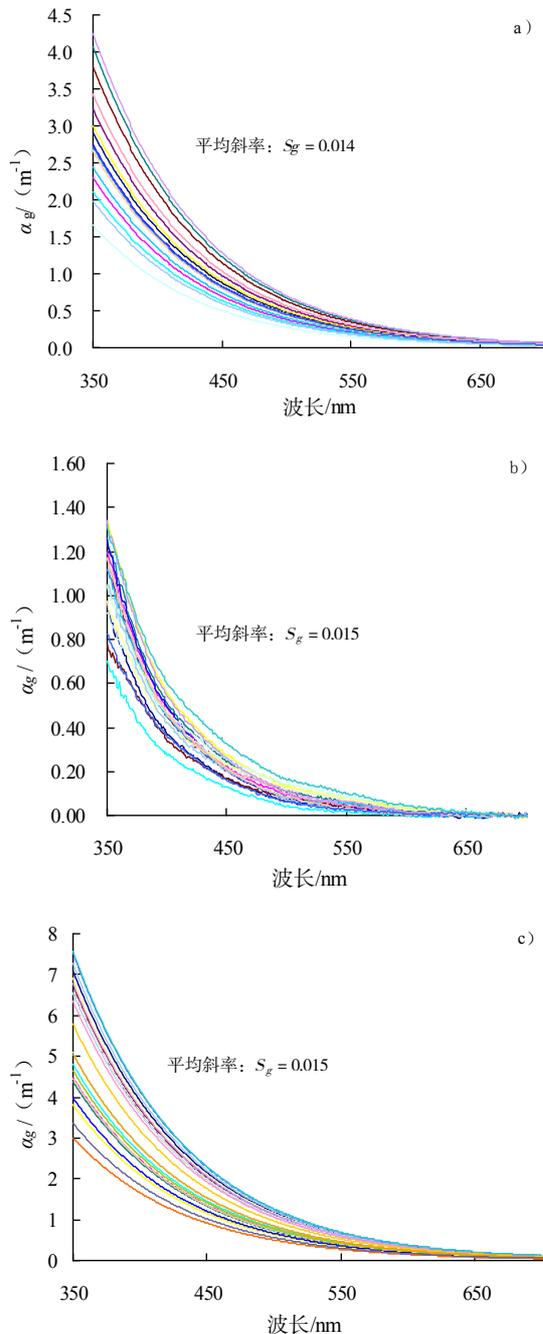


图 2 CDOM 吸收系数分析结果 (a. 2013-12-01, 韩江河口; b. 2012-11-02, 珠江口; c. 2010-12-03, 徐闻珊瑚礁保护区)

Fig.2 The measured absorption coefficients of CDOM (a. Dec 1<sup>st</sup>, 2013, the Hanjiang Estuary; b. Nov. 2<sup>nd</sup>, 2012, the Pearl River Estuary; c. Dec 3<sup>rd</sup>, 2010, the Xuwen Coral Reef Zone)

究表明, 悬浮物的吸收系数随波长的变化呈现指数衰减规律, 悬浮物的吸收系数模型可以表示为:

$$\alpha_x(\lambda) = \alpha_x(\lambda_0) \times e^{-s_x(\lambda-\lambda_0)} \quad (4)$$

式中:  $\alpha_x(\lambda)$  为非色素悬浮物在波长  $\lambda$  处的吸收系数;  $s_x$  为 0.0113;  $\alpha_x(\lambda_0)$  为悬浮物在参考波长处的吸收系数,  $\lambda_0$  是参考波长, 一般取 440 nm, 在本研究区  $\alpha_x(\lambda_0) = 0.0216 \times [TSS]^{1.0247}$ 。

Carder<sup>[22]</sup>和 Lee<sup>[28]</sup>等的研究发现, 对于浮游植物吸收系数与波长的关系, 可以表示为:

$$\alpha_{ph}(\lambda) = A(\lambda)\alpha_{ph}(\lambda_0)^{B(\lambda)} \quad (5)$$

式中:  $\alpha_{ph}(\lambda)$  为浮游植物在波长  $\lambda$  处的吸收系数;  $\alpha_{ph}(\lambda_0)$  为浮游植物在参考波长处的吸收系数, 曹文熙等<sup>[14]</sup>通过研究地面实测浮游植物吸收系数发现, 浮游植物的吸收系数随叶绿素 a 质量浓度的升高而增加, 两者之间的关系可以用幂函数描述:  $\alpha_{ph}(443) = 0.067 \times (chl a)^{0.607}$ ;  $A(\lambda)$ 、 $B(\lambda)$  为随波长变化的常量。

