

不同方法估算太湖叶绿素 a 浓度对比研究

李云亮^{1,2}, 张运林^{2*}, 李俊生³, 刘明亮²

(1. 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210093; 2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 太湖湖泊生态系统研究站, 南京 210008; 3. 中国科学院对地观测与数字地球科学中心, 北京 100080)

摘要: 基于 2006-01-07 ~ 2006-01-09 和 2006-07-29 ~ 2006-08-01 太湖地面实测高光谱数据以及同步水质参数数据, 对比分析了三波段模型、两波段模型、反射峰位置法、一阶微分法 4 种方法用于估算太湖叶绿素 a 浓度的精度, 并讨论其应用于遥感影像中估算叶绿素 a 浓度的可行性. 2 次采样 3 类水色参数总悬浮物、叶绿素 a 浓度和有色可溶性有机物在 440 nm 处吸收系数的变化范围分别为 12.24 ~ 285.20 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、4.83 ~ 155.11 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 0.27 ~ 2.36 m^{-1} . 前述 4 种方法在反演太湖水体的叶绿素 a 浓度时都取得较高的精度; 决定系数分别为: 0.813、0.838、0.872、0.819, 均方根误差分别为: 13.04、12.12、13.41、12.13 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$; 相对误差分别为: 35.5%、34.9%、24.6%、41.8%. 反射峰位置法估算精度最高, 但应用到叶绿素 a 浓度遥感影像估算比较困难. 三波段模型和两波段模型的反演结果优于传统的一阶微分法, 且在卫星遥感反演中具有良好的应用前景. 根据模拟 MERIS 数据, 分别得到最优三波段模型 $[R^{-1}(665) - R^{-1}(709)] \times R(754)$ 和两波段模型 $R(709)/R(681)$, 其决定系数、均方根误差、相对误差分别为 0.788、13.87 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、37.3% 和 0.815、12.96 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、34.8%, 反映了 MERIS 数据能非常好地应用于太湖这类浑浊二类水体叶绿素 a 浓度的精确估算.

关键词: 太湖; 叶绿素 a; 反演; 遥感反射率

中图分类号: X87 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)03-0680-07

Comparison of Chlorophyll a Concentration Estimation in Taihu Lake Using Different Methods

LI Yun-liang^{1,2}, ZHANG Yun-lin², LI Jun-sheng³, LIU Ming-liang²

(1. School of Geography and Ocean Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 2. Taihu Lake Laboratory Ecosystem Research Station, State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. Earth Observation and Digital Earth Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: Based on the measured remote sensing reflectance and concurrent chlorophyll a (Chl-a) concentration in Taihu Lake from January 7 to 9 and July 29 to August 1, 2006, this study comparatively analyzed the estimation precision of three-band-model, two-band-model, reflectance peak position method and first derivative method, and further discussed the feasibility of the four methods to estimate Chl-a using remote sensing image. The data set of two samplings contained widely variable total suspended matter (12.24-285.20 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), Chl-a (4.83-155.11 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$) and chromophoric dissolved organic matter absorption coefficient at 440 nm (0.27-2.36 m^{-1}). The former four methods all got high precisions on Chl-a concentration estimation in Taihu Lake with determination coefficients (r^2) of 0.813, 0.838, 0.872 and 0.819, respectively. The root mean square error (RMSE) between measured and estimated Chl-a concentrations using the four models was 13.04, 12.12, 13.41 and 12.13 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively, and the relatively error (RE) was 35.5%, 34.9%, 24.6% and 41.8%, respectively. Although the reflectance peak position method had the highest estimation precision, it was difficult to be applied on remote sensing image due to lacking spectral channel. The three-band-model and two-band-model had higher estimation precisions than the first order differential method and good application foreground in Chl-a retrieval using remote sensing image. The r^2 , RMSE, RE of $[R^{-1}(665) - R^{-1}(709)] \times R(754)$ in three-band-model and $R(709)/R(681)$ in two-band-model based on simulation MERIS data were 0.788, 13.87 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 37.3%, and 0.815, 12.96 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 34.8%, respectively. The results in this study demonstrated MERIS data could be applied to retrieve Chl-a concentration in turbid Case-II waters as Taihu Lake.

