

水色要素垂直分布对其遥感反演算法精度的影响

黄昌春¹ 李云梅¹ 徐良将¹ 杨浩¹ 鞠艳² 吕恒¹ 陈霞¹ 王延华¹

(¹ 南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 江苏 南京 210046)
² 南京市南部新城指挥部, 江苏 南京 210046)

摘要 基于辐射传输模型模拟得到叶绿素和悬浮颗粒物在不同垂直分布条件下的遥感反射率数据集, 利用该数据集对现有叶绿素、悬浮颗粒物浓度和固有光学量模型进行检验, 研究了垂直分布对遥感反演算法反演精度的影响。结果表明: 在悬浮颗粒物垂直分布、叶绿素及其垂直分布的影响下, 悬浮颗粒物波段比值模型高估的悬浮颗粒物浓度要大于单波段模型; 叶绿素波段比值模型和三波段模型能够较好地降低由叶绿素垂直分布、悬浮颗粒物及其垂直分布引起的叶绿素浓度高估的程度。悬浮颗粒物和叶绿素及其垂直分布对固有光学量反演具有双重效应, 悬浮颗粒物垂直分布将使得吸收系数和后向散射系数被高估, 而叶绿素垂直分布将使得吸收系数和后向散射系数被低估。在悬浮颗粒物和叶绿素共同作用下, 固有光学反演结果具有较大的不确定性。

关键词 海洋光学; 垂直分布; 辐射传输; 遥感反演算法

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201232.1101002

Influence of Vertical Distribution of Water Consistent to Precision of Remote Sensing Retrieval Algorithm

Huang Changchun¹ Li Yunmei¹ Xu Liangjiang¹ Yang Hao¹ Ju Yan

Lü Heng¹ Chen Xia¹ Wang Yanhua¹

(¹ Key Laboratory of Virtual Geographic Environment, Ministry of Education, Nanjing Normal University, Nanjing, Jiangsu 210046, China)
² Southern Newtown Headquarters, Nanjing, Jiangsu 210046, China)

Abstract Based on the radiation transfer model, the remote sensing reflectance dataset is simulated under different vertical distributions of chlorophyll-a and suspended particle. In order to study the influence of vertical distribution to the remote sensing retrieval algorithm precision, the dataset is supplied to check the retrieval model of chlorophyll-a, suspended particle and inherent optical properties. The results indicate that the overestimate of suspended particle band ratio model is greater than single band model under the effect of suspended particle and chlorophyll-a vertical distribution. Chlorophyll-a band ratio and three-band model can reduce the overestimation of chlorophyll-a induced by the suspended particle and chlorophyll-a vertical distribution. The suspended particle and chlorophyll-a vertical distribution have double effects on the inherent optical properties retrieval model. Namely, the suspended particle vertical distribution will lead to overestimate the absorption and backscattering coefficient, while the chlorophyll-a vertical distribution will lead to underestimate. The results of inherent optical properties retrieval model is uncertain under the double effects of suspended particle and chlorophyll-a.

Key words oceanic optics; vertical distribution; radiation transfer; remote sensing retrieval algorithm

OCIS codes 010.4450; 010.1110; 010.0280

1 引言

风浪作用不仅使得水-气界面状况(水表面反

射、折射和透射率)、随机反射入仪器视场的太阳直射光等遥感反射率现场准确测量的影响因子具有较

收稿日期: 2012-04-20; **收到修改稿日期:** 2012-06-07

基金项目: 国家自然科学基金(41030751, 40701136, 41103047, 50908116)、江苏省高校自然科学研究重大项目(11KJA170003)、高层次人才引进科研启动基金(20111105XGQ0244)和江苏高校优势学科建设工程(1411109012)资助课题。

作者简介: 黄昌春(1982—), 男, 博士, 讲师, 主要从事环境污染遥感监测方面的研究。

E-mail: huangchangchun_aaa@163.com

大的不确定性^[1,2]；而且由风浪引起的沉积物再悬浮改变了水色要素组成及其空间分布(水体中悬浮颗粒物含量增加、浮游植物生物量发生改变、有机物和无机物比例发生改变等)和水体生物光学特性,导致水体真光层深度降低、水体漫衰减系数和遥感反射率光谱发生改变,最终使得内陆湖泊固有光学量、水色要素反演算法普适性和反演精度得不到显著提高。风浪引起的沉积物再悬浮改变了水色要素的垂直分布,在低风速条件下,悬浮颗粒物和叶绿素出现较为严重的分层现象^[3,4]。表观光学量(遥感反射率、漫衰减系数等)和固有光学量之间的定量表达关系是水环境遥感监测机理之所在,同时也是水色生物光学反演模型算法的基础。最初的表现光学量与固有光学量之间的关系是基于水体各向均一条件^[5~8]。随着对遥感反演模型精度要求不断地提高,不同水色要素的散射相函数、观测时太阳天顶角的变化和水色要素垂直非均一分布对表观光学量与固有光学量之间定量关系的影响得到充分研究^[9~19]。而对于二类水体,由于水色要素之间相互独立,水体垂直非均一分布对表观光学量与固有光学量之间关系的影响更为复杂。

水色要素垂直分布一方面破坏水体垂直均一分布的假设,使得遥感反射率大小发生变化的同时还

改变了其光谱形状,进而影响水色遥感反演算法的精度。本文利用水动力模型和 HYDROLIGHT 软件模拟叶绿素和悬浮颗粒物垂直分布条件下遥感反射率,利用不同垂直分布条件下对应的遥感反射率建立叶绿素和悬浮颗粒物反演模型,对比研究叶绿素和悬浮颗粒物不同遥感反演算法(经验算法、半分析算法和分析算法)对由水色垂直分布引起的遥感反射率光谱变化的敏感度,确定水色要素垂直分布对水色要素不同的遥感算法的影响。

