

基于半分析方法的内陆湖泊水体总悬浮物浓度遥感估算研究

施坤, 李云梅*, 刘忠华, 徐祎凡, 徐昕, 马万泉, 陆超平

(南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 南京 210046)

摘要:根据生物光学原理, 通过对总悬浮物吸收占水体总吸收比例光谱的分析, 确定适宜总悬浮物浓度反演的波段范围; 结合以往学者对太湖等水体固有光学特性的研究成果, 运用最小二乘法, 确定生物光学模型的相关参数, 建立了浑浊湖泊水体总悬浮物浓度的单波段估算模型. 结果表明, 在短波波段, 总悬浮物的吸收占水体总吸收的比例较高, 出现光饱和现象, 不适合总悬浮物浓度的反演; 在 732 ~ 850 nm 波段范围悬浮物吸收比例相对较小, 是总悬浮物浓度反演的较适宜的波段范围. 在该波段范围所建立的总悬浮物浓度单波段反演模型的平均相对误差低于 24%, RMSE 低于 18 mg/L, 其中反演效果最好的波段位于 825 nm 处. 该方法反演总悬浮物浓度效果优于传统的经验算法.

关键词:总悬浮物; 太湖; 巢湖; 生物光学模型

中图分类号: X524; X87 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)06-1571-10

Estimation of Total Suspended Matter Concentration Based on Semi-analysis Algorithm in Inland Turbid Waters

SHI Kun, LI Yun-mei, LIU Zhong-hua, XU Yi-fan, XU Xin, MA Wan-quan, LU Chao-ping

(Virtual Geographical Environment Laboratory of Ministry of Education, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China)

Abstract: According to the principles of bio-optics and the spectrum characteristics, the suitable remote sensing reflectance bands range for estimating TSM concentrations was determined based on the ratio of total suspended matter (TSM) absorption to the water absorption. Related bio-optics parameters were determined by using least squares technique and previous studies of the inherent optics parameters characteristics. And then the single band bio-optics models for inverting TSM concentrations in turbid waters were developed. Result shows: The remote sensing reflectance in short wavelengths are not suitable for inversion TSM concentration, because of light saturation resulting from high TSM absorption proportion correspond to the water total absorption. The remote sensing reflectance in the range of 732-850 nm are appropriate for TSM concentration inverting during to the low TSM absorption proportion. The mean relative errors and RMSEs of the models developed by this study are below 24% and 18mg/L respectively, which indicate the good performance of this algorithm and the inferior to traditional empirical model.

Key words: total suspended matter; Lake Taihu; Lake Chaohu; bio-optics model

总悬浮物是水质和水环境评价非常重要的参数之一^[1], 其广泛分布于海洋、湖泊、河流等水体. 总悬浮物浓度的分布直接决定着光在水体中传播, 影响着水体的透明度、真光层深度等水体的光学特征, 进而影响着水生生物的生长和水体初级生产力^[2]. 遥感技术已经成为监测总悬浮物浓度时空分布的重要工具. 目前利用遥感技术对总悬浮物浓度进行估算主要有 2 种方式: 第一, 建立遥感影像数据和总悬浮物浓度之间的关系模型, 进而利用遥感影像估算总悬浮物浓度, 目前很多学者^[2~9]都利用遥感影像对各自研究区的总悬浮物浓度的反演进行了研究; 第二, 根据实测高光谱数据, 建立与总悬浮物浓度之间的关系, 从而对总悬浮物浓度进行估算, 该方法是利用遥感影像数据进行总悬浮物浓度估算的基础. 目前利用实测高光谱数据估算总悬浮物浓度的方法

归纳起来主要有 3 种: 基于经验的^[10~13]、基于半分析的^[14,15]、基于分析的^[16,17]方法. 经验的方法往往较为简单, 由于缺乏机制研究, 模型的区域性和季节性较强, 很难得到较为统一的反演模型; 分析方法机制较为明确, 但较为复杂; 随着光学仪器的发展, 半分析方法得到较为广泛的应用, 然而光学测量的误差往往会限制此方法的应用. 徐京萍等^[16]、张兵等^[18]都根据生物光学模型在近红外波段的简化条件, 建立了对应研究区的总悬浮物浓度反演的单波

收稿日期: 2010-07-12; 修订日期: 2010-08-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(40971215); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07527-006); 江苏省研究生培养创新工程项目(CX10B_392Z); 南京师范大学优秀博士研究生学位论文培育项目(2010bs0036); 江苏高校优势学科建设工程项目

作者简介: 施坤(1985~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为水体光学特性, E-mail: ahhushikun@yahoo.com.cn

* 通讯联系人, E-mail: liyunmei@njnu.edu.cn

段模型,然而其选择波段的方法不是很明确.

太湖(春季和秋季)、巢湖、三峡等水体都位于长江中下游地区,总悬浮物浓度较高,都属于二类水体,在光学特性上往往具有一定的相似性,根据总悬浮物吸收占水体总吸收的比例光谱,结合生物光学模型,确定适宜总悬浮物浓度反演的波段范围,根据以往学者对太湖等水体固有光学特性的研究成果,结合最小二乘法等,确定生物光学模型的相关参数,并探究总悬浮浓度估算的最优波段建立总悬浮物浓度反演的单波段模型.

1 材料与方法

1.1 研究区及样点

2008 年 11 月、2009 年 4 月,分别对太湖 68、52 个样点进行野外实验,并随机选择 20 个样本作为模型验证,其余样本作为建模. 2009 年 6 月、9 月,分别对巢湖、三峡库区 32、25 个样点进行野外实验,并随机选择 20 个样本作为模型验证,其余样本留做建模. 3 个研究区共计 137 个样本留做建模,40 个样本作为模型验证. 测量的参数包括总悬浮物浓度(TSM)、无机悬浮物浓度(ISM)、有机悬浮物浓度(OSM)、总悬浮物吸收系数、CDOM 的吸收系数、遥感反射率等参数. 其中,遥感反射率直接在野外观测,TSM、ISM、OSM 浓度、TSM 的吸收系数、CDOM 的吸收系数通过室内分析获得.

1.2 参数的测定

光谱测量采用美国 ASD 公司生产的 ASD FieldSpec Pro 便携式光谱辐射计,其测量的波段范围在 350 ~ 1 050 nm 之间. 提取遥感反射率必须要观测的数据有:标准灰板(其反射率 < 0.3)、天空光、水体等的光谱辐亮度信息,每个对象都要采集 10 条以上的光谱数据,剔除异常光谱数据,剩余数据做均值处理.