Key words: Taihu Lake; chlorophyll a; retrieval; remote sensing reflectance

叶绿素 a 是浮游植物分布的指示剂, 是衡量水体初级生产力和富营养化的基本指标. 浑浊的内陆二类水体光学特性复杂多变, 高浓度的非色素颗粒物和有色可溶性有机物 (chromophoric dissolved organic matter, CDOM) 的干扰使得叶绿素 a 浓度的精确遥感估算成为一项具有挑战性的工作. 遥感技术在内陆水体中的应用远不如在地质、生态、海洋等领

域成熟, 研究进展也比较缓慢. 而我国大多数湖泊尤其是长江中下游地区湖泊都属于典型的浑浊二类水

收稿日期: 2008-06-03; 修订日期: 2008-07-11

基金项目: 中国科学院知识创新工程重大交叉项目 (KZCX1-YW-14-2); 国家自然科学基金项目 (40730529, 40601099)

作者简介: 李云亮 (1983 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为遥感机制、方法与应用, E-mail: liyunliang83@163.com

* 通讯联系人, E-mail: ylzhang@niglas.ac.cn

体,都面临着不同程度的湖泊富营养化,迫切需要利用遥感技术进行大范围、周期性的湖泊水质和蓝藻水华的遥感动态监测,发展适合浑浊二类水体叶绿素a浓度的估算是进行内陆水体蓝藻水华和富营养化监测的重要一步。

目前已有众多国内外学者对叶绿素a浓度的反演方法进行了研究,建立了相应的估算模型。Han等^[1]通过分析地面实测高光谱数据发现叶绿素a浓度与 $R(690.7)$ 一阶微分的相关性要高于与反射率比值 $R(705)/R(670)$ 。Hoogenboom等^[2]通过对Ljsselneer湖泊AVRIS数据的敏感度分析,得出叶绿素a浓度估算的最佳波段组合为 $R(708)/R(676)$ 。Frater^[3]对美国22个内陆湖的光谱反射率与叶绿素a和浑浊度的关系进行研究,发现 $R(695)$ 一阶微分与叶绿素a浓度的相关性最好。Gons等^[4-7]引入776 nm处后向散射校正后利用 $R(704)/R(672)$ 发展了浑浊的海湾及内陆湖泊叶绿素浓度的反演算法,并应用到MERIS卫星影像数据。Chen等^[8]建立了一种基于SeaWiFS的反演珠江口叶绿素a浓度的波段比值算法。李素菊等^[9]通过对巢湖的光谱测量和分析得出:反射率比值 $R(705)/R(680)$ 和 $R(690)$ 的一阶微分与叶绿素a浓度有较好的相关性。疏小舟等^[10]通过对太湖反射光谱特性和藻类叶绿素浓度之间关系的研究,发现光谱反射比 $R(705)/R(675)$ 和700 nm附近反射峰的位置与叶绿素浓度相关性较好。马荣华等^[11]和张运林等^[12]利用太湖实测光谱和水体固有光学特性计算的辐照度比均揭示了682 nm和706 nm附近是叶绿素a浓度估算最重要2个光谱波段。2003年,Gitelson等^[13]首先提出用于估算陆地植被色素含量的三波段遥感反射率模型,Dall’Olmo等^[14,15]通过实验和模型的方法进行验证,之后被许多学者证明该模型可用于评估混浊高产水域的叶绿素a浓度^[16-18]。

本研究以2006冬夏两季太湖地区地面实测高光谱数据和同步水质化学分析数据为基础,探讨叶绿素a定量遥感反演的机制和模型,明确内陆水体的光谱测量方法以及叶绿素a定量遥感反演的最佳波段和模型,不仅对推进内陆水体地面光谱测量和叶绿素a定量遥感反演具有重要的科学和现实意义,而且对传感器的波段设置也有一定的借鉴和指导意义。

1 材料与方法

1.1 采样与测量方法

2006-01-07~2006-01-09和2006-07-29~2006-08-01在太湖共布设了50个采样点(图1),分别进行冬、夏两季水面反射光谱测量和表层水质采样,采样点基本覆盖了太湖不同生态类型的湖区,包括藻型湖区(梅梁湾)和草型湖区(胥口湾)和大太湖开阔水域。采样期间风速均较小,湖面平静,因此采样期间藻华在不同湖区间漂移堆积的变化不明显。剔除受天空状况和水面藻华影响严重的站点,选取88个样点进行分析。光谱测量采用美国ASD公司生产的Field Spec Pro FR便携式分光辐射光谱仪,水面上光谱测量参照唐军武等^[19]推荐的方法。

悬浮物浓度采用灼烧称重法测定。叶绿素a的测定采用分光光度法,用GF/C滤膜过滤水样,再将滤膜置于冰箱中冷冻48 h以上,取出后用90%的热乙醇萃取,之后在岛津UV2401分光光度计上测定665、750 nm处吸光度,并加入1滴1%稀盐酸酸化,换算得到叶绿素a。CDOM吸收系数测定参见文献^[20]。