2 数据与方法

HYDROLIGHT 是基于辐射传输理论的水体光学模拟软件,采用不变嵌入法求解辐射传输方程获得辐亮度随水深、天顶角、方位角、波长的分布变化情况^[20~22]。利用水动力模型模拟不同风速条件下悬浮颗粒物(SPM)和叶绿素垂直分布状况。再利用 HYDROLIGHT 软件模拟不同叶绿素和悬浮颗粒物垂直分布条件下遥感反射率得到本研究数据集,模拟输入参数详见文献[23]。详细技术路线如图 1 所示,其中 CDOM 表示黄质, C_{Chla} 为叶绿素浓度, R_{rs} 为遥感反射率,IOP 表示固有光学量。

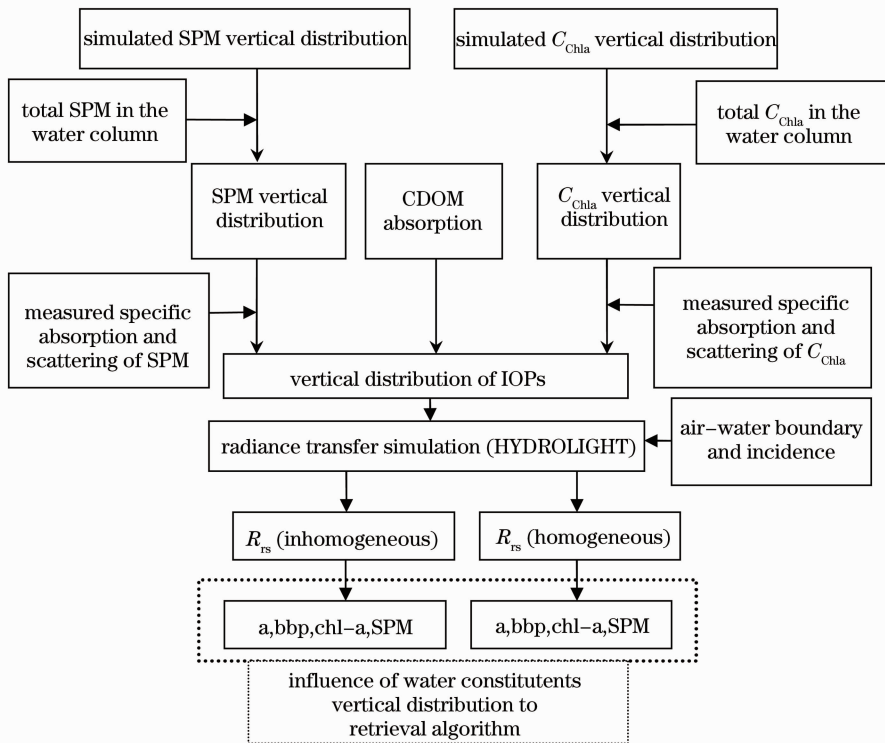


图 1 技术路线图

Fig. 1 Flow chart of technical roadmap

3 结果与讨论

3.1 经验模型算法

3.1.1 悬浮颗粒物反演模型

目前经验模型算法主要包括单波段模型、波段比值模型和单波段光谱微分模型。水色要素垂直分布对经验算法的影响主要以单波段和波段比值算法为例。根据模拟数据建立悬浮颗粒物浓度单波段模型为

$$C_{\min} = AR_{rs}(695) - B, \quad (R^2 = 0.998, N = 135) \quad (1)$$

式中 A, B 为回归系数, R 为决定系数。图 2(a) 给出了垂直均一条件下叶绿素对悬浮颗粒物单波段反演结果的影响。在低悬浮颗粒物浓度条件下, 随着叶绿素浓度的增加, 叶绿素引起的悬浮颗粒物被高估

的程度逐渐增大, 但随着悬浮颗粒物浓度的增加, 叶绿素对悬浮颗粒物反演结果的影响越小; 在高浓度悬浮颗粒物条件下 (大于 66 mg/L), 随着叶绿素浓度的增加, 叶绿素引起的悬浮颗粒物被低估的程度逐渐增大。图 2(b) 为无叶绿素影响下不同风速对应的悬浮颗粒物垂直分布对悬浮颗粒物反演结果的影响。风速为 3 m/s 时, 垂直分布将使得悬浮颗粒物被高估 30.5%; 随着风速的增加, 悬浮颗粒物被高估的程度呈现先增加后降低。图 2(c) 为叶绿素和悬浮颗粒物垂直分布对悬浮颗粒物反演结果的影响。在叶绿素以及叶绿素和悬浮颗粒物垂直分布影响下, 悬浮颗粒物浓度 (在小于 50 mg/L 条件下) 将被严重高估 (最高可以达到 393.4%)。