为了避开水体对太阳的直射反射和船体等阴影对光场的破坏作用,采用一定的观测角度进行光谱测量,仪器观测平面与太阳入射平面的夹角 $90^\circ < \phi_v < 145^\circ$, 仪器与水面法线方向的夹角 $10^\circ < \theta_v < 30^\circ$. 天空光在水面的反射是不可避免的,因此,在仪器面向水体进行测量后,将仪器在观测平面内向上旋转一个角度,使得观测方向的天顶角与 θ_v 相同,测量天空光的辐射亮度. 遥感反射率提取的具体方法见文献[19].

总悬浮物、无机悬浮物浓度的测量采用较为常规的方法,见文献[20].

总悬浮物的吸收采用定量滤膜技术(QFT)测定:用直径 47 mm 的 GF/F 滤膜(Whatman 公司)过滤 200 ~ 400 mL 水样,用分光光度计测定滤膜上颗粒物的吸光度,用同样湿润程度的空白滤膜做参比,并且以 750 nm 处吸光度为零点进行校正,得到总悬浮物的光谱吸收系数.

CDOM 吸收系数测定:采用 0.22 μm 的 Millipore 滤膜过滤已经过滤除去总悬浮物的水样,得到 CDOM 水样,利用分光光度计测量 CDOM 的吸光度,计算各波长的吸收系数,并以 750 nm 的吸光度作散射校正^[20].

1.3 数据分析

参数的因子分析、相关性分析、线性、误差分析等利用 SPSS 13.0 完成.

1.4 模型的构建

Nechad 等^[14]认为总悬浮物浓度 c (mg/L) 和水体总后向散射与水体总吸收的比值有着较好的相关关系,因此定义水体总后向散射系数与总吸收系数的比值(ω'_b)为:

$$\omega'_b = \frac{b_{bp} + b_{bnp}}{a_p + a_{np}} \quad (1)$$

式中, b_{bp} 为总悬浮物的后向散射系数; b_{bnp} 为纯水、有色可溶性有机物(CDOM)等非颗粒性物质的后向散射系数,由于该部分后向散射相对于总悬浮物的后向散射较微弱,因此该部分可以忽略; a_p 为总悬浮物的吸收系数; a_{np} 为纯水、CDOM 等的吸收系数.

总悬浮物的后向散射系数可以表示为单位后向散射系数与总悬浮物浓度的乘积[式(2)]:

$$b_{bp} = b_{bp}^* \times c \quad (2)$$

式中, b_{bp}^* 为总悬浮物的单位后向散射系数; c 为总悬浮物的浓度.

总悬浮物的吸收系数与总悬浮物浓度之间的关系可以用式(3)来表达.

$$a_p = a_p^* \times c \quad (3)$$

式中, a_p^* 为总悬浮物的单位吸收系数; c 为总悬浮物的浓度.

由式(1)~(3)可以得出总悬浮物浓度与 ω'_b 之间的关系[式(4)].

$$c = A \frac{\omega'_b}{1 - \omega'_b/B} \quad (4)$$

式中 A 和 B 的值分别见式(5)、(6).

$$A = \frac{a_{np}}{b_{bp}^*} \quad (5)$$

$$B = \frac{b_{bp}^*}{a_p^*} \quad (6)$$

由式(1)~(4)和式(6),以及假定纯水、CDOM的后向散射系数 $b_{bnp} = 0$,可知,若 a_p 远大于 a_{np} ,即在颗粒物吸收占主导的波段处, $a_p + a_{np} \rightarrow a_p$,则会出现 $\omega'_b \rightarrow \frac{b_{bp}^*}{a_p^*}$,那么 $c \rightarrow \infty$ (由于后向散射与吸收的比值直接决定着反射率,由此可知,在这些波段处的遥感反射率已经不能反映总悬浮物的浓度了,这种情况就是 Bowers 等^[21]描述的“光饱和”现象.而在水体吸收占主导的波段则不会出现这种情况,这就要求利用反射率估算总悬浮物浓度时,必须选择近红外等水体吸收占主导的波段).

根据生物光学模型^[22], r_{rs} 可以由水体的固有光学量来表示:

$$r_{rs} = \frac{f'}{Q} \frac{b_b}{a + b_b} = \frac{f'}{Q} \frac{\omega'_b}{\omega'_b + 1} \quad (7)$$

式中, r_{rs} 是水面以下遥感反射率; f' 是一个系数,其值的变化见 Gordon 等^[22]的研究结果; Q 是依赖于水体光场分布的参数; a 是水体的总吸收,等于纯水、CDOM 与总悬浮物吸收之和; b_b 是水体总的后向散射系数,可近似等于总悬浮物的后向散射系数.水面反射率与遥感反射率之间的关系可以用式(8)来进行表达.

$$\rho_w = \pi \times R \times r_{rs} \quad (8)$$

式中, ρ_w 是水面反射率; R 代表水面的反射和折射作用. Zhang 等^[23]得到太湖水体 4 个季节的 $\frac{f'}{Q}$ 值,分别为 0.158(冬)、0.153(春)、0.152(夏)、0.157(秋),本研究取其四季的平均值 0.155; Zhang 等^[23]也同时得到太湖水体 R 的值,认为其值为 0.544,本研究采用 Zhang 等^[23]的研究结果.

根据式(7)、(8)可得:

$$\rho_w = \gamma \left(\frac{\omega'_b}{\omega'_b + 1} \right) \quad \text{或者} \quad \omega'_b = \frac{\rho_w}{\gamma - \rho_w} \quad (9)$$

式中, $\gamma = \pi \times R \times \frac{f'}{Q} \approx 0.264$. 再根据式(5)可得到总悬浮物浓度 c 的表达式:

$$c = A^p \frac{\rho_w}{1 - \rho_w/B^p} \quad (10)$$

式中, $A^p = A/\gamma$; $B^p = \gamma \times B/(1 + B)$. 因此只要确定 A^p 和 B^p 的值便可从反射率估算总悬浮物的浓度.考虑到各种参数测量误差对总悬浮物浓度估算的影响,式(10)可以变为:

$$C = A^p \frac{\rho_w}{1 - \rho_w/B^p} + D^p \quad (11)$$

式中 D^p 为在参数测量过程中所产生的误差项.

