

太湖水体悬浮颗粒物生物光学模型及 MERIS 数据反演

黄昌春¹, 李云梅¹, 王桥¹, 吕恒¹, 孙德勇², 乐成峰³

(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. 南京信息工程大学 遥感学院, 江苏 南京 210046

3. 南佛罗里达大学 海洋学院, 美国 佛罗里达)

摘要:根据太湖悬浮颗粒物生物光学特性建立的悬浮颗粒物红外单波段生物光学模型具有明确的机理性. 采用2006年至2009年野外实测悬浮颗粒物浓度和水体光学数据对该生物光学模型进行检验和分析. 结果表明, 悬浮颗粒物比后向散射系数的时空差异是影响总悬浮颗粒物生物光学模型精度的主要因素. 总悬浮颗粒物在红外波长的吸收系数对总悬浮颗粒物生物光学模型精度也具有显著的影响. 根据中分辨率光谱成像仪(MERIS)悬浮颗粒物反演结果和野外实测风速数据, 太湖沉积物再悬浮将显著增加水体中悬浮颗粒物的含量.

关键词:中分辨率光谱成像仪(MERIS); 悬浮颗粒物; 生物光学模型; 太湖

中图分类号: O436 **文献标识码:** A

Bio-optical retrieval model of suspended particles in Tai Lake using MERIS image

HUANG Chang-Chun¹, LI Yun-Mei¹, WANG Qiao¹, LV Heng¹, SUN De-Yong², LE Cheng-Feng³

(1. Key Laboratory of Virtual Geographic Environment, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China;

2. College of Remote Sensing, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210046, China;

3. College of Marine Science, University of South Florida, Florida USA)

Abstract: The bio-optical retrieval model of suspended particle concentration (C_{min}) at single infrared wavelength based on the suspended particles in Tai Lake has specific mechanism. The measured data of suspended particle matter and bio-optical properties during 2006 to 2009 were used to test this bio-optical algorithm. The results indicate that the spatio-temporal variation of specific backscattering coefficient is the primary factor to the retrieval precision of suspended particles. The absorption coefficient of suspended particles in the infrared wavelength also have significant effect on the retrieval precision of suspended particles. This retrieval model can be successfully applied to the MERIS image data. The resuspended sediment will significantly increase the concentration of suspended particles in Tai lake according to the MERIS image retrieval result and wind speed monitor data in situ.

Key words: medium resolution imaging spectrometer (MERIS); suspended particle matter; bio-optical model; Tai lake

PACS: 93.85.Pq

引言

水体中主要光学敏感因子水色要素(叶绿素、总悬浮颗粒物和 CDOM)能够直接影响光线在水体

中的传播,进而影响水体透明度、水下光场分布和遥感反射率等光学性质;同时也决定了浮游植物对光照的利用,从而影响水体的初级生产力和生物量.太湖是典型的大型浅水湖泊,在风浪作用下,沉积物极

收稿日期:2011-07-05,修回日期:2012-02-24

Received date: 2011-07-05, revised date: 2012-02-24

基金项目:国家自然科学基金(40971215,11KJJA170003,41030751,40701136,41103047);国家科技重大专项(E0203/1112/JC01);江苏高校优势学科建设工程资助项目

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (40971215,11KJJA170003,41030751,40701136,41103047); National Technology Important Special Found (E0203/1112/JC01); Project Funded by the Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions

作者简介(Biography): 黄昌春(1982-),江苏扬州人,男,讲师,主要研究方向为环境污染遥感监测. E-mail: huangchangchun_saa@163.com.

容易发生再悬浮. 沉积物再悬浮不仅增加了水体中总悬浮颗粒物的浓度, 同时释放了营养盐. 沉积物营养盐最大释放量可使全太湖的总氮和总磷分别增加 0.12 和 0.005 mg/L^{-1} . 因此对太湖水体中总悬浮颗粒物浓度的估算具有重要意义. 目前, 已有大量关于利用遥感估算总悬浮颗粒物浓度的研究^[2-4], 如在海洋二类水体中, 唐军武等⁵将 Tassan^[6]地中海水体总悬浮颗粒物的比值算法进行改进并应用于我国黄海、东海水体总悬浮颗粒物浓度反演中; Doxaran^[7]针对总悬浮颗粒物提出了 865 nm 与 555 nm 比值算法. 针对太湖水体, 马荣华^[2]提出了单波段算法和 Landsat 波段比值算法 (ETM4/ETM1), 吕恒^[3]等发现总悬浮颗粒物敏感波段为 580 nm 和 810 nm; 为了提高模型反演精度, 孙德勇^[4]等利用人工神经网络模型对总悬浮颗粒物进行反演. 以上模型主要是基于遥感反射率与总悬浮颗粒物浓度之间的统计关系建立的经验模型, 缺乏机理性. 生物光学模型具有明确的物理意义, 因而得到广泛的关注. Binding^[8]等修正总悬浮颗粒物散射特性的差异, 建立了总悬浮颗粒物生物光学反演模型, 成功反演了 Anglesey 和 Liverpool 湾总悬浮颗粒物浓度. Volpe^[9]根据浅水辐射传输模型和 Venice lagoon 水体生物光学特性, 建立了 Venice lagoon 总悬浮颗粒物反演模型.

本研究基于半分析模型和太湖水体总悬浮颗粒物生物光学特性建立总悬浮颗粒物生物光学反演模型, 同时确定影响红外单波段生物光学模型反演精度的主要影响因素, 并将该生物光学模型成功应用于 MERIS 遥感数据.