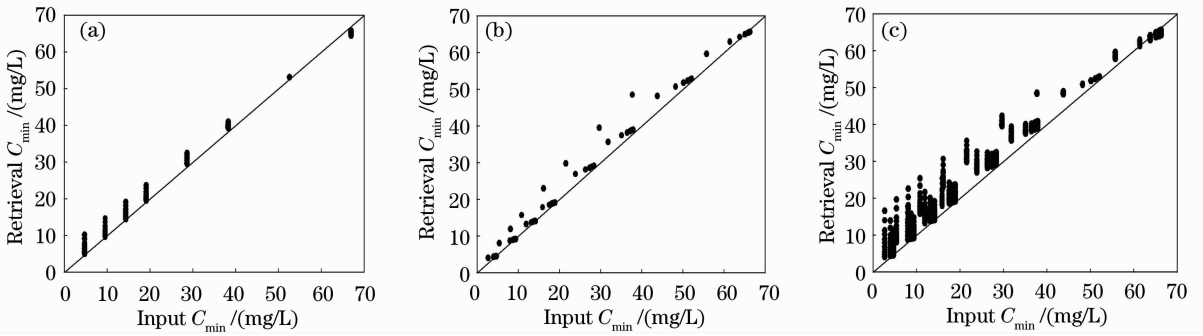


图 2 (a) 垂直均一条件下叶绿素对悬浮颗粒物反演结果影响; (b) 无叶绿素影响悬浮颗粒物垂直分布对悬浮颗粒物反演结果的影响; (c) 叶绿素和悬浮颗粒物垂直分布对悬浮颗粒物反演结果的影响 (悬浮颗粒物单波段模型)

Fig. 2 Influence of chlorophyll-a to suspended particle retrieval results under the vertical homogeneous water; (b) influence of suspended particle vertical distribution to suspended particle retrieval results; (c) influence of chlorophyll-a and suspended particle vertical distribution to suspended particle retrieval results (single band model of suspended particle)

根据模拟数据建立悬浮颗粒物浓度波段比值模型:

$$C_{\min} = A[R_{rs}(695) / R_{rs}(555)] - B. \quad (R^2 = 0.998, N = 135) \quad (2)$$

图 3 给出了叶绿素、悬浮颗粒物垂直分布和叶绿素及其叶绿素和悬浮颗粒物垂直分布对悬浮颗粒物波段比值反演结果的影响。波段比值在一定程度上能

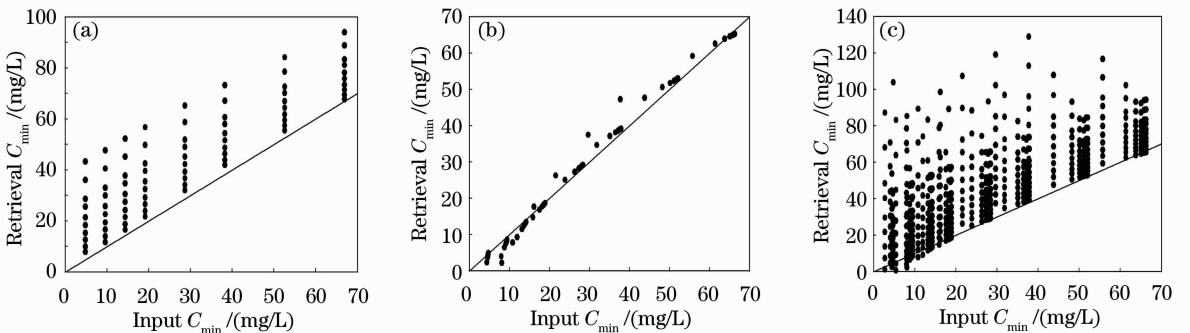


图 3 (a) 垂直均一条件下叶绿素对悬浮颗粒物反演结果影响; (b) 无叶绿素影响悬浮颗粒物垂直分布对悬浮颗粒物反演结果的影响; (c) 叶绿素和悬浮颗粒物垂直分布对悬浮颗粒物反演结果的影响 (悬浮颗粒物波段比值模型)

Fig. 3 (a) Influence of chlorophyll-a to suspended particle retrieval results under the vertical homogeneous water; (b) influence of suspended particle vertical distribution to suspended particle retrieval results; (c) influence of chlorophyll-a and suspended particle vertical distribution to suspended particle retrieval results (band ratio model of suspended particle)

够降低由悬浮颗粒物垂直分布引起的悬浮颗粒物高估状况[图 3(b)],但是在叶绿素及其垂直分布影响下,悬浮颗粒物波段比值模型将会严重高估悬浮颗粒物浓度[图 3(a)和(c)]。

3.1.2 叶绿素反演模型

根据模拟数据建立叶绿素浓度单波段模型为

$$C_{ph} = AR_{rs}(715) - B. \quad (3)$$

$(R^2 = 0.999, N = 135)$

图 4 给出了悬浮颗粒物、叶绿素垂直分布和悬浮颗粒物及其叶绿素和悬浮颗粒物垂直分布对叶绿素单波段反演结果的影响。叶绿素垂直分布使得叶绿素单波段反演模型将高估 22.3% 叶绿素浓度[图 4(b)];而在悬浮颗粒物影响下,叶绿素将被严重高估,随着悬浮颗粒物浓度的增加,被高估的叶绿素浓度越高[图 4(a)];叶绿素和悬浮颗粒物垂直分布也将使得叶绿素浓度被严重高估[图 4(c)]。