根据施坤等^[24]的研究:

$$b_{bp}(\lambda) = \tilde{b}_p \times b_p(\lambda_0) \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^n$$

$$\text{类推 } b_{bp}^*(\lambda) = \tilde{b}_p \times b_p^*(\lambda_0) \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^n$$

式中, $b_{bp}(\lambda)$ 为总悬浮物的后向散射系数; $\tilde{b}_p$ 为总悬浮物的后向散射概率; n 为散射系数的光谱指数; $b_p(\lambda_0)$ 为悬浮物的散射系数; $b_p^*(\lambda_0)$ 为总悬浮物的单位散射系数; λ 为波长; λ_0 为参考波长,本研究选 532 nm 为参考波长.施坤等^[24]研究发现太湖、巢湖等高混浊水体的 532 nm 处的单位散射系数基本上稳定在 0.63 m²/g 左右; n 基本上在 0.83 左右;太湖巢湖等水体的后向散射概率不随波长变化而变化,其平均值可取 0.029. 本研究采取施坤等^[24]的研究结果,取 $\tilde{b}_p = 0.029$, $n = 0.83$, $b_p^*(532) = 0.63$,由此可计算出 $b_{bp}^*(\lambda)$ [式(12)].

$$b_{bp}^*(\lambda) = 0.029 \times 0.63 \times \left(\frac{532}{\lambda} \right)^{0.83} \quad (12)$$

由于色素颗粒物的吸收在近红外波段非常小, Nechad 等^[14]及 Babin 等^[25]认为:

$$a_p^* = a_p^*(440) e^{-S_{nap}(\lambda - 440)}$$

式中, S_{nap} 为非色素颗粒物吸收光谱的斜率; $a_p^*(440)$ 为总悬浮物的单位比吸收系数,本研究取孙德勇等^[26]对太湖的研究结果, $S_{nap} = 0.0091 \text{ m}^{-1}$; $a_p^*(440) = 0.071 \text{ m}^2/\text{g}$,因此, a_p^* 可以通过式(13)计算.

$$a_p^* = 0.071 \times e^{-0.0091(\lambda - 440)} \quad (13)$$

由式(12)、(13)便可以计算出 B ,进而计算出 B^p . 根据式(11),运用最小二乘法,结合实测的反射率和总悬浮物浓度,便可计算出最优 A^p 和误差项 D^p .

2 结果与讨论

2.1 不同研究区总悬浮物浓度分布及组成特征

表 1 显示了太湖水体、巢湖水体、三峡库区水体等总悬浮物浓度(TSM)和无机悬浮物浓度(ISM)以及无机悬浮物浓度在总悬浮物浓度中所占的比例(ISM/TSM),由表 1 可知太湖春季水体的总悬浮物浓度在 12.85 ~ 244.9 mg/L 之间,平均值为 (72.57 ± 58.29) mg/L,无机悬浮物浓度在 8.05 ~ 222.5 mg/L 之间,平均值为 (61.64 ± 53.95) mg/L,无机悬

表1 太湖、巢湖、三峡等研究区总悬浮物浓度统计分析

Table 1 TSM concentration Statistics analysis in Lake Taihu, Chaohu, and three Gorges				
研究区	统计量	TSM/mg·L ⁻¹	ISM/mg·L ⁻¹	ISM/TSM
三峡	最小值	13.5	10.25	0.741 935
	最大值	253	226	0.893 281
	平均值	79.625	69.187 5	0.841 615
	标准差	62.903 27	56.549 36	0.043 986
巢湖	最小值	15.7	8.45	0.505 618
	最大值	83.933 33	68.4	0.814 932
	平均值	44.579 89	31.575 86	0.687 752
	标准差	16.062 67	13.583 93	0.078 546
太湖(春)	最小值	12.85	8.05	0.509 518
	最大值	244.9	222.5	0.908 534
	平均值	72.574 04	61.646 15	0.801 409
	标准差	58.299 43	53.953 4	0.0884 22
太湖(秋)	最小值	12.866 67	7.333 333	0.525 478
	最大值	265.2	244.5	0.921 946
	平均值	50.367 9	39.884 57	0.732 657
	标准差	43.240 31	40.675 27	0.102 434
所有研究区	平均值	61.829 68	51.014 27	0.772 264
	标准差	51.340 14	47.683 07	0.093 321

浮物占总悬浮物的比例在 50% ~ 90% 之间,平均值为 80% ± 9%;太湖秋季水体的总悬浮物浓度在 12.86 ~ 265.2 mg/L 之间,平均值为 (50.36 ± 43.24) mg/L,无机悬浮物浓度在 7.33 ~ 244.5 mg/L 之间,平均值为 (39.88 ± 40.67) mg/L,无机悬浮物占总悬浮物的比例在 52% ~ 92% 之间,平均值为 80% ± 10%;巢湖水体的总悬浮物浓度在 15.7 ~ 83.93 mg/L 之间,平均值为 (44.57 ± 16.06) mg/L,无机悬浮物浓度在 8.45 ~ 68.4 mg/L 之间,平均值为 (31.57 ± 13.5) mg/L,无机悬浮物占总悬浮物的比例在 50% ~ 80% 之间,平均值为 68% ± 7%;三峡库区水体的总悬浮物浓度在 13.5 ~ 253 mg/L 之间,平均值为 (79.62 ± 62.9) mg/L,无机悬浮物浓度在 10.25 ~ 226 mg/L 之间,平均值为 (69.1 ± 56.5) mg/L,无机悬浮物占总悬浮物的比例在 74% ~ 89% 之间,平均值为 84% ± 4%;所有研究区总悬浮物浓度的平均值为 (61.82 ± 51.3) mg/L,无机悬浮物浓度的平均值为 (51 ± 47.6) mg/L,无机悬浮物占总悬浮物浓度比例的平均值为 77% ± 9%.太湖春季和秋季水体总悬浮物浓度、无机悬浮物浓度以及无机悬浮物占总悬浮物浓度的比例变化较小,巢湖水体的总悬浮物浓度要小于太湖水体和三峡库区水体的,其无机悬浮物浓度的比例也略小于太湖、三峡库区等水体的,三峡库区水体的总悬浮物浓度与太湖水体相当.太湖、巢湖以及三峡水体的总悬浮物浓度、无机悬浮物浓度都较高,这 3 个研究区水体的光

学特性是由悬浮物主导的.无机悬浮物占总悬浮物的 70% 以上,3 个研究区的总悬浮物的主要成分是无机悬浮物,这与孙德勇等^[27]的研究结果是一致的.图 1 显示了 3 个研究区总悬浮物浓度与无机悬浮物浓度之间的关系,这 3 个研究区的水体总悬浮物的组成较为一致,本研究认为:三峡、巢湖水体的 B^p 以及 $\frac{f'}{Q}$ 的值可以采用太湖水体固有光学以及表观光学特性的研究结果.

