

基于水体固有光学特性的太湖浮游植物色素的定量反演

张运林, 秦伯强

(中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

摘要: 基于 2005-05~2005-08 对太湖全湖不同湖区 92 个样点吸收系数、光束衰减系数、后向散射系数等固有光学特性测定与计算, 选择色素浓度反演的最佳波段组合, 利用反射率比建立了太湖叶绿素 a、叶绿素 a 与脱镁叶绿素的定量反演模型。结果表明, 全湖 4 次采样叶绿素 a、脱镁叶绿素的变化范围分别为 $3.9 \sim 149.8 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、均值为 $(38.14 \pm 28.89) \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; $0 \sim 45.8 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、均值为 $(8.49 \pm 7.24) \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 存在很大空间差异, 湖心区和草型湖区的东太湖、胥口湾、贡湖湾色素浓度一般要低于其他湖区。同样吸收系数和后向散射系数也存在很大的空间差异, $a_t(440)$ 的变化范围为 $0.86 \sim 23.25 \text{ m}^{-1}$ 、均值为 $(6.21 \pm 3.31) \text{ m}^{-1}$, $b_t(550)$ 的变化范围 $0.05 \sim 2.25 \text{ m}^{-1}$ 、均值为 $(0.72 \pm 0.52) \text{ m}^{-1}$, 东太湖、胥口湾、贡湖湾的值要低于其他湖区。400~650nm 随波长增加总吸收系数大致呈下降趋势, 680nm 附近存在 1 个峰值, 峰值的强弱与水体中色素浓度有关, 而到 720nm 以后则逐渐增加, 后向散射系数随波长增加则逐渐降低。反射率比 $R(706)/R(682)$ 能较好地用于太湖色素浓度的反演, 叶绿素 a、叶绿素 a 与脱镁叶绿素之和幂函数反演的决定系数 R^2 分别达 0.823、0.864 5。模型能用于包括湖面反射率受湖底和沉水植物影响的全太湖。

关键词: 吸收系数; 后向散射系数; 反射率; 叶绿素 a; 脱镁叶绿素

中图分类号: X122 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2006)12-2439-06

Quantitative Retrieval of Phytoplankton Pigment Based on Water Inherent Optical Properties in Lake Taihu

ZHANG Yun-lin, QIN Bo-qiang

(Nanjing Institute of Geography & Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Total 92 sampling waters were collected from different lake regions in Lake Taihu from May to August in 2005. Absorption coefficients of total particles and chromophoric dissolved organic matter (CDOM), beam attenuation coefficient, scattering coefficients, backscattering coefficients were measured and calculated. Spatial distributions of chlorophyll a, pheophytins concentrations, spectral features of total absorption coefficients and backscattering coefficients were also discussed. Chlorophyll a, pheophytins concentrations were in the range of $3.9 \sim 149.8 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ with a mean value of $(38.14 \pm 28.89) \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; $0 \sim 45.8 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ with a mean value of $(8.49 \pm 7.24) \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively. A significant spatial difference was found for chlorophyll a, pheophytins concentrations with lower values in lake center, and typical macrophyte lake regions such as East Lake Taihu, Xukou Bay and Gonghu Bay. Similar significant spatial difference was found for total absorption coefficients and backscattering coefficients with lower values in typical macrophyte lake regions such as East Lake Taihu, Xukou Bay and Gonghu Bay. $a_t(440)$ and $b_t(550)$ ranged from 0.86 to 23.25 m^{-1} with a mean value of $(6.21 \pm 3.31) \text{ m}^{-1}$, from 0.05 to 2.25 m^{-1} with a mean value of $(0.72 \pm 0.52) \text{ m}^{-1}$. Total absorption coefficients increased from 400 to 650nm with a peak near 680nm and increased from 720 to 750nm due to pure water absorption. Total backscattering coefficients generally decreased from 400 to 750nm. An optimum band combination of reflectance $R(706)/R(682)$ was selected to model chlorophyll a, pheophytins concentrations in Lake Taihu. Determination coefficients retrieving chlorophyll a concentrations, sum of chlorophyll a and pheophytins concentrations were 0.823, 0.864 5 based on reflectance ratio $R(706)/R(682)$, respectively. Retrieval model of phytoplankton pigment can be used to all the lake including macrophyte lake regions with leaving-water reflectance affected by lake sediment and submerged plants.