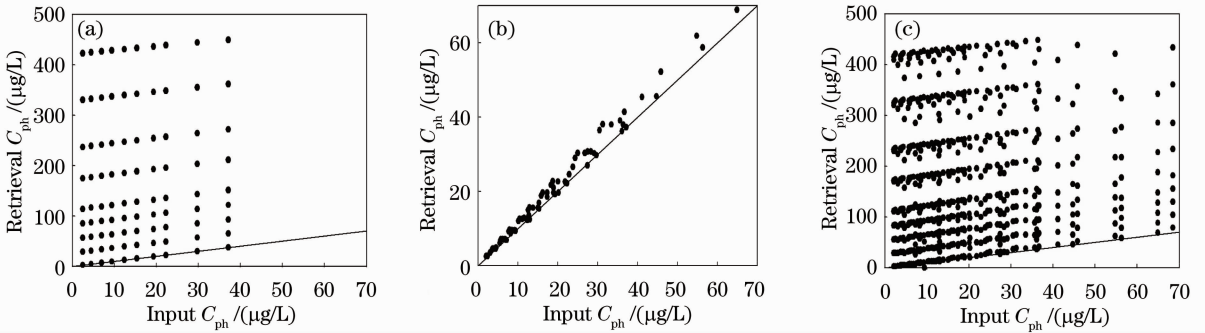


图 4 (a)垂直均一条件下悬浮颗粒物对叶绿素反演结果影响;(b)无悬浮颗粒物影响叶绿素垂直分布对叶绿素反演结果的影响;(c)叶绿素和悬浮颗粒物垂直分布对叶绿素反演结果的影响(叶绿素单波段模型)

Fig.4 (a) Influence of suspended particle to chlorophyll-a retrieval results under the vertical homogeneous water; (b) influence of chlorophyll-a vertical distribution to chlorophyll-a retrieval results; (c) influence of chlorophyll-a and suspended particle vertical distribution to chlorophyll-a retrieval results (single band model of chlorophyll-a)

根据模拟数据建立叶绿素浓度波段比值模型:

$$C_{ph} = A[R_{rs}(715)/R_{rs}(675)] - B. \quad (4)$$

$(R^2 = 0.998, N = 135)$

图 5 给出了悬浮颗粒物、叶绿素垂直分布和悬浮颗粒物及其叶绿素和悬浮颗粒物垂直分布对叶绿素波段比值反演结果的影响。与单波段模型相比,波段比值并不能较好地解决叶绿素垂直分布对叶绿素反演结果的影响[对比图 4(b)和 5(b)],反演精度并没有得到显著提高;但是,波段比值能够较好地解决

悬浮颗粒物及其垂直分布对叶绿素反演结果的影响,分别对比图 4(a)和 5(a),图 4(c)和 5(c),发现图 4 中被严重高估的样点的反演精度已经得到了显著的改善。说明波段比值模式在叶绿素反演模型中具有一定的优势。

3.2 叶绿素半分析模型算法

半分析模型从水色参数光学特征出发,基于遥感反射率与固有光学之间的关系,利用遥感反射率反演水色要素,该模型具有一定的物理意义。其中

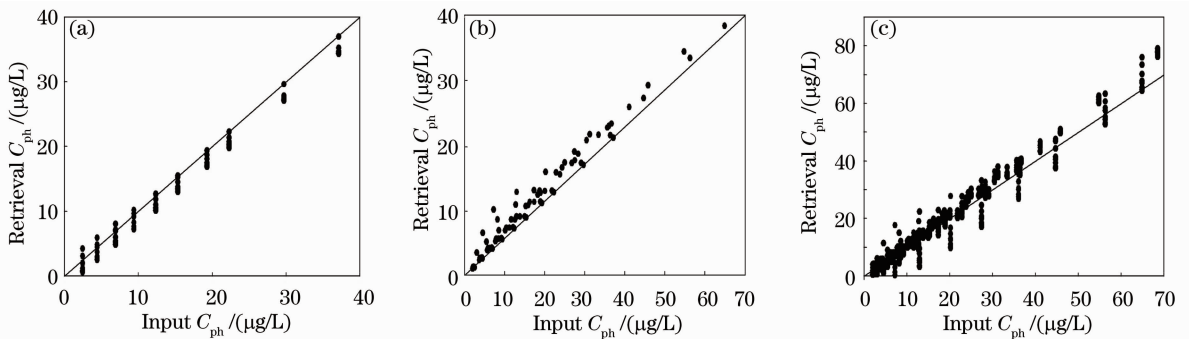


图 5 (a)垂直均一条件下悬浮颗粒物对叶绿素反演结果影响;(b)无悬浮颗粒物影响叶绿素垂直分布对叶绿素反演结果的影响;(c)叶绿素和悬浮颗粒物垂直分布对叶绿素反演结果的影响(叶绿素波段比值模型)

Fig.5 (a) Influence of suspended particle to chlorophyll-a retrieval results under the vertical homogeneous water; (b) influence of chlorophyll-a vertical distribution to chlorophyll-a retrieval results; (c) influence of chlorophyll-a and suspended particle vertical distribution to chlorophyll-a retrieval results (band ratio model of chlorophyll-a)

较为具有代表性的是三波段模型。根据模拟数据建立叶绿素浓度波段比值模型：

$$C_{ph} = A[R_{rs}^{-1}(665) - R_{rs}^{-1}(690)] R_{rs}(725) + B. \quad (5)$$

$(R^2 = 0.999, N = 135)$

图 6 给出了悬浮颗粒物、叶绿素垂直分布和悬浮颗粒物及其叶绿素和悬浮颗粒物垂直分布三种情况对叶绿素三波段模型反演结果的影响。在悬浮颗粒物影响下，三波段模型将会低估叶绿素浓度[图 6(a)]，随着叶绿素浓度的增加，叶绿素浓度被低估的程度不断

降低(叶绿素浓度为 36 $\mu\text{g/L}$ 时，最大会被低估 25.7%)；而由叶绿素自身垂直分布影响，被高估的叶绿素浓度部分将有所降低[对比图 4(b)、5(b)和 6(b)]；但是悬浮颗粒物和叶绿素垂直分布对叶绿素三波段模型反演结果的影响与对波段比值反演结果影响较为相似，即与波段比值模型相比，三波段模型并没有较好地改善在悬浮颗粒物和叶绿素及其垂直分布影响下叶绿素浓度反演的结果。