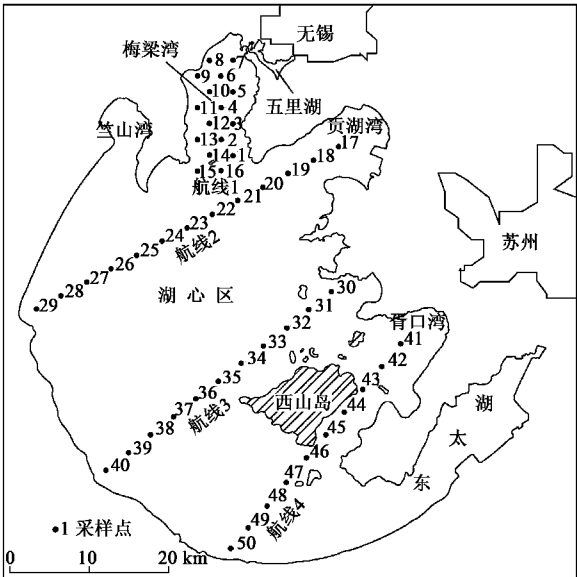


图1 采样站点分布

Fig.1 Distribution of sampling stations

1.2 统计分析

运用SPSS 13.0进行数据统计分析,包括计算平均值、标准差、方差分析、线性及非线性拟合等。引入均方根误差(root mean square error, RMSE)和相对误差(relative error, RE)作为统计量来检验反演值和实测值是否一致的评判标准。RMSE和RE的计算式如下:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{\text{est},i} - x_{\text{obs},i})^2}{n}} \quad (1)$$

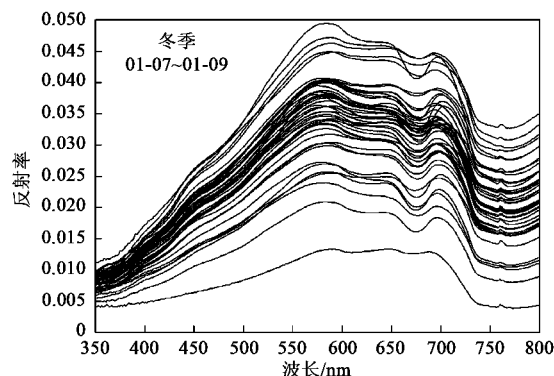
$$\text{RE} = \frac{(x_{\text{est},i} - x_{\text{obs},i})}{x_{\text{obs}}} \times 100\% \quad (2)$$

式中, $x_{\text{est},i}$ 和 $x_{\text{obs},i}$ 分别为第 i 个反演值和实测值, n 是数据总量。

2 结果与分析

2.1 光谱特征分析

冬、夏两季水面光谱测量得到的 350 ~ 800 nm 范围内可见光和近红外波段反射率如图 2 所示。从中可以看出, 不同的采样点, 不同的季节, 光谱反射率变化很大, 但都具有共同的特征: ①在 560、650、705 nm 附近出现明显的峰值, 在 680 nm 附近具有明



显的谷值。560 nm 附近处峰值主要是由于藻类色素的低吸收和无机悬浮物质、浮游植物细胞壁的散射作用所致^[21~23], 太湖中无机悬浮物的浓度非常高, 是此处反射率的主要贡献因子。705 nm 附近的反射峰随着叶绿素浓度的增加, 峰高随之增加, 反射峰位置也向着长波方向移动, 其位置从 688 nm 开始到 713 nm 结束, 与叶绿素浓度密切相关, 可作为判断是否有叶绿素的依据^[11]。680 nm 附近的谷值是叶绿素 a 在红光波段的强烈吸收所致。从冬、夏两季对比来看, 夏季峰谷值更为明显。②在 400 ~ 500 nm 的短波部分以及 750 ~ 800 nm 的长波部分, 反射率相对较低, 前者是由于悬浮物、CDOM 对蓝光波段的强烈吸收所致, 后者则是由于纯水在红外波段范围内的吸收作用。