Bukata 等<sup>[29]</sup>研究表明悬浮物的后向散射系数模型可以表示为:

$$b_{bx}(\lambda) = b_{bx}(\lambda_0) \times (\lambda_0/\lambda)^n \quad (6)$$

式中:  $b_{bx}(\lambda)$  为波长  $\lambda$  处的悬浮物的后向散射系数;  $b_{bx}(\lambda_0)$  为参考波长处的悬浮物的后向散射系数,  $\lambda_0$  是参考波长, 一般取 531 nm, 本研究区  $b_{bx}(531) = A \times [TSS]^B$ 。

基于水质参数的吸收和散射模型(公式 3-6), 结合辐射传输方程(2), 输入叶绿素 a、悬浮物的质量浓度、440 nm 处 CDOM 的吸收系数, 仅  $f/Q$  和  $b_{bx}$  为未知量, 需要迭代优化求解上述参数。模拟退火算法<sup>[30]</sup>是一种通用的优化求解算法, 从某一较高初温出发, 伴随温度参数的不断下降, 结合概率突跳特性在解空间中随机寻找目标函数的全局最优解。模拟退火算法与初始值无关, 算法求得的解与初始解状态, 通过赋予搜索过程一种时变且最终趋于 0 的概率突跳性, 从而可有效避免陷入局部极小并最终趋于全局最优的串行结构的优化算法。本研究采用模拟退火算法优化  $b_{bx}$  和  $f/Q$ 。

### 3 结果与讨论

本实验区叶绿素 a 质量浓度的均值为 2.2  $\mu\text{g/L}$ 、悬浮物质量浓度的均值为 15.6 mg/L、CDOM 在 440 nm 处吸收系数平均值为 1.006  $\text{m}^{-1}$  (见表 2), 各种成分含量都不高, 各种成分共同主导该区域水体的光学特性。绘制了 CDOM 440 nm 处吸收系数与叶绿素、悬浮物质量浓度之间的散点图(图 3-a、b), 悬

浮物与 440 nm 处 CDOM 相关性较差 ( $R^2=0.142 2$ ); 叶绿素与 440 nm 处 CDOM 相关性较好 ( $R^2=0.415 5$ ), 说明本研究区 CDOM 主要来源为叶绿素降解物。CDOM 吸收系数斜率  $s_g$  (通常取值在 0.010~0.020 之间) 与 CDOM 的成分有关。在贫、中营养的水体中,  $s_g$  值偏大; 在富营养的水体中,  $s_g$  值偏小<sup>[27]</sup>。本实验区叶绿素质量浓度平均值在 2.2  $\mu\text{g/L}$ , 介于贫、中营养之间, 故  $s_g$  取中间值, 与通过 CDOM 吸收系数计算拟合得到的  $s_g = 0.015$  (见图 2) 结果相符合。

选择珠江口和徐闻珊瑚礁保护区共 43 个站点的数据进行模型参数优化, 通过模拟退火算法迭代得到  $f/Q = 0.104 9$ ,  $b_{bx}(531) = 0.268 \times [TSS]^{0.295}$ , 模拟值与实测值的均方根误差  $RMSE=0.001 6$ , 残差平方和  $SSE=0.000 163$ ;  $F$  统计值为 786[图 4(1)]。