Key words: absorption coefficient; backscattering coefficient; reflectance; chlorophyll a; pheophytins

遥感技术在水体的应用主要表现为水色、水质遥感。当前发展的水色、水质遥感模型归纳起来不外乎以下 3 类: ①统计或经验模型。通过建立遥感反射率或辐照度比与同步监测的水色、水质参数值之间的统计关系来反演水色、水质参数值。这种方法是目前我国水色、水质遥感使用最多的方法^[1~6]。但

该方法由于缺乏坚实的物理基础, 模式在时间与空

收稿日期: 2005-12-15; 修订日期: 2006-03-15

基金项目: 中国科学院知识创新工程项目(KZCX3-SW-350); 国家自然科学基金项目(40501078, 40501064); 中国科学院南京地理与湖泊研究所所长科研专项基金项目

作者简介: 张运林(1976~), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为水光学、水生态学和水质遥感, E-mail: ylzhang@niglas.ac.cn

间上的通用性和适用性受到很大的限制. ②半分析模型. 借助于对水体主要水色要素的固有光学特性的研究, 建立起水体成分浓度与固有光学量、固有光学量与表观光学量之间定量关系, 这种模型是当前水色、水质遥感发展的主要方向. 在国外水色、水质遥感模型中应用较多^[7~11], 但在国内尤其对于内陆水体研究较少. ③分析模型. 主要是基于水体生物光学模型, 利用水体光学的基本理论和水体光谱计算模式来建模, 以达到建立水中物质浓度与水体光谱特性之间的定量关系, 这种模式可以用于大尺度和长时间的水色和水质监测. 然而, 目前由于对不同水域的水色要素吸收和散射的理论研究和数据测量尚未达到可应用的水平, 因而尚不存在成熟的、真正的分析模型.

太湖是一个典型的大型浅水湖泊, 风浪扰动强烈, 底泥容易发生再悬浮, 水体中悬浮物浓度较高^[12]. 由于受周围城市生活污水和农业面源污染影响, 溶解性物质浓度也非常高^[13], 干扰浮游色素浓度和初级生产遥感. 同时太湖又是一个具有不同生态类型的浅水湖泊, 梅梁湾和东太湖分别为典型藻型和草型湖区, 而在贡湖湾或其他湖区还存在草、藻混合型湖区. 以前在太湖开展的基于表观光学特性的统计或经验模型针对某一湖区能取得较高的精度, 而应用到全湖则存在一些误差^[4, 5]. 本研究基于水体吸收系数、散射系数等固有光学特性和浮游植物色素浓度的测定, 利用生物-光学模型得到全太湖叶绿素 *a*、脱镁叶绿素的定量反演模型, 为进一步建立水色遥感器光谱反射率与水体中水色成分浓度定量关系奠定坚实基础.

1 材料与方法

1.1 采样站点与时间

2005-05~2005-08 中旬在全太湖的 0~32 号点 (无 2 号点) 各采集水样 32 个 (图 1), 2005-06~2005-07 中旬在太湖北部湖区梅梁湾、大太湖、竺山湖、贡湖湾的 0~8 号点 (无 2 号点)、10 号、13 号、14 号、16~18 号点 (图 1) 各采集水样 14 个回实验室分析总悬浮颗粒物、CDOM 吸收系数、光束衰减系数和浮游植物色素浓度.

1.2 吸收系数和光束衰减系数测定

颗粒物的吸收系数 $a_p(\lambda)$ 采用定量滤膜技术 (quantitative filter technique, QFT) 测定, 具体操作与计算参见文献^[12]. CDOM 的光谱吸收系数 $a_g(\lambda)$ 测定采用首先通过 GF/F 玻璃纤维滤膜过滤,