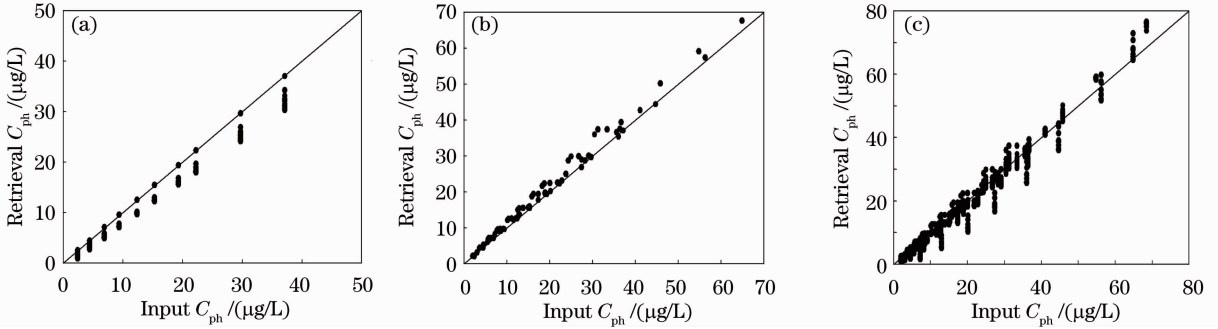


图 6 (a)垂直均一条件下悬浮颗粒物对叶绿素反演结果影响；(b)无悬浮颗粒物影响叶绿素垂直分布对叶绿素反演结果的影响；(c)叶绿素和悬浮颗粒物垂直分布对叶绿素反演结果的影响(叶绿素三波段模型)

Fig. 6 (a) Influence of suspended particle to chlorophyll-a retrieval results under the vertical homogeneous water; (b) influence of chlorophyll-a vertical distribution to chlorophyll-a retrieval results; (c) influence of chlorophyll-a and suspended particle vertical distribution to chlorophyll-a retrieval results (three-band model of chlorophyll-a)

3.3 固有光学量分析模型算法

分析模型是以辐射传输模型为基础，根据固有光学量与表观光学量之间的物理关系，基于固有光学量参数模型对固有光学量或水色要素进行反演。以半分析算法(QAA)^[24]、线性矩阵(LM)算法^[25]和优化(GSM)算法^[26]为代表的分析模型具有明确的物理意义。其中 QAA 模型已被应用于太湖水域固有光学量的反演^[27]，故本研究选取 QAA 算法为代表。QAA 算法详细步骤详见文献[24]。图 7 为叶

绿素和悬浮颗粒物非共同作用且垂直均一分布条件下 QAA 模型反演的 440 nm 处总吸收系数和总后向散射系数与模拟输入值。QAA 模型反演值和模拟输入值具有极好的一致性，其中吸收系数最大相对误差为 12.3% [图 7(a)]，后向散射系数最大相对误差为 10.2% [图 7(b)]。均方根百分比误差(RMSP)分别为 2.4% 和 2.1%。由此可见，在叶绿素和悬浮颗粒物互不影响且垂直均一分布条件下，QAA 算法具有较高的反演精度。

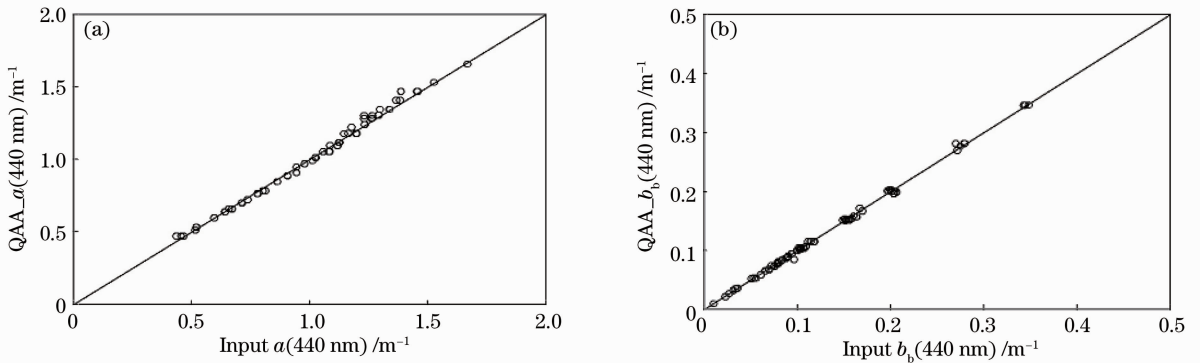


图 7 (a)吸收系数和(b)后向散射系数反演值与输入值对比(叶绿素和悬浮颗粒物非共同作用)

Fig. 7 Retrieval (a) absorption and (b) backscattering coefficient versus input value (non-double effect of suspended particle and chlorophyll-a)

图 8 为垂直均一条件下叶绿素和悬浮颗粒物共同作用下 QAA 模型反演的 440 nm 处总吸收系数和总后向散射系数与模拟输入值。由图 8(a)可见,当吸收系数小于 1.5 时,反演值和模拟输入值具有较高的一致性;但当吸收系数大于 1.5 时,总吸收系数系数将会被低估,随着叶绿素和悬浮颗粒物浓度