1 数据与方法

1.1 野外实测数据

2006~2009 年对太湖进行了 4 次野外观测和采样, 样点分布如图 1 所示. 测量参数包括室内分析的总悬浮颗粒物、有机物质、无机物质和叶绿素 a 的浓度; 浮游色素、非色素和 CDOM 吸收系数; 野外测量的散射系数和后向散射系数, 测量深度为 0.30 m; 相关测量参数信息如表 1 所示. 野外 Rrs 数据测量和处理参照黄昌春^[10]和 Jiao^[11].

1.2 卫星数据

遥感影像数据为 2007 年 11 月 11 日、2008 年 11 月 20 日和 2009 年 4 月 25 日的 MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer, MERIS) 的 Level1p 和 level2p 数据.

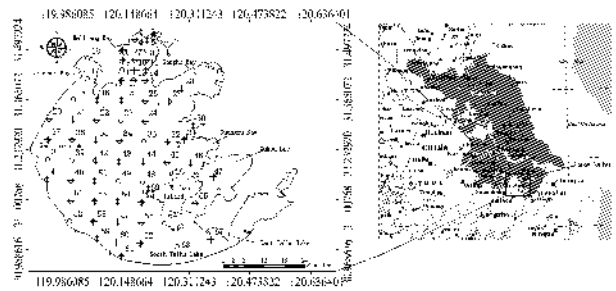


图 1 采样点分布图

Fig. 1 Distribution of sampling points

表 1 野外采样数据相关信息

Table 1 The information of sampling in situ

日期	N	$C_{\text{Chl-a}}$ ($\mu\text{g/L}^{-1}$)	$a_{\text{ph}}(440)$ (m^{-1})	$a_{\text{ph}}(675)$ (m^{-1})	$a_{\text{CDOM}}(440)$ (m^{-1})	$a_{\text{NAP}}(440)$ (m^{-1})
2006-11	62	0.28-1154.45	0.47-52.27	0.085-13.51	0.03-1.34	0.69-5.91
2007-11	42	0.96-82.23	0.08-8.82	0.02-3.92	0.04-1.08	0.57-4.37
2008-11	65	1.26-130.72	0.52-11.05	0.10-4.90	0.16-1.00	0.13-5.83
2009-04	36	2.98-79.80	0.13-4.62	0.04-1.78	0.14-1.11	0.73-13.88

进行参数反演前先对 MERIS 的 level1p 数据进行大气校正、几何纠正和陆地、岛屿掩膜等处理.

2007 年 11 月 11 日、2008 年 11 月 20 日和 2009 年 4 月 25 日卫星过境时间所测量样点的遥感反射率数据用于检验大气校正, 校正结果如图 2 所示. 该天内所有测量样点的悬浮颗粒物数据作为准同步数据检验悬浮颗粒物生物光学反演模型精度.

2 太湖水体光学特性和生物光学模型

2.1 太湖水体散射特征

总悬浮颗粒物浓度与散射系数之间具有显著的线性关系 ($p < 0.001$), 椭圆中的样点为散射系数测量饱和, 如图 3 所示. 散射系数除以总悬浮颗粒物浓度得到比散射系数. 若不考虑颗粒物组成和理化性质的差异, 总悬浮颗粒物浓度与散射系数之间具有稳定的线性关系, 而其线性斜率即为该波长处的比散射系数. 理论上, 散射系数 $b(\lambda)$ 与总颗粒物体积浓度 (总颗粒物体积与水样体积的比例) 能够清晰地表示粒径的分布和折射指数, 因而通常利用 $b(\lambda)$ 与总颗粒物体积浓度的比值来刻画颗粒物的特征, 而比散射系数将水体和颗粒物的密度参数引入到 $b(\lambda)$ 与总颗粒物体积浓度比值中来, 使得比散射系数的变化程度远大于 $b(\lambda)$ 与总颗粒物体积浓度的比值.

后向散射系数与总悬浮颗粒物浓度之间关系和散射系数与总悬浮颗粒物浓度之间关系相似, 后向散射系数 (b_{bp}^*) 除受颗粒物浓度影响之外, 还受颗粒

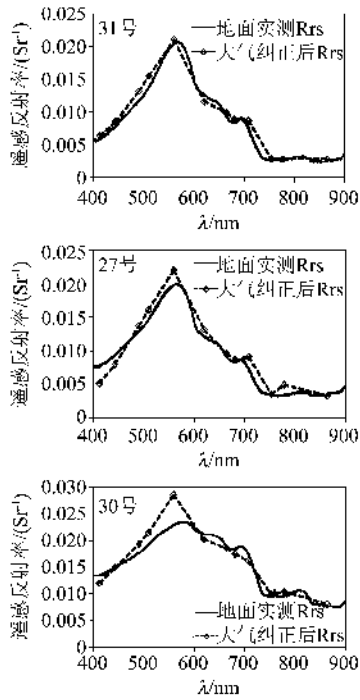


图2 2007年11月11日(时间14:24)、2008年11月20日(时间14:38)、2009年4月25日(时间14:35)准同步样点(时间、空间匹配样点)大气校正后的遥感反射率和地面实测遥感反射率对比
 Fig. 2 The remote sensing reflectance after atmospheric correction and measured remote sensing reflectance in 2007, Nov. 11 (14:24), 2008, Nov. 20 (14:38) and 2009, Apr. 25 (14:35)