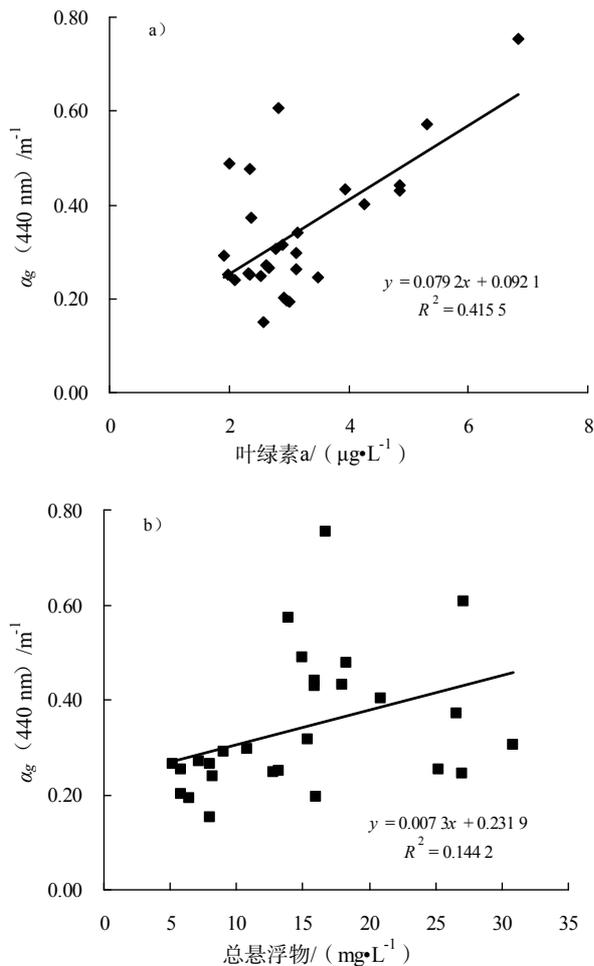


图 3 实测叶绿素 (a)、悬浮物 (b) 分别与 CDOM 在 440 nm 波长处的吸收系数  $\alpha_g(440)$  散点图

Fig.3 Absorption coefficient of CDOM at 440 nm with measured Chlorophyll-a (a) and measured total suspended solids (b)

从前人研究可知,  $f/Q$  受很多因素的影响<sup>[31-32]</sup> (太阳天顶角、水面粗糙度, 水体光场等), 使用简化参数的生物光学模型进行反演, 一般会存在较大误差<sup>[1,13]</sup>, 因此需要优化参数  $f/Q$ 。本研究迭代得到的  $f/Q = 0.104 9$ , 与简化所得的结果 ( $f/Q = 0.094 4$ ) 存在差异。

宋庆君等<sup>[33]</sup>通过对黄、东海实测的后向散射系数与总悬浮物的分析, 构建了 531 nm 处后向散射系数与总悬浮物指数模型,  $b_{bx}(531) = 0.003 2 \times [TSS]^{1.460 2}$ , 而本研究优化得到的模型为  $b_{bx}(531) = 0.268 \times [TSS]^{0.295}$ , 可以看出两者在形式上一致, 都呈指数形式; 但系数差别却很大, 若直接将黄、东海的后向散射模型用于本实验区会产生较大误差 (平均相对误差为 61.3%)。可见, 对生物光学模型参数优化是必要的。

由于缺乏实测的  $b_{bx}$  以及  $f/Q$ , 为此, 基于上述优化的结果, 开发了生物光学的正演模型来验证优化的结果。采用韩江河口 22 个站点数据验证优化模型的精度。在正演模型中输入叶绿素 a、悬浮物的质量浓度, 440 nm 处的 CDOM 的吸收系数即可模拟得到 531 nm 处的遥感反射率。图 4 (2) 为正演模拟得到的 531 nm 处遥感反射率值与实测值对比散点图, 可以看出模拟值与实测值的都在 0.0~0.05 范围内, 变化趋势也基本一致, 模拟值与实测值的均方根误差  $RMSE=0.000 8$ , 残差平方和  $SSE=0.000 12$ ;  $F$  统计值为 271, 样本数  $N=22$ 。同时将 531 nm 波长处的  $b_{bx}$  外推到其他波段, 模拟得到其他波长 (412、443、490、551、667 nm) 处的遥感反射率, 并与实测的遥感反射率对比 (图 5, 6), 可以看出,

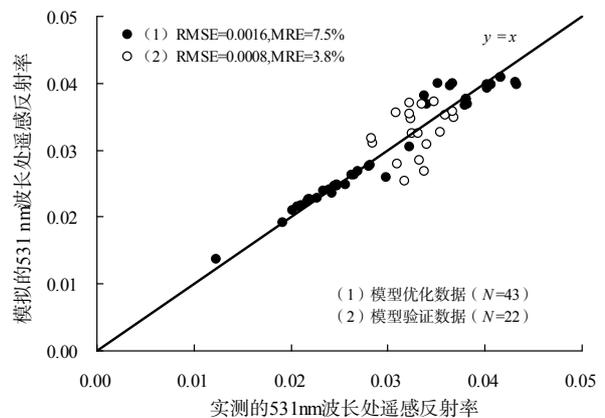


图 4 模拟得到的在 531 nm 波长处的遥感反射率与实测值对比

Fig.4 Comparison between simulated and measured remote sensing reflectance values at the wave length of 531 nm