的增大,低估程度逐渐加剧,最大可被低估 50%。图 8(b)表明在叶绿素和悬浮颗粒物共同作用下,后向散射系数同样被低估,随着悬浮颗粒物浓度的增大,低估程度逐渐降低,但随着叶绿素浓度的增大,低估程度会逐渐升高,最大可被低估 45.7%。

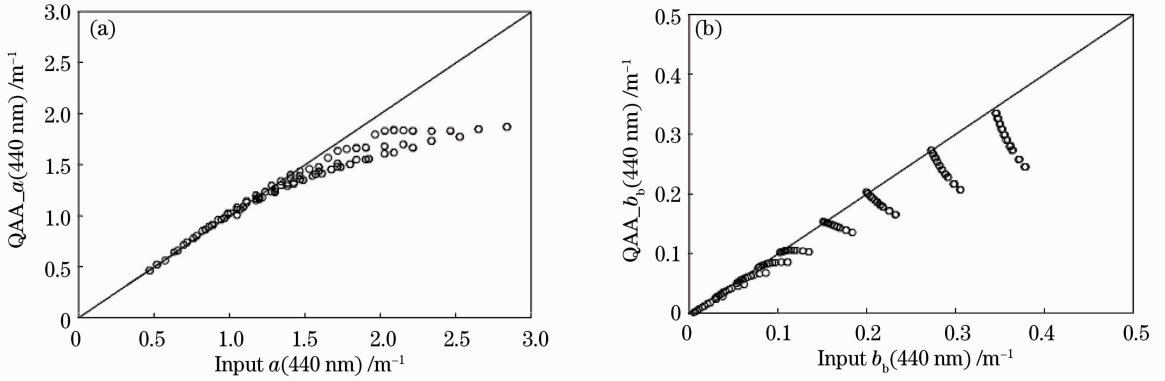


图 8 (a)吸收系数和(b)后向散射系数反演值与输入值对比(叶绿素和悬浮颗粒物共同作用)

Fig. 8 Retrieval (a) absorption and (b) backscattering coefficient versus input value (double effects of suspended particle and chlorophyll-a)

在排除悬浮颗粒物和叶绿素共同作用对反演结果的影响下,仅研究垂直分布模式对 QAA 反演结果的影响。图 9 显示分别在叶绿素和悬浮颗粒物单独作用下 QAA 反演和模拟输入的 440 nm 处总吸

收系数和总后向散射系数对比结果。在叶绿素垂直分布作用下,QAA 反演 $a(440 \text{ nm})$ 要小于模拟输入 $a(440 \text{ nm})$ [图 9(a)],即 $a(440 \text{ nm})$ 将会被低估,其中风速为 3 m/s 时(层化现象严重) $a(440 \text{ nm})$ 被严

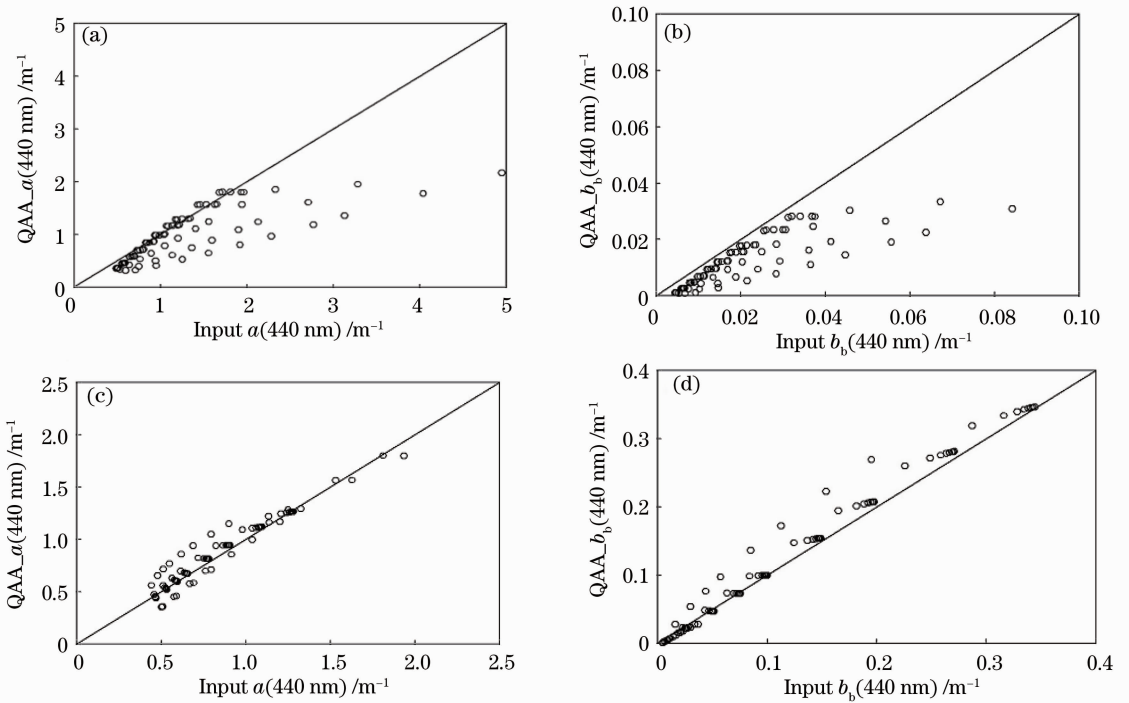


图 9 分别在[(a)和(b)]叶绿素和[(c)和(d)]悬浮颗粒物作用下吸收系数和后向散射系数反演值与输入值对比
Fig. 9 Retrieval absorption and backscattering coefficient versus input value affected by [(a) and (b)] chlorophyll-a and [(c) and (d)] suspended particle, respectively