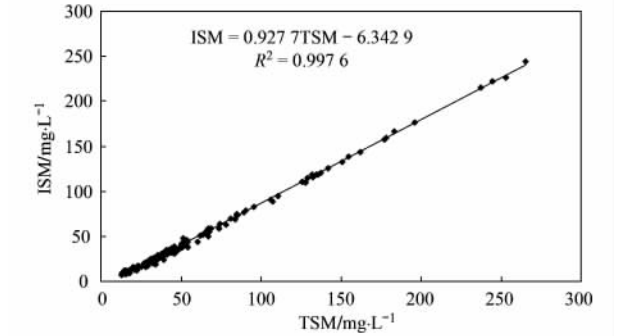


图1 总悬浮物浓度与无机悬浮物浓度之间的关系

Fig. 1 Relationship between TSM and ISM

2.2 敏感波段分析

图 2 显示了太湖、三峡、巢湖等水体颗粒物的吸收(a_p)、与非颗粒物的吸收(a_{np})占水体总吸收的平均比例光谱,由图 2 可知在 400 ~ 697 nm,由于色素颗粒物和 非色素颗粒物较强的吸收以及较弱的纯水的吸收,使得 a_p 占总吸收的比例较高,基本上在 0.6 以上,最高比例达到 0.91,出现在 550 nm.主要是由于色素颗粒物在该波段处的强吸收造成的.在 400 ~ 605 nm,颗粒物的吸收占总吸收的比例在 0.8 以上,在该波段范围内, a_p 远大于 a_{np} ,因此 $a_p + a_{np} \rightarrow a_p$,则会出现 $\omega'_b \rightarrow \frac{b_{bp}^*}{a_p^*}$,那么 $c \rightarrow \infty$,因此该波段范围的单波段遥感反射率难以准确反演总悬浮物浓度.若要精确地反演总悬浮物浓度,必须选择 a_p 远小于 a_{np} 的波段范围,从图 2 中可以看出在 610 ~ 732 nm 处, a_p 和 a_{np} 的吸收几乎相当,因此认为该波段也不适合总悬浮物浓度的反演.在 732 nm 以后,由于纯水吸收的增强,而色素颗粒 物与非色素颗粒物的吸收减弱, a_{np} 占总吸收的比例达到 0.8 以上,并随着波长的增加几乎不变.因此在 732 nm 以后可以认为 $a_p + a_{np} \rightarrow a_{np}$,在该波段范围内,水体的吸收是由纯水主导的,因此认为该波段范围适合总悬浮物浓度的反演.为了验证此方法的合理性,本研究还对总悬浮物浓度与遥感反射率之间的相关性进行了分析.

图3显示了总悬浮物浓度(TSM)、无机悬浮物浓度(ISM)、有机悬浮物浓度(OSM)与遥感反射率之间的相关关系.由图3可知总悬浮物浓度、无机悬浮物浓度与反射率之间的相关性都比较高,特别是在732~850 nm,相关性达到0.7以上,且幅度变化不大,在700 nm之前遥感反射率与总悬浮物浓度之间的相关性要低于与无机悬浮物的,这主要是由于总悬浮物浓度中有机悬浮物的吸收的影响;遥感反射率与总悬浮物浓度之间的相关性随着波长的变化趋势几乎和无机悬浮物一致,这也说明太湖、巢湖、三峡等水体的总悬浮物是由无机悬浮物控制的.有机悬浮物与遥感反射率的相关性很低,几乎不到0.3,在700 nm之前遥感反射率与有机悬浮物成负相关,而700 nm以后成正相关,主要是由于在700 nm以前有机悬浮物对遥感反射率的吸收作用要大于散射作用,而在700 nm以后散射作用大于吸收作用所致.孙德勇等^[1]、徐京萍等^[16]、李素菊等^[28]以及巩彩兰等^[29]研究发现与总悬浮物浓度相关性较好的遥感反射率都出现在近红外波段,进而证明了本研究选择总悬浮物浓度反演的波段范围具有一定的科学性与合理性.

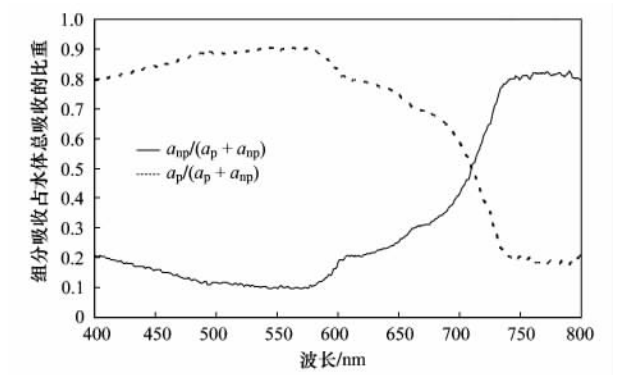


图2 水体组分占水体总吸收的比例光谱

Fig.2 Spectrum of TSM absorption proportion to the water total absorption

2.3 总悬浮物浓度反演模型

基于以上光谱分析,选定732~850 nm波段范围内的遥感反射率建立巢湖、太湖、三峡库区等水体总悬浮物浓度的反演模型.表2、3分别显示了 B^P 、 A^P 以及误差项 D^P 的计算值.在732~850 nm波段范围内, B^P 的值在0.196 5~0.231 9之间,随着波长的增加而增加; A^P 的值在593~1 473之间,随着波长的增加而增加.Nechad等^[14]用相同的方法计算得到 B^P 的值在0.195 7~0.210 9之间,本研究得到