2.2 叶绿素 a 浓度估算方法比较

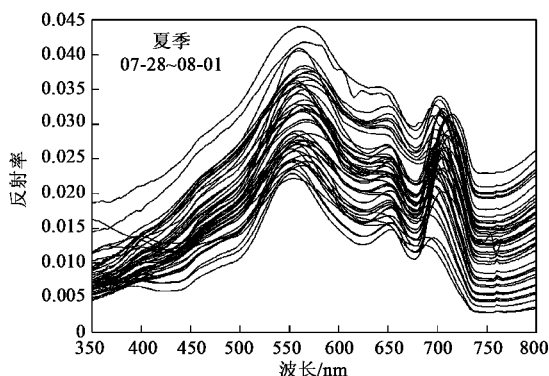


图 2 冬、夏两季采样点遥感反射率光谱变化

Fig.2 Spectral remote sensing reflectance of sample sites in winter and summer

实验期间, 3 类水色参数跨度范围比较大, 总悬浮物浓度: 12.24 ~ 285.20 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ($84.36 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \pm 58.37 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 叶绿素 a 浓度: 4.83 ~ 155.11 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ($30.24 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1} \pm 30.29 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$), CDOM 在 440 nm 处的吸收系数: 0.27 ~ 2.36 m^{-1} ($0.82 \text{ m}^{-1} \pm 0.33 \text{ m}^{-1}$)。

2.2.1 三波段模型

Gitelson 等^[13]在 2003 年提出用于估算陆地植被色素含量的三波段遥感反射率概念模型, 模型形式为:

$$\text{Chl-a} \propto [R^{-1}(\lambda_1) - R^{-1}(\lambda_2)] \times R(\lambda_3) \quad (3)$$

式中, $R(\lambda_i)$ 为波段 λ_i 的遥感反射率。样品在 λ_1 处应当对叶绿素吸收最敏感; 在 λ_2 处应当对叶绿素吸收最不敏感, 且在 λ_2 处的悬浮物和 CDOM 的吸收系数与 λ_1 处的非常接近, 因此 $R^{-1}(\lambda_1) - R^{-1}(\lambda_2)$ 可以消除非色素颗粒物、CDOM 的影响, 但仍受后向散

射的影响。若样品间的后向散射不同, 同样叶绿素浓度估算出来的结果可能会有很大差异; λ_3 处的遥感反射率 $R(\lambda_3)$ 用来抵消样品间后向散射的影响, 因此 λ_3 处需受各成分吸收最小。基于以上对 λ_1 、 λ_2 和 λ_3 意义及特征的分析, Dall' Olmo 等^[14]认为 λ_1 、 λ_2 和 λ_3 的取值范围分别为: 660 ~ 690、700 ~ 750 和 $\geq 730 \text{ nm}$ 。

根据 Dall' Olmo 等^[14]的设定, 本研究设定 3 个波段取值范围分别为: λ_1 660 ~ 690 nm, λ_2 700 ~ 750 nm, λ_3 730 ~ 760 nm。根据模型估算的叶绿素 a 浓度与实测叶绿素 a 浓度间的 RMSE 最小原则, 选择出估算太湖叶绿素 a 浓度的三波段模型。试验结果表明, RMSE 最小值对应的三波段模型为: $[R^{-1}(690) - R^{-1}(704)] \times R(749)$ 。由该三波段模型建立的叶绿素 a 浓度遥感估算模型为:

$$y = 20.129 + 206.251x \quad (4)$$

由此估算模型估算的叶绿素a浓度与实测叶绿素a浓度之间的关系如图3所示。

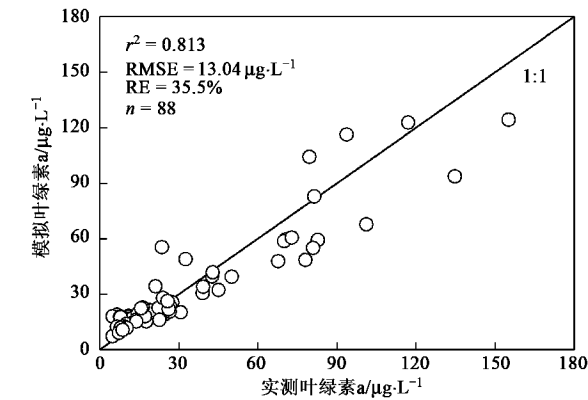


图3 三波段模型叶绿素a浓度估算值与实测值的对比
Fig.3 Comparison between measured and estimated the chlorophyll a concentration based on three-band-model