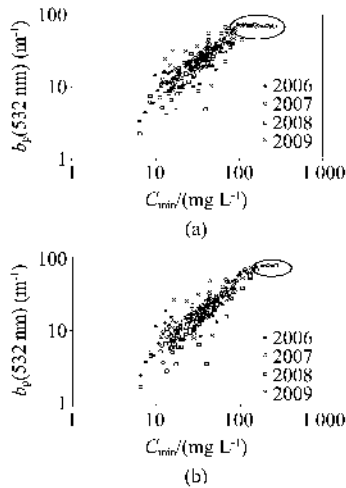


图3 532 nm 和 756 nm 处散射系数与总悬浮颗粒物浓度关系
 Fig. 3 The relationship between scattering coefficient at 532 nm and 756 nm and the concentration of the suspended particles

物折射系数(n)和粒径分布的影响,由于有机物质和无机物质的折射系数和粒径分布存在较大的差异,从而使得比后向散射系数并不是恒定值。2006

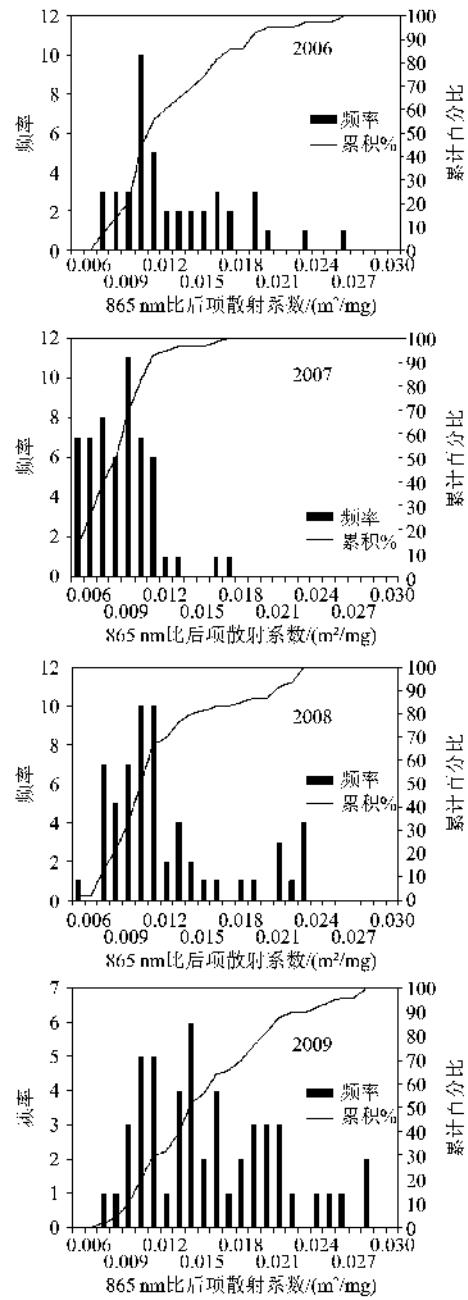


图4 2006年到2009年865nm处比后向散射系数
 Fig. 4 The specific backscattering coefficient of suspended particle matter at 865nm in 2006, 2007, 2008 and 2009

年、2007年、2008年和2009年865 nm处比后向散射系数,如图4所示。由图可以看出,比后向散射系数具有较大的时空差异,比后向散射系数空间差异主要体现在每次实验采样点之间,如2006年大部分样点 b_{bp} 集中在 $0.01 \text{ m}^2/\text{mg}$ 左右,最大为 $0.0268 \text{ m}^2/\text{mg}$,最小为 $0.0074 \text{ m}^2/\text{mg}$ 。时间差异主要体现在每次实验之间,如2006年平均值为 $0.0132 \text{ m}^2/\text{mg}$ 、2007年为 $0.0089 \text{ m}^2/\text{mg}$ 、2008年为 $0.0124 \text{ m}^2/\text{mg}$ 、

2009 年为 $0.01597 \text{ m}^2/\text{mg}$.

2.2 总悬浮颗粒物生物光学反演模型

现有研究表明^[10],总悬浮颗粒物垂直分布对遥感反射率影响较小的波段在 750 nm 以后,同时单波段模型对总悬浮颗粒物垂直分布敏感性较小.因此利用 750 nm 以后单波段遥感反射率建立的总悬浮颗粒物生物光学反演模型受到总悬浮颗粒物垂直分布影响较小,同时具有明确的物理意义.水体表面遥感反射率(R_{rs})为水表面以下辐亮度溢出水面后形成的离水辐亮度与(I_w)与投射到水表面上的总辐照度(E_d)的比值.它与水表面以下辐亮度反射比(r_{rs})可通过下式建立关联:

$$R_{rs}(\lambda) = \zeta r_{rs}(\lambda) / (1 - \Gamma r_{rs}(\lambda)), \quad (1)$$

式中, $\zeta = 0.52$, $\Gamma = 1.7$. $r_{rs}(\lambda)$ 可以表示为总吸收(a)和总后向散射系数(b_b)的函数^[21]:

$$r_{rs}(\lambda) = g_1 \left(\frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda) + b_b(\lambda)} + g_2 \frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda) + b_b(\lambda)} \right)^2, \quad (2)$$

式中, g_1 和 g_2 为模型参数. 本章研究中 g_1 和 g_2 分别取值为 0.084 和 0.17^[12]. 总吸收系数(a)和总后向散射系数(b_b)可以表示为:

$$a(\lambda) = a_{ph}(\lambda) + a_{CDM}(\lambda) + a_w(\lambda), \quad (3)$$

$$b_b(\lambda) = b_{bp}(\lambda) + b_{lw}(\lambda), \quad (4)$$

式中, 下标 ph, CDM, p 分别表示浮游植物、CDOM 和非色素颗粒物(NAP)吸收系数. 其中 CDOM 吸收系数和非色素颗粒物吸收系数光谱特征相似, 故利用同一模型表示. 纯水吸收和后向散射系数采用 Pope 纯水吸收和散射数据^[13].