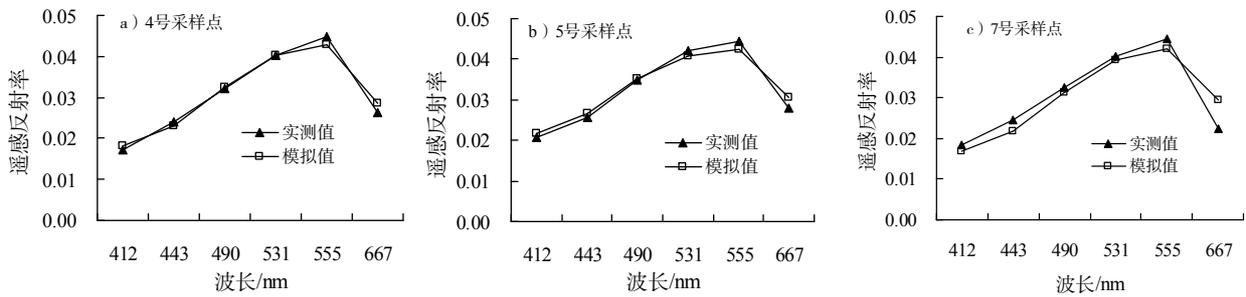


图5 正演模拟的遥感反射率光谱与实测的遥感反射率光谱对比[4号(a)、5号(b)、7号(c)采样点]

Fig.5 Comparison between simulated and measured remote sensing reflectance spectra in station 4(a), 5(b) and 7(c)