2.2.2 两波段模型

两波段模型是三波段模型的一个特殊形式,当λ₁处浮游植物吸收远大于后向散射以及非色素颗粒物和CDOM吸收系数之和时,三波段模型就可简化为:

$$\text{Chl-a} \propto R^{-1}(\lambda_1) \times R(\lambda_3) \tag{5}$$

根据Dall’Olmo等^[14]、Gitelson等^[17]设定的2个波段的取值范围,本研究设定2个波段范围分别为:λ₁ 650~700 nm, λ₃ 700~760 nm.各波段组合得到RMSE最小时的模型为:R(700)/R(692),由该模型建立的叶绿素a浓度遥感估算模型为:

$$y = -251.855 + 270.368x \tag{6}$$

由此估算模型估算的叶绿素a浓度与实测叶绿素a浓度之间的关系如图4所示。

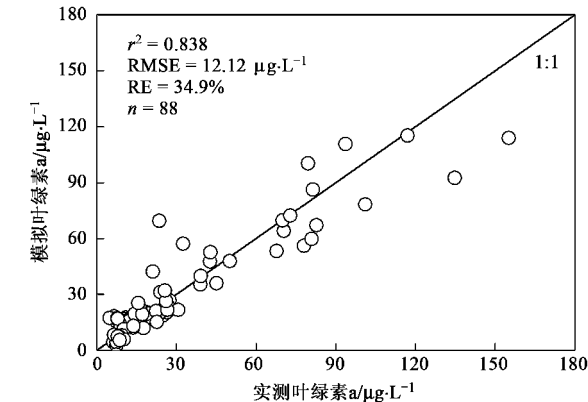


图4 两波段模型叶绿素a浓度估算值与实测值的对比
Fig.4 Comparison between measured and estimated the chlorophyll a concentration based on two-band-model

2.2.3 反射峰位置法

705 nm附近的反射峰位置与叶绿素a浓度存在紧密的关系,叶绿素a浓度增加,峰高随之增加,反射峰位置也向着长波方向移动(图5),两者之间存在很强的相关性,决定系数(r²)为0.872.由于两者之间是幂函数关系,因此分别以反射峰处波长的对数和叶绿素a浓度为自变量x和因变量y进行回归分析,得到估算模型如下:

$$y = -611.368 + 93.840x \tag{7}$$

以此估算模型估算的叶绿素a浓度与实测叶绿素a浓度之间的关系如图6所示。

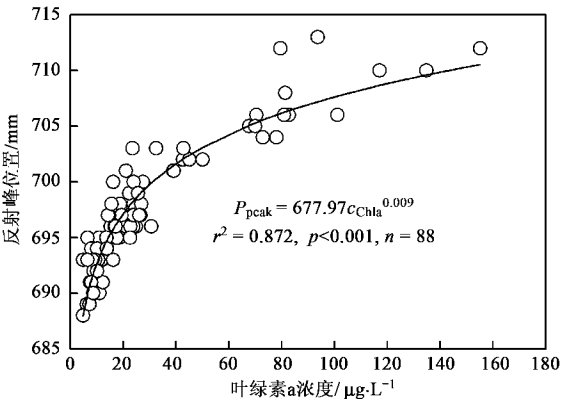


图5 叶绿素a浓度与705 nm附近反射峰位置的关系
Fig.5 Correlation between chlorophyll a concentration and the peak position near 705 nm

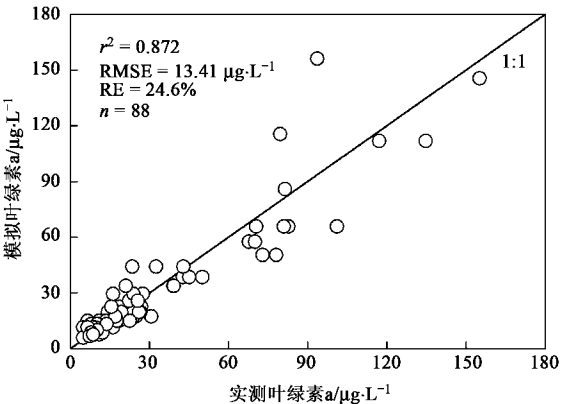


图6 反射峰位置法叶绿素a浓度估算值与实测值的对比
Fig.6 Comparison between measured and estimated the chlorophyll a concentration based on the peak position near 705 nm

2.2.4 一阶微分法

690 nm附近反射率的一阶微分与叶绿素a浓度相关系数最大,常被用于估算叶绿素a浓度.对于不同的水域其取值略有不同,针对太湖地区,本研究分

别计算 600 ~ 850 nm 间的反射率一阶微分值,并分析其与叶绿素 a 浓度的相关系数(图 7).由图 7 可以看出 699 nm 处的一阶微分与叶绿素 a 浓度相关性最大,相关系数(r)为 0.905,呈正相关,因此以 699 nm 处反射率的一阶微分为自变量,实测叶绿素 a 浓度为因变量,进行回归分析,得到叶绿素 a 浓度的估算模型如下:

$$y = 26.291 + 118\,244.7x \tag{8}$$

由此估算模型估算的叶绿素 a 浓度与实测叶绿素 a 浓度间的关系如图 8 所示.