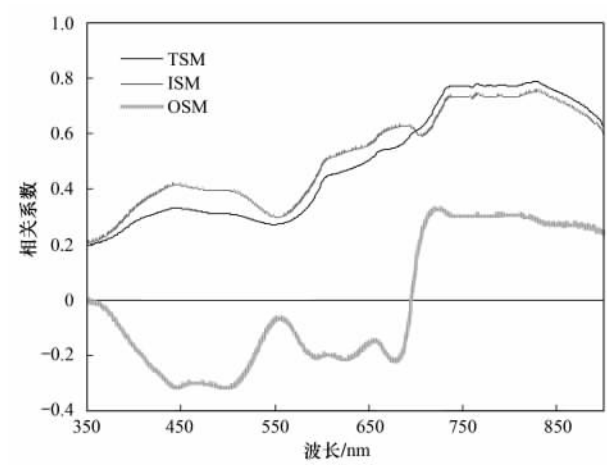


图3 总悬浮物与遥感反射率在不同波长处的相关系数

Fig.3 Correlate coefficients between TSM and remote sensing reflectance

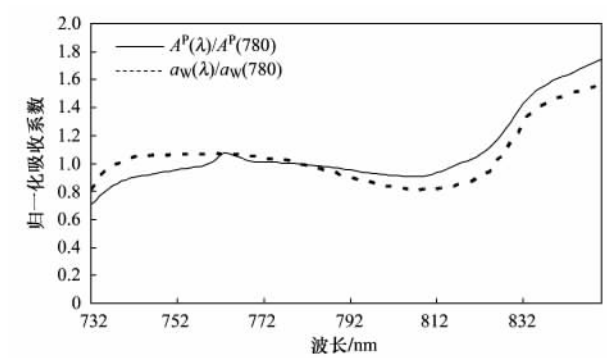


图4 归一化 A^P 和纯水的吸收系数的关系

Fig.4 Relationship between Normalized A^P and the pure water absorption

的值略大是由于所采用的 $b_{bp}^*(\lambda)$ 以及 a_p^* 都不同于Nechad等^[14]的.本研究得到的 A^P 值小于Nechad等^[14]的结果,主要是由于所采用的 $b_{bp}^*(\lambda)$ 值大于Nechad等^[14]的.图4显示了归一化 A^P 值和纯水吸收系数两者之间的关系,两者随波长的变化趋势较为一致. A^P 的值与 a_{np} 、 $b_{bp}^*(\lambda)$ 密切相关, a_{np} 的值等于CDOM和纯水的吸收之和,而在近红外波段CDOM的吸收几乎为0,因此 a_{np} 的值等于纯水的吸收,而 $b_{bp}^*(\lambda)$ 的值相对较为稳定,因此, A^P 随波长的变化应与纯水的一致,图4的变化趋势表明利用上述方法求算的 A^P 值具有一定的准确性.

利用式(10),针对732~850 nm波段范围,分别建立单波段的总悬浮物浓度反演模型(波段间隔为1 nm),图5显示了从732~850 nm波段范围内每个波段反演的总悬浮物浓度与实测总悬浮物浓度之间的相关关系和均方根误差.在732~764 nm,波

表 2 732 ~ 850 nm 波段内 B^P 的值
Table 2 B^P values in the range of 732-850 nm

波长/nm	B^P	波长/nm	B^P	波长/nm	B^P	波长/nm	B^P
732	0.196 513	762	0.207 835	792	0.217 755	822	0.226 279
733	0.196 913	763	0.208 189	793	0.218 061	823	0.226 54
734	0.197 311	764	0.208 541	794	0.218 366	824	0.226 799
735	0.197 707	765	0.208 891	795	0.218 669	825	0.227 057
736	0.198 102	766	0.209 24	796	0.218 971	826	0.227 314
737	0.198 496	767	0.209 587	797	0.219 271	827	0.227 569
738	0.198 887	768	0.209 932	798	0.219 57	828	0.227 822
739	0.199 278	769	0.210 276	799	0.219 867	829	0.228 074
740	0.199 667	770	0.210 619	800	0.220 162	830	0.228 325
741	0.200 054	771	0.210 96	801	0.220 456	831	0.228 574
742	0.200 44	772	0.211 299	802	0.220 749	832	0.228 822
743	0.200 825	773	0.211 637	803	0.221 04	833	0.229 068
744	0.201 208	774	0.211 973	804	0.221 329	834	0.229 313
745	0.201 589	775	0.212 307	805	0.221 617	835	0.229 556
746	0.201 969	776	0.212 64	806	0.221 903	836	0.229 799
747	0.202 347	777	0.212 972	807	0.222 188	837	0.230 039
748	0.202 724	778	0.213 302	808	0.222 471	838	0.230 278
749	0.203 099	779	0.213 63	809	0.222 753	839	0.230 516
750	0.203 473	780	0.213 957	810	0.223 033	840	0.230 753
751	0.203 845	781	0.214 282	811	0.223 312	841	0.230 988
752	0.204 215	782	0.214 605	812	0.223 589	842	0.231 221
753	0.204 584	783	0.214 927	813	0.223 865	843	0.231 454
754	0.204 952	784	0.215 248	814	0.224 139	844	0.231 685
755	0.205 318	785	0.215 567	815	0.224 412	845	0.231 914
756	0.205 682	786	0.215 884	816	0.224 683	846	0.232 142
757	0.206 045	787	0.216 2	817	0.224 953	847	0.232 369
758	0.206 406	788	0.216 514	818	0.225 221	848	0.232 594
759	0.206 766	789	0.216 826	819	0.225 488	849	0.232 818
760	0.207 124	790	0.217 137	820	0.225 753	850	0.233 041
761	0.207 48	791	0.217 447	821	0.226 017		

长越长,反演效果越好,764 nm 反演效果最好,在 765 ~ 770 nm,随着波长的增加,反演效果变差;在 771 ~ 810 nm,总悬浮物浓度的反演效果几乎没有太大变化;在 811 ~ 825 nm,随着波长的增加,悬浮物的反演效果越好,825 nm 是反演效果最好的波段;在 826 ~ 850 nm 随着波长的增加,悬浮物的反演效果开始下降,主要是由于在 826 nm 以后遥感反射率的噪声较大而导致的. 在 732 ~ 850 nm 波段范围内,总悬浮物浓度反演效果最好的波段出现在 825 nm 左右. 然而不同波段对总悬浮物浓度的反演效果差别并不是太大,相关系数仅从 0.82 变化到 0.86,均方根误差仅从 15.7 变化到 17.8 mg/L.

2.4 模型反演精度及模型比较分析

在 732 ~ 850 nm 波段范围,目前正在运行的水色遥感传感器通道主要有: 748 nm (MODIS748)、753 nm (MERIS753)、760 nm (MERIS760)、765 nm (SeaWiFS765)、778 nm (MERIS778),本研究对利用以上波段以及 825 nm 波段所建立的单波段悬

浮物浓度反演模型进行精度评价,并与常规的统计模型进行对比分析.