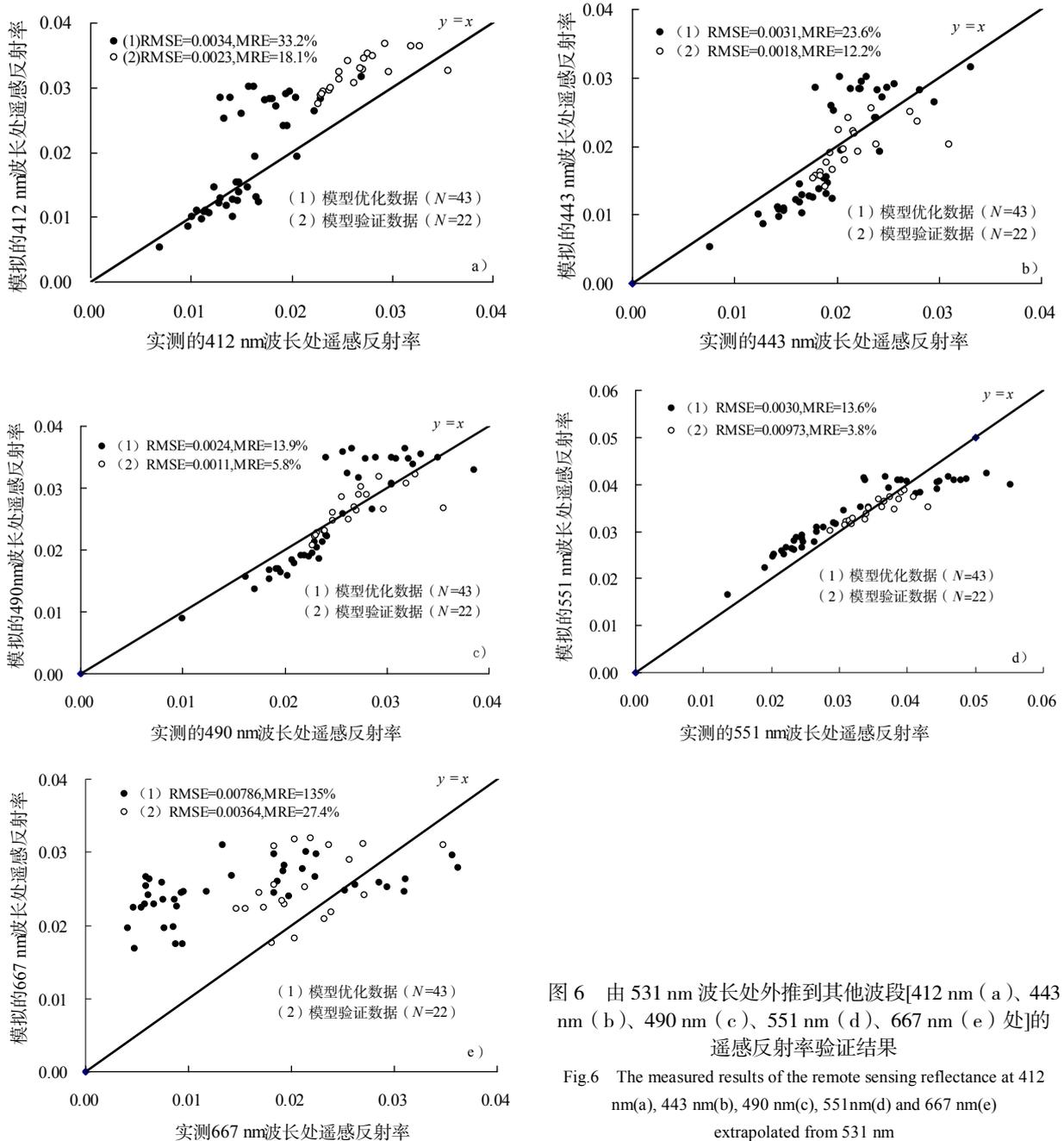


图6 由531 nm波长处外推到其他波段[412 nm(a)、443 nm(b)、490 nm(c)、551 nm(d)、667 nm(e)]的遥感反射率验证结果

Fig.6 The measured results of the remote sensing reflectance at 412 nm(a), 443 nm(b), 490 nm(c), 551 nm(d) and 667 nm(e) extrapolated from 531 nm

除模拟的 667 nm 处遥感反射率比实测值稍微偏高外, 模拟值与实测值总体上比较吻合(平均相对误差 6.19%), 外推的其他波长处的遥感反射率除了在 667 nm 处误差较大外( $RMSE = 0.0036$ ,  $N = 22$ , 见图 6-e), 其他波段都具有较好的精度( $RMSE < 0.0023$ ), 这可能是 667 nm 波长处的叶绿素与水体的强吸收导致这一波长处遥感反射率偏低所致。结果表明, 优化的  $b_{bx}$  和  $f/Q$  能够适合本研究区生物光学模型参数的模拟。

## 4 结论

以珠江口、韩江河口、徐闻珊瑚礁保护区地面实测的遥感反射率、水色 3 要素(叶绿素 a、悬浮物、CDOM 440 nm 处的吸收系数)为数据源, 依据生物光学模型, 结合曹文熙等<sup>[14]</sup>构建的珠江口叶绿素 a 和悬浮物的吸收系数模型, 用模拟退火算法迭代优化了近岸二类水体生物光学模型中的  $b_{bx}$  和  $f/Q$ 。本研究区  $f/Q = 0.1049$ , 而通用算法为  $f/Q = 0.0944$ 。这个差异是因为  $f/Q$  是太阳天顶角、水面粗糙度、水下光场等参数相关的函数<sup>[1,28]</sup>, 对不同的区域需要根据实际数据拟合求解  $f/Q$ 。本研究的  $b_{bx}(531) = 0.268 \times [TSS]^{0.295}$  与黄、东海  $b_{bx}(531) = 0.0032 \times [TSS]^{1.460^2}$  的结果<sup>[7]</sup>也不一致, 将黄、东海的  $b_{bx}$  应用到本研究区会产生较大误差(平均相对误差为 61.3%)。

本研究结合先进的模拟退火算法, 为近岸二类水体的  $b_{bx}$  获取提供了一种新的手段, 并给出了广东近岸二类水体  $b_{bx}$  模型, 这可为生物光学反演模型开发应用提供参考。