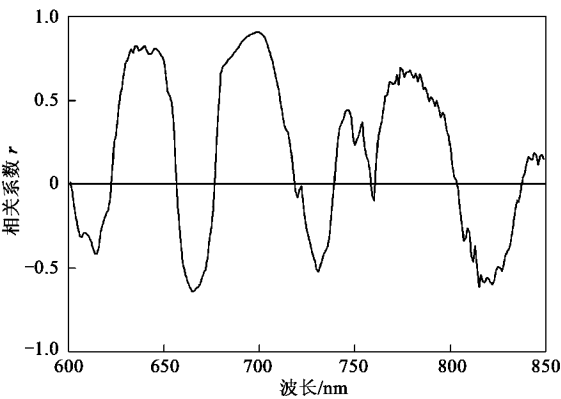


图 7 叶绿素 a 浓度与遥感反射率一阶微分间的相关系数
Fig.7 Correlation coefficient between chlorophyll a concentration and the first derivative differential of remote sensing reflectance

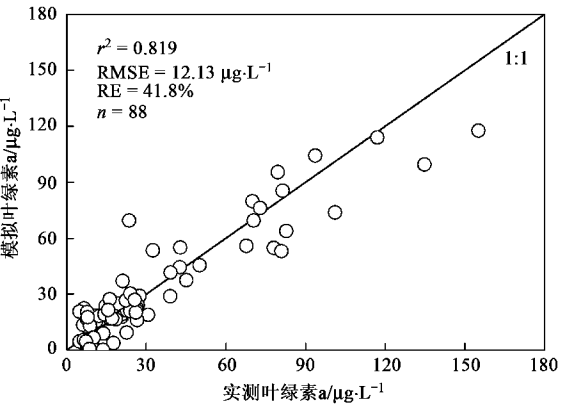


图 8 一阶微分法叶绿素 a 浓度估算值与实测值的对比
Fig.8 Comparison between measured and estimated the chlorophyll a concentration based on first derivative method

3 讨论

以上 4 种方法都能较好地反演出太湖水体的叶绿素 a 浓度(r^2 为 0.813 ~ 0.872, RE 为 24.57% ~ 41.81%), 4 种方法中,反射峰位置法的估算精度最高,主要由于 705 nm 附近反射峰的位置不受地表辐

照度、光谱测量角度等变化的影响,且受悬浮物及 CDOM 的影响也很小.三波段模型和两波段模型要优于传统的一阶微分法,这与段洪涛等^[24]在查干湖得到的反射率比值法要好于一阶微分研究结果类似.主要由于这 2 种方法是基于遥感反射率与其固有光学特性(总吸收系数和后向散射系数)之间的关系建立的概念模型,合理的波段选择,使非色素颗粒物和 CDOM 的影响很小,有利于叶绿素 a 浓度的反演,并且波段之间的比值差值运算,能够消除相同因素的共同影响,有利于消除噪声.

反射峰位置法和传统的一阶微分法在反演叶绿素 a 浓度时虽然都能取得较好的效果,但目前大多数传感器的光谱分辨率较低(波段较少,波段谱宽较大),即使是高光谱传感器的波段谱宽也不能达到 1 nm,无法形成连续光谱精确地反映叶绿素 a 的光谱特征,无法准确地找到反射峰位置和反射率的一阶微分与叶绿素 a 浓度相关性最大点所对应的波段,因此,反射峰位置法和传统的一阶微分法目前并不适合运用在叶绿素 a 浓度遥感影像反演中.

三波段模型和两波段模型设置的波段取值范围位于红外与近红外波段之间,大多数多光谱和高光谱传感器均有相应的波段与之对应,因此这 2 种方法在基于遥感影像的叶绿素 a 浓度反演中具有良好的应用前景. MERIS 是搭载在 ENVISAT-1 上的中等分辨率成像频谱仪,是目前最具优势的水色传感器之一,具有较高时间、高空间、高光谱分辨率以及高灵敏度的优点^[25]. MERIS 传感器在可见光/近红外(412 ~ 900 nm)设置了 15 个波段,其中 7 ~ 11 波段(中心波长/带宽:665/10、681/8、709/10、754/8、761/4 nm)的取值范围位于三波段和两波段模型的波长取值范围内.根据 1 nm 实测遥感反射率模拟 MERIS 数据 7 ~ 11 波段的遥感反射率,对满足条件的波段组合进行挑选, RMSE 最小时对应的三波段模型和两波段模型分别为: $[R^{-1}(665) - R^{-1}(709)] \times R(754)$ 和 $R(709)/R(681)$. 并由此建立基于 MERIS 的三波段和两波段叶绿素 a 浓度估算模型:

$$y = 22.06 + 149.05x \tag{9}$$

$$y = -60.44 + 79.84x \tag{10}$$

式(9)、(10)估算的叶绿素 a 浓度与实测叶绿素 a 浓度之间的关系如图 9、10 所示,估算值与实测值的 r^2 、RMSE、RE 分别为 0.788、13.87 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、37.3%和 0.815、12.96 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、34.8%.由此可见,三波段模型和两波段模型能够很好地运用于基于 MERIS 数据的叶绿素 a 浓度反演中,反演的精度较

高, MERIS 数据在内陆二类水体叶绿素 a 浓度反演、水质监测等方面有着良好的应用前景.