通过式(2)可以得到:

$$u(\lambda) = \frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda) + b_b(\lambda)} = \frac{-g_1 + [(g_1)^2 + 4g_2 r_{rs}(\lambda)]^{1/2}}{2g_2}. \quad (5)$$

将式(3)和式(4)带入式(5)得到:

$$u(\lambda) = \frac{b_b(\lambda)}{a_{ph}(\lambda) + a_{CDM}(\lambda) + a_w(\lambda) + b_{bp}(\lambda) + b_{lw}(\lambda)}. \quad (6)$$

根据 Doron^[14], Le^[15], Wang^[16] 等算法, 在近红外波段浮游植物、CDOM 和非色素颗粒物吸收系数可以认为为零. 但也有研究表明富营养化和混浊水体中藻类和非藻类颗粒物吸收在 709 nm 或 710 nm 处仍然较强^[17-18], 同时根据太湖水体散射特性较强, 在 756 nm 散射测量仍能饱和这一现象, 结合 MERIS

波段设置, 选择 MERIS 第 13 波段的中心波长 865 nm 作为浮游植物、CDOM 和非色素颗粒物吸收系数为零波段, 则上式可以改写为:

$$C_{min} = \frac{(a_w(865) + b_{lw}(865))u(865) - b_{lw}(865)}{b_{bp}^*(865)(1 - u(865))}, \quad (7)$$

式中 b_{bp}^* 为 865 nm 处总悬浮颗粒物比后向散射系数, C_{min} 为总悬浮颗粒物浓度. 因此用 865 nm 处的遥感反射率就可以对总悬浮颗粒物浓度进行反演. 根据后向散射系数参数化模型推导 865 nm 处的后向散射系数, 利用后向散射系数与总悬浮颗粒物浓度比值确定 $b_{bp}^*(865)$ 平均值为 $0.0126 \pm 0.0013 \text{ m}^2/\text{g}$.

2.3 模型验证和优化

均方根百分比 (Mean square root of percentage; RMSP) 和相对误差 (Relative Error; RE) 被用来衡量估算模型的精度. 图 5 为根据式(7)总悬浮颗粒物生物光学模型反演得到的总悬浮颗粒物浓度和实测总悬浮颗粒物浓度对照图. 由图可以看出, 利用生物光学模型得到的总悬浮颗粒物浓度反演结果在 2007 年与实测结果较为一致, RMSP 为 4.73%, 但是在 2006 年和 2008 年反演效果较差, RMSP 分别达到了 9.61% 和 9.39%, 而 2009 年反演结果最差, RMSP 高达 13.74%. 由此反演结果可见, 该生物光学模型具有一定的实用性, 但是由于生物光学特性的差异, 使得模型的假设 (Δ : 865 nm 处水体中颗粒物吸收系数为零) 和参数选择 (比后向散射系数 $b_{bp}^*(865)$) 仍需要进一步的验证.

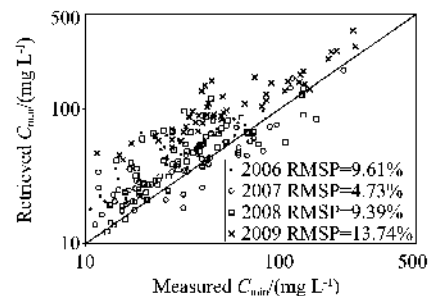


图 5 根据式(7)反演总悬浮颗粒物浓度和测量总悬浮颗粒物浓度
Fig.5 The measured and retrieval concentration of suspended particles according Eq(7)

当 865 nm 处水体中颗粒物吸收系数为零的假设不成立时, 式(7)修改为:

$$C_{min} = \frac{(a_w(865) + b_{lw}(865))u(865) - b_{lw}(865)}{b_{bp}^*(865)(1 - u(865)) + a_{NAP}^*(865)u(865)}, \quad (8)$$

其中 $a_{NAP}^*(865)$ 为 865 nm 处总悬浮颗粒物比吸收

系数。

根据总悬浮颗粒物吸收系数参数化模型推导 865 nm 处的吸收系数,利用吸收系数与总悬浮颗粒物浓度比值确定 $a_{\text{NDP}}^*(865)$ 平均值为 $0.004 \pm 0.0010 \text{ m}^2/\text{g}$,代入式(8)反演总悬浮颗粒物浓度,结果如图 6(a)所示。与式(7)反演结果(图 5)相比,2006 年反演结果的 RMSP 由 9.61% 减小到了 8.06%,2007 年反演结果的 RMSP 由 4.73% 减小到了 4.51%,2008 年反演结果的 RMSP 由 9.39% 减小到了 8.73%,2009 年反演结果的 RMSP 由 13.74% 减小到了 8.63%。其中 RMSP 减少最大的为 2009 年,减少的最少的为 2007 年,由此可见,865 nm 处总悬浮颗粒物比吸收系数对利用式(7)反演 2007 年总悬浮颗粒物浓度影响较小,而对于利用式(7)反演 2009 年总悬浮颗粒物浓度影响较大。结合无机颗粒物占总悬浮颗粒物的比例数据(图 6(b)),可以发现,反演结果 RMSP 的减小程度与总悬浮颗粒物中无机颗粒物具有一定的相关性,如 2009 年无机颗粒物比例相对最高,式(8)反演结果的 RMSP 要比式(7)反演结果小得多;而 2007 年无机颗粒物比例相对最低,式(8)反演结果的 RMSP 与式(7)反演结果相差较小。