重低估,随着风速的增加(层化现象减弱),低估程度逐渐减弱,低估的程度同时随着叶绿素浓度的增加而逐渐增大,最大将会被低估 60% (当叶绿素浓度为 $70 \mu\text{g/L}$ 时)。在叶绿素垂直分布作用下 QAA 反演 $b_b(440 \text{ nm})$ 明显低于模拟输入 $b_b(440 \text{ nm})$ [图 9(c)], $b_b(440 \text{ nm})$ 被低估程度随着叶绿素浓度和风速的变化与 $a(440 \text{ nm})$ 相似。

在悬浮颗粒物垂直分布作用下, $a(440 \text{ nm})$ 将会被高估,高估程度随风速增加而增大,高估程度随着颗粒物浓度的增加呈现先增加再减小的趋势;但高估程度相对较低, $a(440 \text{ nm})$ 最大将会被高估 30% (风速为 3 m/s , 悬浮颗粒物浓度为 38.6 mg/L) [图 9(b)]。后向散射系数 [$b_b(440 \text{ nm})$] 整体将会被高估,最大将会被高估 40% [图 9(d)], 随着风速和悬浮颗粒物浓度的增加, $b_b(440 \text{ nm})$ 被高估的程度将不断降低。

由图 9 可知,叶绿素、悬浮颗粒物及其垂直分布结构分别对 QAA 反演结果具有不同程度的正负影响。因此,悬浮颗粒物、叶绿素及其垂直分布共同作用对 QAA 反演结果的影响较为复杂(图 10)。总体而言,在高叶绿素和悬浮颗粒物浓度下, QAA 反演结果受到的悬浮颗粒物、叶绿素及其垂直分布结构共同作用影响较大,总吸收系数和后向散射系数最大将会分别被低估 60% 和 57%。在低叶绿素和悬浮颗粒物浓度下,总吸收系数估算相对较为准确,但受垂直分布影响,仍有部分样本被低估[图 10(a)]; 而总后向散射系数较为复杂,垂直分布结构对最终反演结果的影响受叶绿素和悬浮颗粒物组成差异影响较大,当叶绿素占据绝对主导时,总后向散射系数将会被低估,而当悬浮颗粒物与叶绿素相当或占主导时,总后向散射系数将会被高估[图 10(b)]。

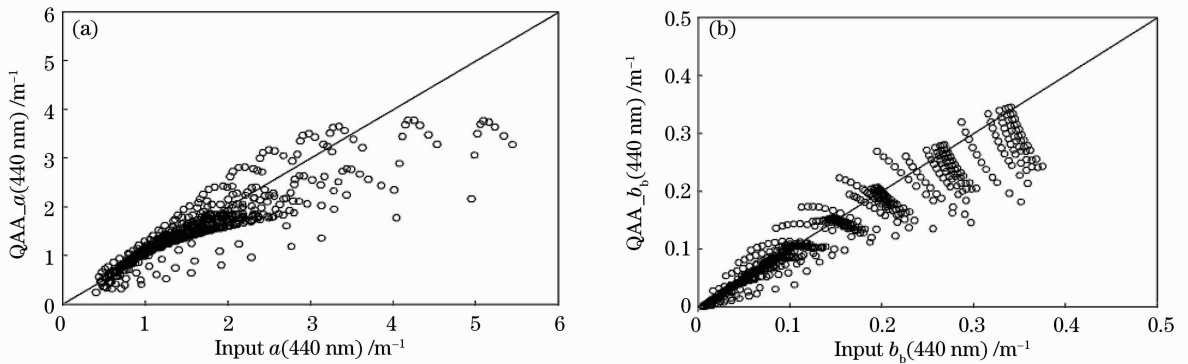


图 10 (a)吸收系数和(b)后向散射系数反演值与输入值对比(叶绿素和悬浮颗粒物单独作用)

Fig. 10 Retrieval (a) absorption and (b) backscattering coefficient versus input value (single effect of suspended particle and chlorophyll-a)

4 结 论

1) 悬浮颗粒物垂直分布影响最大时,将使得悬浮颗粒物单波段模型和波段比值模型高估悬浮颗粒物浓度达 30.5%;而在叶绿素及其垂直分布影响下,波段比值对悬浮颗粒物浓度的高估程度要远高于单波段模型。叶绿素垂直分布最大可使叶绿素单波段反演模型高估 22.3%,而叶绿素波段比值和半分析模型(三波段算法)算法能够降低叶绿素被高估的程度;波段比值和三波段能够显著降低由悬浮颗粒物和叶绿素垂直分布所引起的叶绿素被高估的程度。

2) 不同水体组分的垂直分布结构对 QAA 反演结果具有不同的影响。在叶绿素垂直分布影响下, QAA 将会低估水体的总吸收系数和总后向散射系数,最大低估程度可达到 60%;而在悬浮颗粒

物垂直分布结构影响下, QAA 将会高估水体的总吸收系数和总后向散射系数,最大高估程度可达到 30%。在叶绿素和悬浮颗粒物共同作用下, QAA 模型反演的总吸收系数和后向散射系数最大将会分别被低估 60% 和 57%。