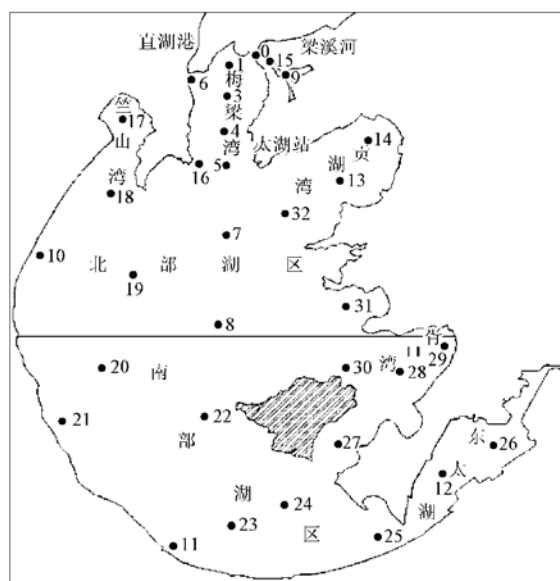


图 1 2005-05~2005-08 采样点示意

Fig. 1 Location of sampling sites from May to August in 2005

然后经 0.22 μ 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^[12].

总吸收系数为悬浮颗粒物、CDOM 和纯水吸收系数的线性加和^[14]:

$$a_t(\lambda) = a_p(\lambda) + a_g(\lambda) + a_w(\lambda) \quad (1)$$

式中, $a_t(\lambda)$ 、 $a_p(\lambda)$ 、 $a_g(\lambda)$ 、 $a_w(\lambda)$ 分别代表总吸收系数、颗粒物、CDOM 和纯水吸收系数.

除纯水之外的光束衰减系数 $c_{rw}(\lambda)$ 是利用分光光度计直接测量原始水样相当于超纯水的光学密度得到的, 即用 4cm 的比色皿在 UV-2401PC 型分光光度计下测定原水样的吸光度, 根据下式计算得到光束衰减系数^[14].

$$c_{rw}(\lambda) = 2.303D(\lambda)/r \quad (2)$$

式中, $c_{rw}(\lambda)$ 为 λ 波长相对于超纯水的光束衰减系数 (m^{-1}); $D(\lambda)$ 为光学密度; r 为光程路径 (m).

光束衰减系数为吸收系数和散射系数的线性加和. 除纯水之外的散射系数 $b_{rw}(\lambda)$ 和总散射系数 $b_t(\lambda)$ 计算如下:

$$b_{rw}(\lambda) = c_{rw}(\lambda) - a_p(\lambda) - a_g(\lambda) \quad (3)$$

$$b_t(\lambda) = b_{rw}(\lambda) + b_w(\lambda) \quad (4)$$

1.3 反演模型

水质遥感中生物-光学模型最基本的理论依据是反射率 $R(0)$ 可以用后向散射和吸收系数来表示^[14]:

$$R(0) = f \frac{b_{bt}}{a_t + b_{bt}} \quad (5)$$

式中, b_{bt} 为总后向散射系数 (m^{-1}), a_t 为总吸收系数 (m^{-1}), f 为系数, 受太阳高度角、天空状况和水面粗糙度等因素影响。为了消除系数 f 对反演精度的影响, 常常利用不同波段反射率的比值与水体水色成分浓度建立定量关系。由此得到下列水色成分定量反演模型:

$$\frac{R(\lambda_1)}{R(\lambda_2)} = \frac{b_{bt}(\lambda_1)}{b_{bt}(\lambda_2)} \cdot \frac{a_t(\lambda_2) + b_{bt}(\lambda_2)}{a_t(\lambda_1) + b_{bt}(\lambda_1)} \quad (6)$$

后向散射系数与散射系数的比值 $\beta = b_{bt}/b_t$ 依赖于颗粒物粒径分布和折射率, 在沿岸带和内陆水体近似等于 0.019^[14]。

1.4 色素浓度测定

叶绿素 a 的测定采用分光光度法, 用 GF/C 滤膜过滤水样, 然后将滤膜置于冰箱中冷冻 48h 以上, 取出用 90% 的热乙醇萃取, 然后在岛津 UV2401 分光光度计上测定 665、750nm 处吸光度, 并加入 1 滴

1% 稀盐酸酸化, 换算得到叶绿素 a 和脱镁叶绿素浓度^[15]。

2 结果与讨论

2.1 色素浓度分布

表 1 给出了 4 次采样叶绿素 a、脱镁叶绿素、叶绿素 a 与脱镁叶绿素和的变化范围、均值及标准差。从表 1 可以发现全湖叶绿素 a 和脱镁叶绿素存在很大的空间差异, 其中 5 月和 8 月全湖采样时这种空间差异更为明显。全湖总体上呈现北部湖区色素浓度要高于南部湖区, 梅梁湾、竺山湾等富营养化水域是色素浓度比较高的湖区, 而湖心区和典型草型湖区东太湖、胥口湾、贡湖湾色素浓度均比较低, 并且在夏季的 8 月份沉水植物生长极为茂盛时, 草型湖区的色素浓度要显著低于其他湖区。季节上, 由于 4 次采样均在春夏季节, 整体上叶绿素 a 浓度均较高, 4 个月考虑相同 14 个采样点数据发现各月之间差异不大, 6 月份最高、8 月份最低。