以上计算中比后向散射系数取值为 2006 ~ 2009 年所有数据的平均值,事实上,4 年的比后向散射系数存在一定的时间差异,其中,2006 年平均值为 $0.0132 \text{ m}^2/\text{g}$ 、2007 年为 $0.0089 \text{ m}^2/\text{g}$ 、2008 年为 $0.0124 \text{ m}^2/\text{g}$ 、2009 年为 $0.01597 \text{ m}^2/\text{g}$ 。将每年实测比后向散射系数代入式(7)反演总悬浮颗粒物浓度,结果如图 7 所示。与式(8)反演结果(图 6(a))相比,2006 年反演结果的 RMSP 由 8.06% 减小到了 4.94%,2007 年反演结果的 RMSP 由 4.51% 增加到了 4.60%,2008 年反演结果的 RMSP 由 8.73% 减小到了 8.57%,2009 年反演结果的 RMSP 由 8.63% 减小到了 5.77%。其中 RMSP 减少相对较大的为 2006 年和 2009 年,减少相对较小的为 2008 年,而 2007 年的 RMSP 却有所增加,这主要是由于 2009 年和 2006 年的比后向散射系数与平均值相比要大得多,而 2007 年和 2008 年的比后向散射系数与平均值较为接近。由此可见,比后向散射系数对总悬浮颗粒物浓度生物光学反演模型的反演结果具显著的影响,与式(8)反演结果相比较可以发现,2006、2008 和 2009 年比后向散射系数的时空变异性对反演结果的影响要高于忽略 865 nm 处总悬浮颗粒物吸收系数的影响;而 2007 年忽略 865 nm 处总悬浮颗粒物

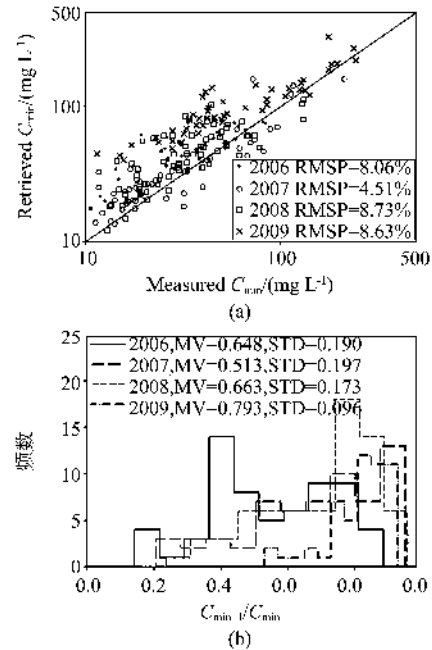


图 6 (a)根据式(10)反演总悬浮颗粒物浓度和测量总悬浮颗粒物浓度,(b)无机颗粒物占总悬浮颗粒物的百分比频率图,MV 为平均值,STD 为标准差

Fig. 6 The measured and retrieval concentration of suspended particle matter according Eq10 (panel a), and the frequency distribution of percentage of the inorganic among suspended particle matter (panel b), MV is mean value, STD is standard deviation

吸收系数对反演精度的影响要高于比后向散射系数的时空变异性对反演精度的影响。

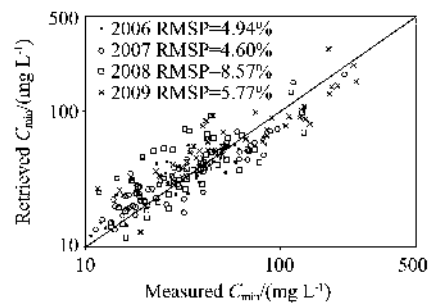


图 7 根据各年比后向散射系数反演总悬浮颗粒物浓度和测量总悬浮颗粒物浓度

Fig. 7 The measured and retrieval suspended particle matter according to specific backscattering coefficient in each year

不同假设条件下 2006 ~ 2009 年总悬浮颗粒物生物光学模型反演结果的 RMSP 如表 3 所示。在考虑到 865nm 处存在吸收系数和散射特性差异时,模型反演精度将会显著提高。不同年份吸收和散射特性的时空差异使得模型反演精度提高的程度有所

差异.