致谢 中国科学院南海海洋研究所胡水波博士和国家海洋局南海分局环境监测中心卢楚谦高工进行的水质参数分析。

## 参考文献:

- [1] AURIN D A, DIERSSEN H M. Advantages and limitations of ocean color remote sensing in cdom-dominated, mineral-rich coastal and estuarine waters[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 125: 181-197.
- [2] PREISENDORFER R W. Application of radiative transfer theory to light measurements in the sea, International Union of Geodesy and Geophysics, 1961, 10: 11-30.
- [3] GORDON H R, BROWN O B, EVANS R H, et al. A semianalytic radiance model of ocean color[J]. J Geophys Res-Atmos, 1988, 93: 10909-10924.
- [4] MARITORENA S, SIEGEL D A, PETERSON A R. Optimization of a semianalytical ocean color model for global-scale applications[J]. Appl. Optics, 2002, 41 (15): 2705-2714.
- [5] LEE Z P, CARDER K L, ARNONE R A. Deriving inherent optical properties from water color: A multiband quasi-analytical algorithm for optically deep waters[J]. Appl. Optics, 2002, 41 (27): 5755-5772.
- [6] 李云梅, 黄家柱, 韦玉春, 等. 用分析模型方法反演水体叶绿素的浓度[J]. 遥感学报, 2006, 10 (2): 169-175.
- [7] 唐军武, 田国良. 水色光谱分析与多成分反演算法[J]. 遥感学报, 1997, 1 (4): 252-256.
- [8] 张兵, 申茜, 李俊生, 等. 太湖水体 3 种典型水质参数的高光谱遥感反演[J]. 湖泊科学, 2009, 21 (2): 182-192.
- [9] 张民伟, 董庆, 唐军武, 等. 基于表观光谱反演黄东海水体固有光学量研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31 (5): 1403-1408.
- [10] 李云梅, 黄家柱, 陆皖宁, 等. 基于分析模型的太湖悬浮物浓度遥感监测[J]. 海洋与湖沼, 2006, 37 (2): 171-177.
- [11] 黄昌春, 李云梅, 王桥, 等. 悬浮颗粒物和叶绿素普适性生物光学反演模型[J]. 红外与毫米波学报, 2013, 32 (5): 462-467.
- [12] 韩留生, 陈水森, 陈修治, 等. 以改进的半分析光谱模型反演近海岸透明度[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34 (2): 477-482.
- [13] 李俊生, 张兵, 张霞, 等. 一种计算水体中悬浮物后向散射系数的方法[J]. 遥感学报, 2008, 12 (2): 193-198.
- [14] 曹文熙, 杨跃忠, 许晓强, 等. 珠江口悬浮颗粒物的吸收光谱及其区域模式[J]. 科学通报, 2003, 48 (17): 1876-1882.
- [15] 刘忠华, 李云梅, 檀静, 等. 基于光学闭合原理的太湖水体颗粒物后向散射特性模拟[J]. 光学学报, 2012, 32 (7): 7-15.
- [16] 陆超平, 吕恒, 李云梅. 基于光谱分类的太湖水体后向散射研究[J]. 遥感学报, 2012, 16 (2): 417-434.
- [17] 91-2002 HT. 地表水和污水监测技术规范[S].
- [18] PEGAU S, ZANEVELD J R V, MITCHELL B G, et al. Inherent Optical Properties: Instruments, Characterization, Field Measurements and Data Analysis Protocols[R]/Mueller J L, Fargion G S, McClain C R. Ocean Optics Protocols For Satellite Ocean Color Sensor Validation. Revision 4. Greenbelt, Maryland: NASA/TM-2003-211621, 2002, Vol.4.
- [19] GB17378.7-2007 海洋监测规范[S].
- [20] CHEN Z Q, LI Y, PAN J M. Distributions of colored dissolved organic matter and dissolved organic carbon in the pearl river estuary, China[J]. Cont. Shelf Res., 2004, 24: 1845-1856.
- [21] 唐军武, 田国良, 汪小勇, 等. 水体光谱测量与分析 i: 水面以上测量法[J]. 遥感学报, 2004, 8 (1): 37-44.
- [22] CARDER K L, CHEN F R, LEE Z P, et al. Semianalytic moderate-resolution imaging spectrometer algorithms for chlorophyll a and absorption with bio-optical domains based on nitrate-depletion temperatures[J]. J Geophys Res-Oceans, 1999, 104: 5403-5421.
- [23] MOREL A Y, GORDON H R. Report of the working group on water color[J]. Bound-Lay Meteorol, 1980, 18: 343-355.
- [24] POPE R M, FRY E S. Absorption spectrum (380-700 nm) of pure water. II. Integrating cavity measurements[J]. Appl. Optics, 1997, 36 (33): 8710-8723.
- [25] SMITH R C, BAKER K S. Optical-properties of the clearest natural-waters (200-800 nm) [J]. Appl Optics, 1981, 20 (2): 177-184.
- [26] BRICAUD A, MOREL A, PRIEUR L. Absorption by dissolved organic-matter of the sea (yellow substance) in the uv and visible