表 4 显示了 748 nm (MODIS748)、753 nm (MERIS753)、760 nm (MERIS760)、765 nm (SeaWiFS765)、778 nm (MERIS778)、825 nm 等波段的总悬浮物浓度的反演模型和相应的均方根误差、平均相对误差. 为了检验本研究的模型的有效性,分别将表 4 中的模型应用到预留的 40 个样本. 由表 4 可知,748 nm (MODIS748)、753 nm (MERIS753)、760 nm (MERIS760)、765 nm (SeaWiFS765)、778nm (MERIS778)、825nm 等波段的模型相对误差分别为 0.237、0.236、0.237、0.226、0.231、0.231,均方根误差分别为:17.176、17.002、16.919、16.090、16.557、15.955 mg/L. 这 6 个波段所建立的反演模型相对误差最小的是 765 nm (SeaWiFS765),均方根误差最小的是 825nm. 通过 40 个样本对模型的检验可以看出,本研究采用太湖水体以往关于固有光学量等参数的研究结果具有

表 3 732 ~ 850 nm 波段内 A^P 、 D^P 的值
Table 3 A^P and D^P values in the range of 732-850nm

波长/nm	R^2	D^P	A^P	波长/nm	R^2	D^P	A^P	波长/nm	R^2	D^P	A^P	波长/nm	R^2	D^P	A^P
732	0.82	4.35	593.71	762	0.85	0.93	897.04	792	0.85	1.19	804.66	822	0.85	-0.20	894.68
733	0.82	4.37	620.62	763	0.85	0.75	908.17	793	0.85	1.17	799.88	823	0.86	-0.15	914.28
734	0.82	4.35	645.58	764	0.85	0.91	904.93	794	0.85	1.16	795.40	824	0.86	-0.09	936.38
735	0.82	4.32	668.48	765	0.85	1.29	893.90	795	0.85	1.05	792.14	825	0.86	0.01	960.55
736	0.82	4.31	688.80	766	0.85	1.59	883.32	796	0.85	0.98	789.13	826	0.86	0.10	987.52
737	0.83	4.28	707.16	767	0.85	1.83	874.04	797	0.85	0.94	786.07	827	0.86	0.16	1018.37
738	0.83	4.21	723.38	768	0.85	2.03	865.56	798	0.85	0.89	782.46	828	0.86	0.24	1054.08
739	0.83	4.19	735.73	769	0.84	2.18	859.07	799	0.85	0.82	779.47	829	0.86	0.34	1092.68
740	0.83	4.17	745.22	770	0.84	2.27	854.79	800	0.85	0.74	777.41	830	0.86	0.46	1131.70
741	0.83	4.10	753.79	771	0.84	2.28	853.06	801	0.85	0.66	775.24	831	0.86	0.53	1168.71
742	0.83	4.05	760.41	772	0.84	2.25	852.18	802	0.85	0.62	772.78	832	0.85	0.59	1202.49
743	0.83	4.01	765.52	773	0.84	2.21	851.28	803	0.85	0.62	770.18	833	0.85	0.69	1234.42
744	0.83	3.93	770.70	774	0.84	2.17	850.44	804	0.85	0.63	767.45	834	0.85	0.80	1261.48
745	0.83	3.86	775.26	775	0.84	2.13	849.67	805	0.85	0.64	765.13	835	0.85	0.88	1282.78
746	0.83	3.82	779.22	776	0.84	2.08	849.01	806	0.84	0.61	764.02	836	0.85	0.99	1298.87
747	0.83	3.73	783.84	777	0.84	2.04	847.69	807	0.85	0.55	764.10	837	0.85	1.06	1313.82
748	0.83	3.63	788.69	778	0.84	2.00	846.04	808	0.85	0.50	765.44	838	0.85	1.05	1330.71
749	0.83	3.56	793.24	779	0.84	1.91	845.15	809	0.85	0.50	767.77	839	0.85	1.05	1344.09
750	0.83	3.48	797.56	780	0.84	1.85	843.44	810	0.85	0.45	772.22	840	0.84	1.08	1354.91
751	0.83	3.41	801.70	781	0.84	1.83	840.52	811	0.85	0.27	779.58	841	0.84	1.16	1367.22
752	0.83	3.35	805.97	782	0.84	1.81	837.26	812	0.85	0.10	787.96	842	0.84	1.26	1376.96
753	0.83	3.29	810.01	783	0.84	1.77	834.06	813	0.85	-0.03	796.91	843	0.84	1.35	1384.92
754	0.83	3.22	813.74	784	0.84	1.71	831.29	814	0.85	-0.15	806.98	844	0.84	1.25	1398.19
755	0.84	3.15	817.55	785	0.84	1.67	827.87	815	0.85	-0.23	817.69	845	0.84	1.16	1413.34
756	0.84	3.08	821.34	786	0.85	1.61	824.43	816	0.85	-0.30	828.87	846	0.84	1.18	1428.04
757	0.84	2.99	825.38	787	0.85	1.50	821.81	817	0.85	-0.36	839.78	847	0.84	1.23	1438.43
758	0.84	2.78	830.48	788	0.85	1.39	819.62	818	0.85	-0.37	849.78	848	0.84	1.28	1447.86
759	0.83	2.45	838.06	789	0.85	1.31	817.22	819	0.86	-0.30	858.40	849	0.84	1.27	1461.51
760	0.84	2.02	850.50	790	0.85	1.29	813.43	820	0.86	-0.26	867.36	850	0.83	1.31	1473.00
761	0.84	1.46	871.59	791	0.85	1.27	809.04	821	0.85	-0.25	878.67				

表 4 基于生物光学模型的总悬浮物浓度误差统计和模型参数
Table 4 Bio-optics models error statistics and its parameters

波段/nm	R^2	平均相对误差	均方根误差/mg·L ⁻¹	反演模型
MODIS748	0.830 547	0.237 993 089	17.176 959 17	$788.68 \times \rho_w / (1 - \rho_w / 0.202) + 3.63$
MERIS753	0.833 964	0.236 174 195	17.002 892 22	$810 \times \rho_w / (1 - \rho_w / 0.204) + 3.28$
MERIS760	0.835 585	0.237 408 636	16.919 689 7	$850.5 \times \rho_w / (1 - \rho_w / 0.207) + 2.02$
SeaWiFS765	0.851 302	0.226 630 999	16.090 656 84	$893.9 \times \rho_w / (1 - \rho_w / 0.208) + 1.28$
MERIS778	0.842 55	0.231 988 023	16.557 416 43	$846 \times \rho_w / (1 - \rho_w / 0.213) + 2$
832	0.853 783	0.231 577 825	15.955 853 91	$1\,202 \times \rho_w / (1 - \rho_w / 0.228) + 0.58$

一定的适用性.

目前基于经验的总悬浮物反演模型有 TASSAN 模型^[7]、唐军武等^[10]对 TASSAN 模型^[7]进行改进的线性模型,以及 Doxaran 等^[30]的比值模型、单波段的经验模型.本研究试图建立 TASSAN 模型^[7]、唐军武等^[10]的线性模型都没有获得成功,模型的 R^2 仅

为 0.17. TANSSAN 模型^[7]以及唐军武等^[10]的线性模型都是针对海洋水体的,所采用的反演波长是 490、555、670nm,针对太湖、巢湖和三峡水体,悬浮物在这 3 个波段的吸收占总吸收的比重都较大,因此这 3 个波段并不能很好地反映总悬浮物浓度的信息,这 2 种模型并不适合太湖、巢湖和三峡等水体.