表 3 不同假设条件下总悬浮颗粒物生物光学模型反演精度

Table 3 Precision of bio-optical retrieval model for suspended particle matter in different condition

方法	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年
N	62	42	65	36
方法一	9.61%	4.73%	9.39%	13.74%
方法二	8.06%	4.51%	8.73%	8.63%
方法三	4.94%	4.60%	8.57%	5.77%

2.4 总悬浮颗粒物反演结果

总悬浮颗粒物生物光学反演模型能够准确反演太湖水体总悬浮颗粒物浓度. 将上述总悬浮颗粒物生物光学应用于 MERIS 遥感影像对整个太湖水体总悬浮颗粒物进行反演, 选择 MERIS 第 13 波段 (865 nm), 利用幂函数模型计算 865 nm 处的比后向散射系数, 得到 2007 年 11 月 11 日、2008 年 11 月 20 日和 2009 年 4 月 25 日总悬浮颗粒物浓度 (图 8). 该生物光学模型在低浓度总悬浮颗粒物条件下相对精度较低, 最大相对误差达到 80% (为 2006 年的同步样点). 而在高浓度条件下 (2009 年), 相对误差较小, 最小仅为 5%. 这与总悬浮颗粒物生物光学特性具有较强的关系. 在总悬浮颗粒物浓度较高条件下, 红外波段的遥感反射率信号受浮游植物、CDOM 等影响较小. 而在低总悬浮颗粒物浓度条件下, 红外波段遥感反射率信号受浮游植物等影响较大.

高浓度总悬浮颗粒物主要集中在西太湖和南太湖地区 (图 8), 主要是由于太湖水体沉积物主要分布太湖的西部和中部 (图 9(a)), 在风浪作用下一方面沉积物再悬浮使得水体中的总悬浮颗粒物急剧增加, 另一方面, 冬季太湖地区主要盛行西北风, 在风力作用下, 水表层总悬浮颗粒物向南太湖和太湖中部输送 (图 9(b)), 从而使得西太湖、南太湖和太湖中部水体中总悬浮颗粒物相对较高 (图 8, 2009 年 4 月 25 日). 而太湖西部的苕溪、南溪等水系的颗粒物输入是该地区总悬浮颗粒物浓度较高另外一因素. 风吹程是影响沉积物再悬浮的另一重要因素, 在西北风作用下, 南太湖、东太湖苏州部分的风吹程相对较大, 沉积物较容易再悬浮. 结合风吹程和风速可以发现, 2009 年南太湖和太湖中部总悬浮颗粒物中沉积物再悬浮量比例较大, 而 2007 年相对较小, 2008 年相对最小. 图 10 显示了 2007 年 11 月、2008 年 11 月和 2009 年 4 月采样点风速频率图, 2009 年

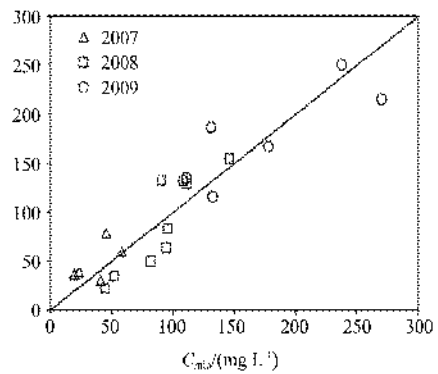
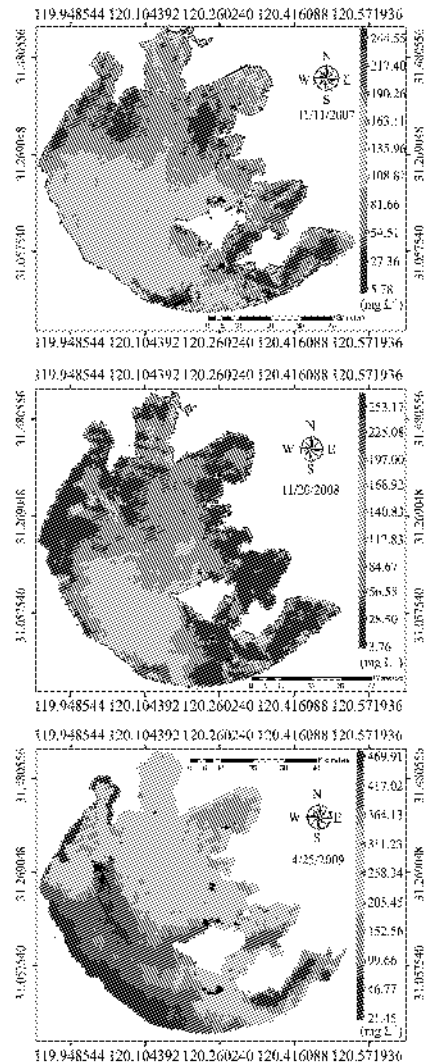


图 8 2007 年、2008 年和 2009 年太湖水体总悬浮颗粒物生物光学模型 MERIS 反演结果, 黑色部分为无数据, 白色部分为陆地和岛屿. 最后一幅图为该天所有采样点实测总悬浮颗粒物浓度与 MERIS 反演总悬浮颗粒物浓度对照图 Fig. 8 Retrieval result of suspended particle matter in Tai Lake in 2007, 2008 and 2009 by MERIS image data. The black part is no data, white part is the land and island. The lower right panel shows the retrieval result from MERIS image data and measured suspended particle matter in the match up points