- domains[J]. *Limnol Oceanogr*, 1981, 26: 43–53.
- [27] CARDER K L, STEWARD R G, HARVEY G R, et al. Marine humic and fulvic-acids—their effects on remote-sensing of ocean chlorophyll [J]. *Limnol Oceanogr*, 1989, 34: 68–81.
- [28] LEE Z P, CARDER K L, STEWARD R G, et al. An empirical algorithm for light absorption by ocean water based on color[J]. *J Geophys Res-Oceans*, 1998, 103 (C12): 27967–27978.
- [29] BUKATA R P, Jerome J H, KONDRATYEV K Y, et al. Optical properties and remote sensing of inland and coastal waters[M]. Boca Raton: CRC Press, Inc., 1995: 362.
- [30] 汪灵枝, 周优军. 一种有效的全局优化算法——模拟退火算法[J]. *柳州师专学报*, 2005, 20 (2): 120–123.
- [31] LEE Z P, DU K P, VOSS K J, et al. An inherent-optical-property-centered approach to correct the angular effects in water-leaving radiance[J]. *Appl Optics*, 2011, 50 (19): 3155–3167.
- [32] MOREL A, GENTILI B. Diffuse reflectance of oceanic waters.3.Implication of bidirectionality for the remote-sensing problem [J]. *Appl Optics*, 1996, 35 (24): 4850–4862.
- [33] 宋庆君, 唐军武. 黄海、东海海区水体散射特性研究[J]. *海洋学报: 中文版*, 2006, 28 (4): 56–63.

## Optimization of Bio-Optical Algorithm Parameters in Coastal CASE-II Waters

HAN Liusheng<sup>1,2,3</sup>, CHEN Shuisen<sup>3</sup>, LI Dan<sup>3</sup>, CHEN Xiuzhi<sup>4</sup>, LI Yong<sup>3</sup>, CHEN Yanqiao<sup>3</sup>, FANG Ligang<sup>5</sup>

(1. *Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China*; 2. *University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China*; 3. *Guangzhou Institute of Geography, Guangzhou 510070, China*; 4. *South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510300, China*; 5. *Department of Computer Engineering, Suzhou Vocational University, Suzhou 215104, China*)

**Abstract:** The optimization of bio-optical algorithm parameters in remote sensing of CASE-II water is a necessary step before they can be applied, because these parameters vary with the changes of study area. Biochemical parameters (Chlorophyll a, Total suspended solids, CDOM absorption coefficient) and above-water surface reflectance collected in the Pearl River Estuary, Hanjiang Estuary and Xuwen Coral Reef Zone were used to iterate the back scattering coefficient model of total suspended solids ( $b_{bx}$ ) and the bidirectional reflectance ( $f/Q$ ) by simulated annealing algorithm ( $N=43$ ). The calibration results indicated that the  $f/Q$  was 0.104 9, and the  $b_{bx}$  at the wave length of 531 nm was  $0.268 \times [TSS]^{0.295}$ . Then, the forward model was developed to test the optimized results, i.e. the remote sensing reflectance was simulated by inputting water quality parameters ( $N=22$ ). The validation results showed that reflectance obtained from the optimized algorithm agreed well with field observations ( $RMSE=0.000 8$ ,  $N=22$ ). The remote sensing reflectance at the wavelength of 667 nm extrapolated from the Bio-optical Algorithm had poor accuracy ( $RMSE=0.0036$ ,  $N=22$ ) compared with the field data, while all the other band (412, 443, 490, 551 nm) had good precision ( $RMSE<0.002 3$ ,  $N=22$ ). It showed that  $b_{bx}$  and  $f/Q$  varied with different study areas, and they should be optimized according to the measured data. The  $b_{bx}$  and  $f/Q$  values obtained from the optimized algorithm can be applied to bio-optical algorithm.

**Key words:** case-II waters; bio-optical algorithm; simulated annealing algorithm; water quality parameters