本研究建立了总悬浮物浓度反演的单波段经验模型和 DOXARAN 等^[30]的比值模型,见式(13)和(14).

$$TSM = S \times R_{rs} + I \tag{13}$$

$$TSM = S \times R_{rs}(555)/R_{rs}(865) + I \tag{14}$$

式中,TSM 为总悬浮物浓度;S 和 I 为回归参数; R_{rs} 为遥感反射率.

表 5 显示了利用经验算法[式(13)]所建立的 748 nm (MODIS748)、753 nm (MERIS753)、760 nm

(MERIS760)、765 nm (SeaWiFS765)、778 nm (MERIS778)、825 nm 等总悬浮物浓度反演的单波段模型的参数和误差情况,由表 5 可知,利用以上几个波段采用经验算法最低的相对误差为 0.539 (MERIS778),远高于基于生物光学模型的最高相对误差 0.237 (MODIS748);均方根误差最低为 27.82 mg/L(825 nm),也要大于生物光学模型的最大均方根误差 15.95 mg/L(825 nm).

表 5 基于经验方法的总悬浮物浓度误差统计和模型参数
Table 5 Experienced models models error statistics and its parameters

波段/nm	R^2	平均相对误差	均方根误差/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	I	S
MODIS748	0.771 286	0.540 042 366	28.415 046 74	-18.469 5	4 820.951
MERIS753	0.772 151	0.540 751 663	28.370 335 85	-18.179 1	4 852.713
MERIS760	0.766 161	0.547 041 492	28.692 624 37	-17.940 6	4 879.722
SeaWiFS765	0.780 763	0.541 792 622	27.875 490 81	-18.487 1	5 049.643
MERIS778	0.773 827	0.539 706 021	28.279 721 25	-17.944 8	4 835.149
825	0.782 773	0.542 168 870	27.826 854 09	-13.402 7	5 642.492

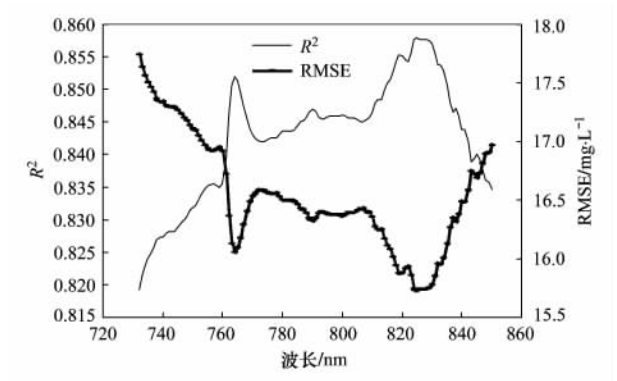


图 5 732 ~850 nm 波段内总悬浮物反演值和实测值之间的相关关系与 RMSE

Fig.5 RMSE and the correlate coefficient between inversion values and measured values of TSM

利用 DOXARAN 等^[30]的比值模型所建立的太湖、巢湖、三峡库区等水体的模型为:

$$TSM = 393.33 \times R_{rs}(555)/R_{rs}(865) - 33.156$$
$$R^2 = 0.77 \tag{15}$$

该模型的平均相对误差为 0.51,55% 的样本的相对误差都高于 0.4,均方根误差为 18 mg/L. 可见利用比值模型也不能很好地反演太湖、巢湖、以及三峡库区等 3 个研究区的总悬浮物浓度,模型的反演效果也没有本研究所建立的模型好.

图 6 ~ 8 显示了利用单波段经验算法 (825 nm)、比值算法(555、865 nm)以及本研究所提出的算法(825 nm)反演值和实测值之间的关系,可见,本研究所提出的算法能够较好地反演太湖、巢湖以

及三峡库区等水体总悬浮物浓度.

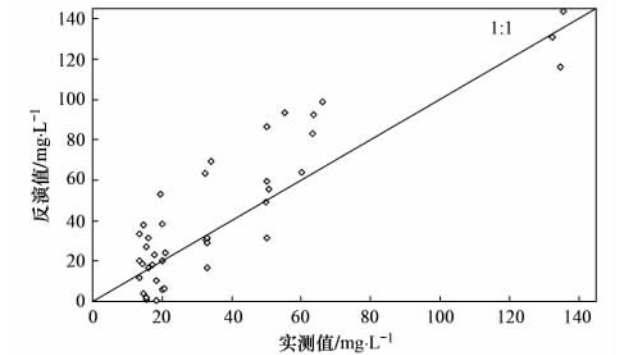


图 6 基于单波段经验算法的总悬浮物实测值与反演值之间的关系

Fig.6 Relationship between measured values TSM and inversion values based on single band experienced model

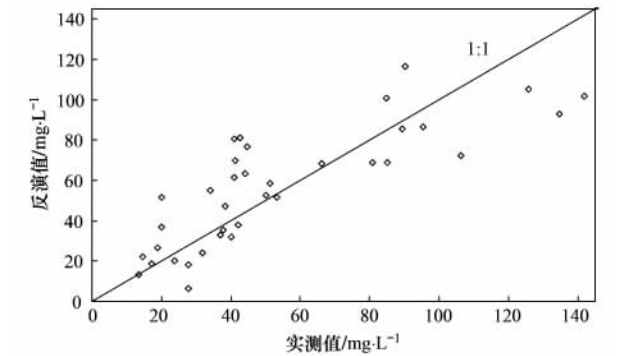


图 7 基于比值模型的总悬浮物实测值与反演值之间的关系
Fig.7 Relationship between measured values TSM and inversion values based on band ratio experienced model

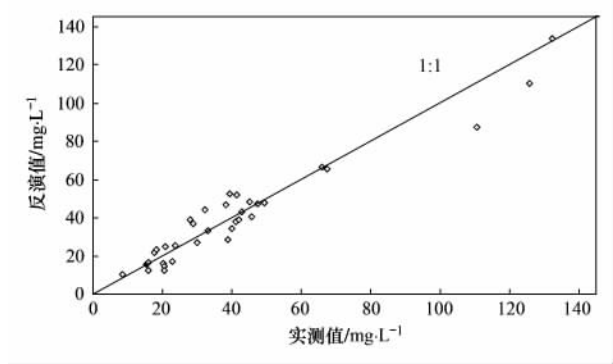


图8 基于生物光学模型的总悬浮物实测值与反演值之间的关系

Fig.8 Relationship between measured values TSM and inversion values based on bio-optics model