能够使沉积物发生再悬浮的风速(大于 4m/s)频率较高,而 2007 年次之,2008 年最小。

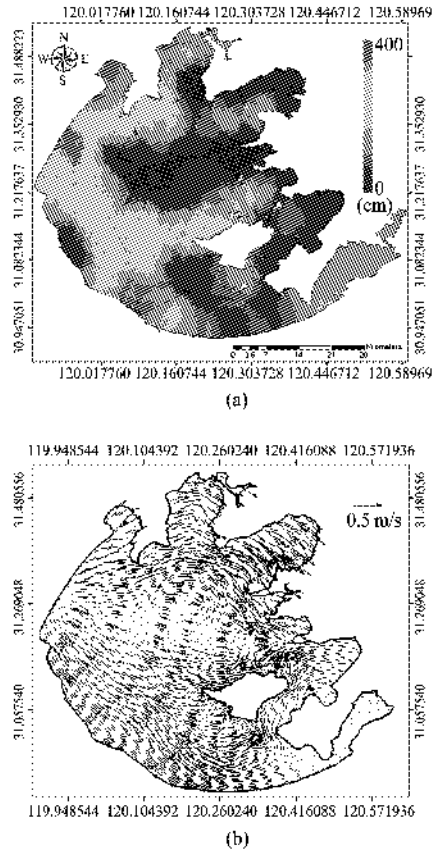


图9 (a)太湖沉积物厚度分布图,(b)风速 0.5 m/s 条件下西北风作用下的水表层流场图
Fig.9 Panel (a) is the distribution of sediment in Tai Lake, panel (b) is the fluid field under the condition of 0.5m/s wind speed in east-north direction

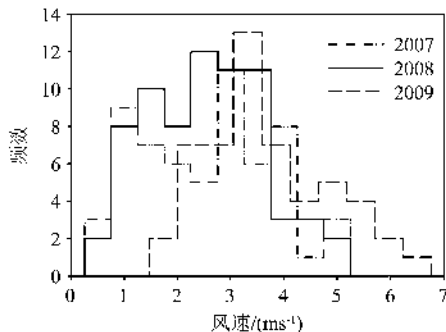


图10 2007年11月、2008年11月和2009年4月太湖风速频率分布图
Fig.10 The frequency distribution of wind speeds in 2007, Nov., 2008, Nov. and 2009, Apr.

3 结论

传统的总悬浮颗粒物生物光学反演模型是基于

近红外总悬浮颗粒物和 CDOM 吸收系数为零和总悬浮颗粒物比散射系数已知条件下建立的. 根据水体组分生物光学特性,随着波长的增加,总悬浮颗粒物和 CDOM 总吸收系数不断减小,但是由于水体组分吸收特性差异,总悬浮颗粒物和 CDOM 总吸收系数为零的波段并不一致. 同时由于颗粒物组成、理化性质等差异,不同时相总悬浮颗粒物比散射系数具有一定的差异性. 这两种差异对反演算法都具有显著的影响,其中散射特性差异对反演精度的影响处于主导地位,“吸收系数为零”的假设的影响处于第二影响地位. 通过生物光学模型, MERIS 遥感影像数据的第 13 波段能够较好地反演太湖地区总悬浮颗粒物浓度. 根据地面准同步实测总悬浮颗粒物浓度数据,由 MERIS 数据反演的总悬浮颗粒物最大相对误差为 80%,最小相对误差仅为 5%,所有准同步样点相对误差绝对值的平均值为 32%. 通过 MERIS 数据反演的总悬浮颗粒物浓度能够较好地反应太湖水体总悬浮颗粒物的空间分布特征,该分布特征与太湖水体沉积物分布、风速和水动力流场具有较好的一致性,这与太湖水体中总悬浮颗粒物浓度受沉积物再悬浮影响较为严重是一致的。

REFERENCES

[1] QIN Bo-Qiang, HU Wei-Ping, CHEN Wei-Min, et al. *Process and mechanism of environment changes of the Taihu Lake*[M]. Beijing, Science Press (秦伯强, 胡维平, 陈伟民, 等. 太湖水环境演化过程与机理. 科学出版社). 北京, 2004: 209 - 260.

[2] WANG Jian-Ping, CHENG Sheng-Tong, JIA Hai-Feng, et al. An artificial neural network model for lake color inversion using TM imagery[J]. *Environmental Science* (王建平, 程声通, 贾海峰, 等. 用 TM 影像进行湖泊水色反演研究的人工神经网络模型. 环境科学), 2003, 24(2): 73 - 76.

[3] MA Rong-Hua, DAI Jin-Fang. Quantitative estimation of chlorophyll-a and total suspended matter concentration with Landsat ETM based on field Spectral features of Lake Taihu [J]. *Journal of lake sciences* (马荣华, 戴锦芳. 结合 Landsat ETM 与实测光谱估测太湖叶绿素及悬浮物含量, 湖泊科学), 2005, 17(2): 97 - 103.

[4] LV Heng, LI Xin Guo, JIANG Nan. Estimation of suspended solids concentration in lake taihu using spectral reflectance and simulated MERIS[J]. *Journal of lake sciences* (吕恒, 李新国, 江南. 基于反射光谱和模拟 MERIS 数据的太湖总悬浮物遥感定量模型, 湖泊科学), 2005, 17(2): 104 - 109.

[5] ZHU Ling-Ya, WANG Shi-Xin, ZHOU Yi, et al. Estimation of suspended sediment concentration in Taihu lake using MODIS image data[J]. *Advances in water science* (祝令亚, 王世新, 周艺, 等. 应用 MODIS 影像估测太湖水体悬浮物浓度, 水科学进展), 2007, 18(3): 444 - 450.