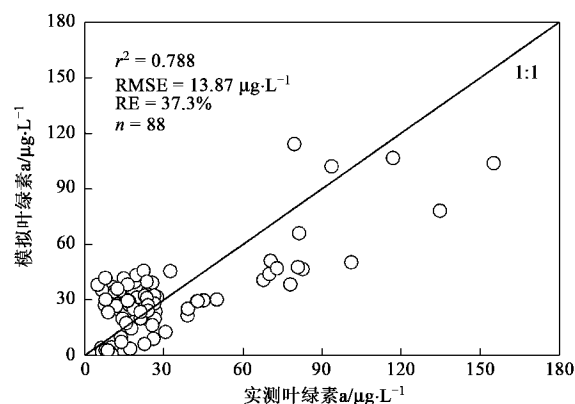


图9 模拟 MERIS 数据三波段模型叶绿素 a 浓度估算值与实测值对比

Fig.9 Comparison between measured and estimated chlorophyll a concentration based on three-band-model using simulated MERIS

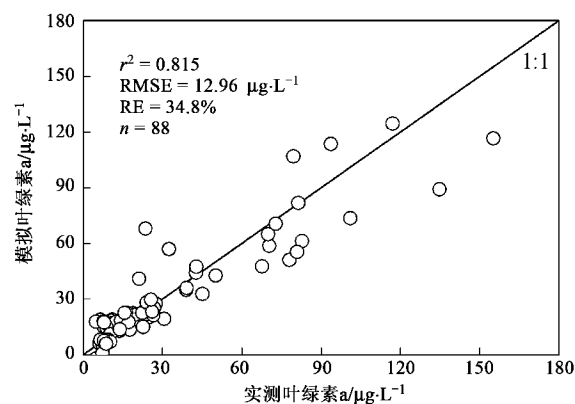


图10 模拟 MERIS 数据两波段模型叶绿素 a 浓度估算值与实测值对比

Fig.10 Comparison between measured and estimated chlorophyll a concentration based on two-band-model using simulated MERIS

4 结论

(1)4 种方法在反演太湖水体的叶绿素 a 浓度时都具有较高的精度; r^2 分别为: 0.813、0.838、0.872、0.819, RMSE 分别为: 13.04、12.12、13.41、12.13 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; RE 分别为: 35.5%、34.9%、24.6%、41.8%.

(2)4 种方法中, 反射峰位置法的估算精度最高, 一阶微分法最低, 由于传感器的光谱分辨率的限制, 两者目前皆不宜运用在基于卫星遥感的叶绿素 a 浓度反演中.

(3)三波段和两波段模型的波段取值范围位于

红外与近红外波段之间, 大多数多光谱和高光谱传感器上均有对应的通道. 基于模拟 MERIS 数据得到叶绿素 a 浓度反演的三波段和两波段模型组合分别为 $[R^{-1}(665) - R^{-1}(709)] \times R(754)$ 和 $R(709)/R(681)$, 由此计算的 r^2 分别为 0.7881 和 0.815, 反演的精度较高, 说明 MERIS 数据能非常好地应用于太湖这类浑浊二类水体叶绿素 a 浓度的精确估算.

致谢: 野外采样得到冯胜、王鑫、赵巧华、张浩等同志的鼎力帮助, 在此一并表示谢意.