3 结论

本研究首先根据水体的固有光学特征,结合生物光学模型,选取适宜总悬浮物浓度反演的波段范围,经研究发现:在短波波段,总悬浮物的吸收占水体总吸收的比例较高,不适合总悬浮物浓度的反演;在 732 ~ 850 nm 波段范围,总悬浮物吸收所占的比例相对较小,是总悬浮物浓度反演的较适宜的波段范围. 根据以往学者对太湖水体固有光学特性的研究成果,以及最小二乘法确定生物光学的相关参数,构建了太湖、巢湖、三峡水库等水体在 732 ~ 850 nm 波段范围内总悬浮物浓度反演的单波段模型,研究发现在 732 ~ 850 nm 波段范围内所建立生物光学模型能够很好地反演太湖、巢湖以及三峡库区等无机悬浮物占主导的总悬浮物的浓度,其中反演效果最好的波段为 825 nm;利用该方法反演总悬浮物浓度要优于传统的经验算法.

参考文献:

[1] 孙德勇,李云梅,王桥,等. 基于实测高光谱的太湖水体悬浮物浓度估算研究[J]. 红外与毫米波学报,2009,28(2):124-128.

[2] 光洁,韦玉春,黄家柱,等. 分季节的太湖悬浮物遥感估算模型研究[J]. 湖泊科学,2007,19(3):241-249.

[3] 马荣华,戴锦芳. 结合 Landsat ETM 与实测光谱估算太湖叶绿素及悬浮物含量[J]. 湖泊科学,2005,17(2):97-103.

[4] 吕恒,李新国,江南. 基于反射光谱和模拟 MERIS 数据的太湖悬浮物遥感定量模型[J]. 湖泊科学,2005,17(2):104-149.

[5] Doxaran D, Froidefond J M, Lavender S. Spectral signature of highly turbid waters application with SPOT data to quantify suspended particulate matter concentrations [J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 81: 149-161.

[6] 王艳红,邓正栋,马荣华. 基于实测光谱与 MODIS 数据的太湖悬浮物定量估测[J]. 环境科学学报,2007,27(3):509-

515.

[7] Tassan S. Local algorithm using SeaWiFS data for the retrieval of phytoplankton, pigments, suspended sediment, and yellow substance in coastal waters [J]. Applied Optics, 1994, 33(12):2369-2378.

[8] Myint S W, Walker N D. Quantization of surface suspended sediments along a river dominated coast with NOAA AVHRR and SeaWiFS measurements: Louisiana, USA [J] International Journal of Remote Sensing, 2002, 23(16):3229-3249.

[9] Petus C, Chust G, Doxaran D, et al. Estimating turbidity and total suspended matter in the Adour River plume (South Bay of Biscay) using MODIS 250-m imagery [J]. Continental Shelf Research, 2010, 30:379-392.

[10] 唐军武, 王晓梅, 宋庆君, 等. 黄、东海二类水体水色要素统计反演模式[J]. 海洋科学进展, 2004, 22(B10):1-7.

[11] Liu Y, Anisul T M, Jay G. Quantification of shallow water quality parameters by means of remote sensing[J]. Progress in Physical Geography, 2003, 27(1):24-44.

[12] Yu-Hwan A, Jeong-Eun M, Sonia G. Development of suspended particulate matter algorithms for ocean color remote sensing[J]. Korean Journal of Remote Sensing, 2001, 17(4):285-295.

[13] Tang J W, Wang X M, Song Q J, et al. The statistic inversion algorithms of water constituents for the Huanghai Sea and the East China Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2004, 23(4):617-626.

[14] Nechad B, Ruddick K G, Park Y. Calibration and validation of a generic multisensor algorithm for mapping of total suspended matter in turbid waters[J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114:854-866.

[15] 宋庆君, 马荣华, 唐军武, 等. 秋季太湖悬浮物高光谱估算模型[J]. 湖泊科学, 2008, 20(2):196-202.

[16] 徐京萍, 张柏, 宋开山, 等. 近红外波段二类水体悬浮物生物光学反演模型研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(10):2273-2277.

[17] Zhang B, Li J S, Shen Q, et al. A bio-optical model based method of estimating total suspended matter of Lake Taihu from near-infrared remote sensing reflectance [J]. Environment Monitoring and Assessment, 2008, 145:339-347.

[18] 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.

[19] 唐军武, 田国良, 汪小勇, 等. 水体光谱测量与分析 I: 水面上法[J]. 遥感学报, 2004, 8(1):37-44.

[20] 孙德勇, 李云梅, 黄家柱, 等. 太湖梅梁湾夏季水体组分光谱吸收特性[J]. 生态学报, 2008, 28(2):749-760.

[21] Bowers D G, Binding C E. The optical properties of mineral suspended particles: a review and synthesis [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2006, 67:219-230.

[22] Gordon H R, Morel A. Remote assessment of ocean color for interpretation of satellite visible imagery: a review [A]. In: Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies; 4 [M]. New York: Springer Verlag, 1983. 114.

[23] Zhang Y L, Liu M L, Qing B Q, et al. Modeling remote-sensing

reflectance and retrieving chlorophyll-a concentration in extremely turbid case- 2 waters (Lake Taihu, China) [J]. IEEE Transactions on geoscience and remote sensing, 2009, **47**(7): 1937-1948.

[24] 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):2478-2485.

[25] Babin M, Stramski D, Ferrari G M, *et al.* Variations in the light absorption coefficients of phytoplankton, nonalgal particles and dissolved organic matter in coastal waters around Europe [J]. Journal of Geophysical Research, 2003,**108**(c7): 3211.

[26] 孙德勇,李云梅,王桥,等. 太湖水体中悬浮颗粒物的比吸收光谱特性及其参数化分析[J]. 环境科学学报, 2009,**29**(9): 1820-1829.

[27] 孙德勇,李云梅,乐成峰,等. 太湖水体散射特性与其悬浮浓度关系模型[J]. 环境科学,2007,**28**(12):2688-2694.

[28] 李素菊,王学军. 巢湖水体悬浮物含量与光谱反射率的关系[J]. 城市环境与城市生态,2003,**16**(6):66-68.

[29] 巩彩兰,尹球,匡定波. 黄浦江水质指标与反射光谱特征的关系分析[J]. 遥感学报,2006,**10**(6):910-916.

[30] 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.