参 考 文 献

- Huang Changchun, Li Yunmei, Wang Qiao *et al.*. Interaction of influencing factors to bidirectional and air-water interface parameter in turbid water body[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 625~632
黄昌春, 李云梅, 王 桥 等. 水-气界面参数和二向性影响因素交互作用研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 625~632
- Huang Changchun, Li Yunmei, Sun Deyong *et al.*. Analysis of Q value influencing factors and its parametrization [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8): 2059~2066
黄昌春, 李云梅, 孙德勇 等. Q 值的影响因素分析及其参数化 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(8): 2059~2066
- Shi Kun, Li Yunmei, Wang Qiao *et al.*. Study of scattering coefficients model in inland eutrophic lake [J]. *Acta Optica*

- Sinica*, 2010, **30**(9): 2477~2485
- 施 坤, 李云梅, 王 桥 等. 内陆湖泊富营养化水体散射系数模型研究 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2477~2485
- 4 Liu Zhonghua, Li Yunmei, Tan Jing *et al.*. Simulation of backscattering properties of particles in Taihu lake based on optical closure principle[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(7): 0701002
- 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): 0701002
- 5 H. R. Gordon, O. B. Brown, M. M. Jacobs. Computed relationships between the inherent and apparent optical properties of a flat homogeneous ocean[J]. *Appl. Opt.*, 1975, **14**(2): 417~427
- 6 J. T. O. Kirk. Dependence of relationship between inherent and apparent optical properties of water on solar altitude[J]. *Limnol. Oceanogr.*, 1984, **29**(2): 350~356
- 7 Z. P. Lee, K. L. Carder, A. A. Robert. Deriving inherent optical properties from water color: a multiband quasi-analytical algorithm for optically deep waters[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(27): 5755~5772
- 8 R. A. Mafjione. Theoretical developments on the optical properties of highly turbid waters and sea ice [J]. *Limnol. Oceanogr.*, 1998, **43**(1): 29~33
- 9 H. R. Gordon, O. B. Brown, R. H. Evans. A semianalytic radiance model of ocean color[J]. *J. Geophys. Res.*, 1988, **93**(D9): 10909~10924
- 10 J. T. O. Kirk. Volume scattering function, average cosines, and the underwater light field[J]. *Limnol. Oceanogr.*, 1991, **36**(3): 455~467
- 11 Z. P. Lee, K. L. Carder, K. P. Du. Effects of molecular and particle scatterings on the model parameter for remote-sensing reflectance[J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(25): 4957~4964
- 12 V. I. Haltrin. Self-consistent approach to the solution of the light transfer problem for irradiances in marine waters with arbitrary turbidity, depth, and surface illumination: I: case of absorption and elastic scattering[J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(18): 3773~3784
- 13 P. Forget, P. Broche, J. J. Naudin. Reflectance sensitivity to solid suspended sediment stratification in coastal water and inversion: a case study[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2001, **77**(1): 92~103
- 14 L. Nanu, C. Robertson. The effect of suspended sediment depth distribution on coastal water spectral reflectance: theoretical simulation[J]. *Int. J. Remote Sensing*, 1993, **14**(2): 225~239
- 15 H. R. Gordon. Diffuse reflectance of the ocean: influence of nonuniform phytoplankton pigment profile [J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(12): 2116~2129
- 16 Cao Wenxi. Influence of vertical chlorophyll structure on water-leaving radiance [J]. *Marine Science Bulletin*, 2000, **19**(3): 30~37
- 曹文熙. 叶绿素垂直分布结构对离水辐亮度光谱特性的影响 [J]. *海洋通报*, 2000, **19**(3): 30~37
- 17 J. Piskozub, T. Neumann, L. Woźniak. Ocean color remote sensing: choosing the correct depth weighting function[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(9): 14683~14688
- 18 J. R. Zaneveld, A. Barnard, E. Boss. Theoretical derivation of the depth average of remotely sensed optical parameters[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(22): 9052~9061
- 19 J. R. Zaneveld, S. W. Pegau. Robust underwater visibility parameter[J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(23): 2997~3009
- 20 C. D. Mobley. Light and Water, Radiative Transfer in Natural Waters[M]. San Diego: Academic Press, 1994
- 21 C. D. Mobley, L. K. Sundman. Hydrolight 4.1 Technical Documentation[S]. Sequoia Scientific. Wash. Inc. Redmond, 2000
- 22 C. D. Mobley, L. K. Sundman. Hydrolight 4.1 Users' Guide [S]. Sequoia Scientific. Wash. Inc. Redmond, 2000
- 23 Huang Changchun, Li Yunmei, Wang Qiao *et al.*. Influence of vertical distribution of water consistent to the remote sensing based on hydronamic[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(2): 0201005
- 黄昌春, 李云梅, 王 桥 等. 基于水动力的水体组分垂直结构对遥感信号的影响[J]. *光学学报*, 2012, **32**(2): 0201005
- 24 Z. P. Lee, K. L. Carder, A. A. Robert. Deriving inherent optical properties from water color: a multiband quasi-analytical algorithm for optically deep waters [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(27): 5755~5772
- 25 F. E. Hoge, C. W. Wright, F. E. Igon *et al.*. Satellite retrieval of inherent optical properties by inversion of an oceanic radiance model: a preliminary algorithm [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(3): 495~504
- 26 S. Maritorena, D. A. Siegel, A. R. Peterson *et al.*. Optimization of a semianalytical ocean color model for global-scale applications [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(15): 2705~2714
- 27 Le Chengfeng, Yunmei Li, Yong Zha *et al.*. Validation of a quasi-analytical algorithm for highly turbid eutrophic water of meiliang bay in Taihu lake, China [J]. *IEEE Trans. Geosci. & Remote Sensing*, 2009, **47**(8): 2492~2500

栏目编辑: 何卓铭