参考文献:

- [1] Han L, Rundquist D C. Comparison of NIR/RED ratio and first derivative of reflectance in estimating algal-chlorophyll concentration: A case study in a turbid reservoir[J]. Remote Sens Environ, 1997, 62(3): 253-261.
- [2] Hoogenboom J, Dekker A G, Althuis I J A. Simulation of AVIRIS sensitivity for detecting chlorophyll over coastal and inland waters[J]. Remote Sens Environ, 1998, 65(3): 333-340.
- [3] Frater R N. Hyper spectral remote sensing of turbidity and chlorophyll-a among Nebraska sand Hills lakes[J]. Int J Remote Sensing, 1998, 19(8): 1579-1589.
- [4] Gons H J. Optical teledetection of chlorophyll a in turbid inland waters[J]. Environ Sci Technol, 1999, 33(7): 1127-1132.
- [5] Gons H J, Rijkeboer M, Bagheri S, et al. Optical teledetection of chlorophyll a in estuarine and coastal waters [J]. Environ Sci Technol, 2000, 34(24): 5189-5192.
- [6] Gons H J, Rijkeboer M, Ruddick K G. A chlorophyll-retrieval algorithm for satellite imagery (Medium Resolution Imaging Spectrometer) of inland and coastal waters[J]. J Plankton Res, 2002, 24(9): 947-951.
- [7] Gons H J, Rijkeboer M, Ruddick K G. Effect of a waveband shift on chlorophyll retrieval from MERIS imagery of inland and coastal waters [J]. J Plankton Res, 2005, 27(1): 125-127.
- [8] Chen C Q, Shi P, Larson M, et al. Estimation of chlorophyll-a concentration in the Zhujiang Estuary from SeaWiFS data[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2002, 21(1): 55-65.
- [9] 李素菊, 吴倩, 王学军, 等. 巢湖浮游植物叶绿素含量与反射光谱特征的关系[J]. 湖泊科学, 2002, 14(3): 228-234.
- [10] 疏小舟, 尹球, 匡定波. 内陆水体藻类叶绿素浓度与反射光谱特征的关系[J]. 遥感学报, 2000, 4(1): 41-45.
- [11] 马荣华, 戴锦芳. 应用实测光谱估算太湖梅梁湾附近水体叶绿素浓度[J]. 遥感学报, 2005, 9(1): 78-86.
- [12] 张运林, 秦伯强. 基于水体固有光学特性的太湖浮游植物色素的定量反演[J]. 环境科学, 2006, 27(12): 2439-2444.
- [13] Gitelson A A, Gritz Y, Merzlyak M N. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for nondestructive chlorophyll assessment in higher plant leaves[J]. J Plant Physiol, 2003, 160(3): 271-282.
- [14] Dall'Olmo G, Gitelson A A. Effect of bio-optical parameter variability on the remote estimation of chlorophyll-a concentration in

- turbid productive waters: experimental results[J]. Appl Optics, 2005, **44**(3): 412-422.
- [15] Dall'Olmo G, Gitelson A A. Effect of bio-optical parameter variability and uncertainties in reflectance measurements on the remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters: modeling results[J]. Appl Optics, 2006, **45**(15): 3577-3592.
- [16] Zimba P V, Gitelson A A. Remote estimation of chlorophyll concentration in hyper-eutrophic aquatic systems: Model tuning and accuracy optimization[J]. Aquaculture, 2006, **256**: 272-286.
- [17] Gitelson A A, Schalles J F, Hladik C M. Remote chlorophyll-a retrieval in turbid, productive estuaries: Chesapeake Bay case study [J]. Remote Sens Environ, 2007, **109**(4): 464-472.
- [18] Gitelson A A, Dall'Olmo G, Moses W, *et al.* A simple semi-analytical model for remote estimation of chlorophyll-a in turbid waters: validation[J]. Remote Sens Environ, 2008, doi:10.1016/j.rse.2008.04.015.
- [19] 唐军武, 田国良, 汪小勇, 等. 水体光谱测量与分析 I: 水面上测量法[J]. 遥感学报, 2004, **8**(1): 37-44.
- [20] Zhang Y L, Qin B Q, Zhu G W, *et al.* Effect of sediment resuspension on underwater light field in shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River: a case study in Longgan Lake and Taihu Lake[J]. Sci China Ser D, 2006, **49**(Supp I): 114-125.
- [21] Gitelson A. The peak near 700 nm on radiance spectra of algae and water: relationships of its magnitude and position with chlorophyll concentration[J]. Int J Remote Sensing, 1992, **13**(17): 3367-3373.
- [22] Bennet A, Bogorad L. Complimentary chromic adoption in a filamentous blue-green alga[J]. J Cell Biol, 1973, **58**(2): 419-435.
- [23] Schalles J F, Gitelson A, Yacobi Y Z, *et al.* Chlorophyll estimation using whole seasonal, remotely sensed high spectral resolution data for an eutrophic lake[J]. J Phycol, 1998, **34**(2): 383-390.
- [24] 段洪涛, 张柏, 宋开山, 等. 查干湖叶绿素 a 浓度高光谱定量模型研究[J]. 环境科学, 2006, **27**(3): 503-507.
- [25] 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): 104-109.