[6] Tassan S. Local algorithm using SeaWiFS data for the re-

- retrieval of phytoplankton, pigments, suspended sediment and yellow substance in coastal waters [J]. *Applied Optics*, 1994, **33**(12): 2369–2378.
- [7] Doxaran D, Froidefond J M, Castaing P. Remote-sensing reflectance of turbid sediment-dominated waters. Reduction of sediment type variations and changing illumination conditions effects by use of reflectance ratios[J]. *Applied Optics*, 2003, **42**(15): 2623–2634.
- [8] Binding C E, Bowers D G, Mitchelson-Jacob E G. Estimating suspended sediment concentrations from ocean colour measurements in moderately turbid waters; the impact of variable particle scattering properties[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, **94**(3): 373–383.
- [9] Volpe V, Silvestri S, Marani M. Remote sensing retrieval of suspended sediment concentration in shallow waters[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, **115**(1): 44–54.
- [10] TANG Jun-Wu, WANG Xiao-Mei, SONG Qing-Jun, et al. Statistical inversion models for case II water color elements in the Yellow Sea and East China Sea[J]. *Advances in Marine Science* (唐军武, 王晓梅, 宋庆君, 等. 黄海、东海二类水体水色要素统计反演模式, 海洋科学进展), 2004, **22**(B10): 1–7.
- [11] Jiao H B, Zha Y, Gao J, et al. Estimation of chlorophyll-a concentration in Lake Tai, China using in situ hyperspectral data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, **27**(19): 4267–4276.
- [12] Lee Z P, Carder K L, Robert A 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.
- [13] Zhang X, Ito I. Estimating scattering of pure water from density fluctuation of the refractive index[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(3): 1671–1678.
- [14] Doron M, Babin M, Mangin A, et al. Estimation of light penetration, and horizontal and vertical visibility in oceanic and coastal waters from surface reflectance[J]. *J. Geophys. Res.*, 2007, **112**, C06003, doi: 10.1029/2006JC004007.
- [15] Le C-F, Li Y M, Zha Y, et al. Validation of a quasi-analytical algorithm for highly turbid eutrophic water of Meiliang Bay in Tai Lake, China[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, **47**(8): 2492–2500.
- [16] Wang M H, Son S H, Lawrence W, et al. Retrieval of diffuse attenuation coefficient in the Chesapeake Bay and turbid ocean regions for satellite ocean color applications[J]. *Journal of geophysical research*, 2009, **114**, C10011, doi: 10.1029/2009JC005286.
- [17] Tassan S, Ferrari C M. Variability of light absorption by aquatic particles in the near-infrared spectral region[J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(24): 4802–4810.
- [18] Babin M, Stramski D. Variations in the mass-specific absorption coefficient of mineral particles suspended in water[J]. *Limnol. Oceanogr.*, 2004, **49**(3): 756–767.

(上接第 318 页)

- [3] Hasler A F, Morris K R. Hurricane structure and wind fields from stereoscopic and infrared satellite observations and radar data[J]. *Climate Appl. Meteor.*, 1986, **25**(6): 709–727.
- [4] Hasler A F, Strong J, Woodward R H, et al. Automatic analysis of stereoscopic satellite image pairs for determination of cloud-top height and structure[J]. *Appl. Meteorol.*, 1991, **30**(3): 257–281.
- [5] Mack R A, Hasler A F, Adler R F. Thunderstorm cloud-top observations using satellite stereoscopy[J]. *Mon. Wea. Rev.*, 1983, **111**(10): 1949–1964.
- [6] Bowen R A, Fusco L, Morgan J, et al. Operational production of cloud motion vectors (satellite winds) from Meteosat image data; Use of data from meteorological satellites[R]. ESA No. 143, European Space Agency, 1979, 65–75.
- [7] Szejwach G. Determination of semi-transparent cirrus cloud temperature from infrared radiances; Application to METEOSAT[J]. *J. Appl. Meteor.*, 1982, **21**(3): 384–393.
- [8] Menzel W P, Smith W L, Stewart T R. Improved cloud motion wind vector and altitude assignment using VAS[J]. *Clim. Appl. Meteor.*, 1983, **22**(3): 377–384.
- [9] Hawkinson J A, Fultz W, Ackerman S A. A comparison of GOES sounder and cloud lidar- and radar-retrieved cloud-top heights[J]. *J. Appl. Meteor.*, 2005, **44**(8): 1234–1242.
- [10] Wang H Q, Lv S H, Zhang Y, et al. Determination of cloud-top height from stereoscopic observation[J]. *Progress in Natural Science*, 2002, **12**(9): 689–694.
- [11] Seiz G. Multiview cloud-top height and wind retrieval with photogrammetric methods; application to meteosat-8 HRV observations[J]. *Clim. Appl. Meteor.*, 2007, **46**(8): 1182–1195.
- [12] WANG Hong-Qing, ZHANG Yan, LIN Yin-Jing, et al. The error analysis of cloud-top height from stereoscopic observation[J]. *Highlights of Sciencepaper Online* (王洪庆, 张焱, 林隐静, 等. 双星立体观测云顶高度几何反演中的误差分析. 中国科技论文在线精品论文), 2008, **1**(13): 1429–1435.
- [13] WANG Ren-Xiang, LI Jing, WANG Xin-Yi, et al. Elevation error estimation of satellite photogrammetric without ground control point[J]. *Science of Surveying and Mapping* (王任享, 李晶, 王新义, 等. 无地面控制点卫星摄影测量高程误差计算. 测绘科学), 2005, **6**(30): 9–11.