表 1 4 次采样叶绿素 a、脱镁叶绿素的变化范围、均值¹⁾ / $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$

Table 1 Range, mean value and standard deviation of chlorophyll a, pheophytins concentration / $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$

时间	C Chla		C Pa		C Chla+ Pa		n
	范围	均值	范围	均值	范围	均值	
5 月	3.9~120.0	29.79±23.40	0.8~45.8	9.49±9.33	4.8~134.8	39.28±27.57	32
6 月	7.2~149.8	61.21±40.58	0~23.7	8.16±7.06	11.5~162.4	69.37±45.32	14
7 月	12.2~131.5	54.88±28.42	3.0~20.3	10.19±5.68	17.3~147.5	65.07±31.73	14
8 月	4.6~77.8	29.07±18.67	0~20.7	6.90±5.24	4.6~92.4	35.96±21.57	32
全部	3.9~149.8	38.14±28.89	0~45.8	8.49±7.24	4.6~162.4	46.63±32.33	92

1) c_{Chla} 表示叶绿素 a 浓度, c_{Pa} 表示脱镁叶绿素浓度, $c_{\text{Chla+Pa}}$ 表示叶绿素 a 与脱镁叶绿素浓度之和

2.2 吸收光谱和后向散射光谱特征

吸收系数和后向散射系数是水体固有光学特性, 不随光场条件的改变而改变, 只与水体各组份浓度和比例有关, 因而能在实验室获得, 不需要现场测定。全湖 4 次采样总吸收系数 $a_t(440)$ 的变化范围为 0.86~23.25 m^{-1} , 均值为 (6.21±3.31) m^{-1} ; 总后向散射系数 $b_t(550)$ 的变化范围 0.05~2.25 m^{-1} , 均值为 (0.72±0.52) m^{-1} , 与色素浓度一样存在很大时空差异, 其时空变化除受浮游植物的影响外, 主要还要受到风浪引起沉积物再悬浮的影响, 因而其时空变化更为复杂, 但草型湖区的东太湖、胥口湾和贡湖湾总吸收系数和后向散射系数一般都低于其他湖区。

为探讨吸收系数和后向散射系数的光谱变化, 图 2 给出了典型月份 2005-08 全湖 32 个样点的总

吸收系数和后向散射系数的光谱分布。由图 2 可知, 由于受高浓度的悬浮颗粒物和 CDOM 的影响, 400~650nm 的短波部分总吸收系数大致呈下降趋势, 到 675nm 附近由于浮游植物的特征吸收存在 1 个峰值, 峰值的强弱与水体中色素浓度有关, 而到 720nm 以后则由于纯水的强烈吸收使得总吸收系数逐渐增加。从图 2 还可得知, 8 月份吸收系数能分为明显的 2 组, 1 组是总吸收系数 $a_t(400)$ 小于 4 m^{-1} , 而另 1 组 $a_t(400)$ 则明显要大于 4 m^{-1} 。 $a_t(400)$ 小于 4 m^{-1} 对应的是贡湖湾的 13~14 号点、东太湖和胥口湾的 25~29 号、31 号, 属典型草型湖区。夏季水生植物生长茂盛, 这些水域水体极为清澈, 吸收系数很小, 其他湖区由于受风浪扰动和蓝藻水华暴发的影响吸收系数明显要大于上述草型湖区。从全湖总吸收系数的光谱分布来看, 表现为典型

的二类水体,即蓝紫光短波段吸收系数明显大于绿红光长波段的吸收.总后向散射系数大致随波长增加呈下降趋势,空间上也是草型湖区要明显低于其

他湖区.尽管只给出了 8 月份吸收系数和后向散射系数的光谱分布,但其他各月与 8 月份类似,只是数值大小和空间分布上存在一定差异而已.

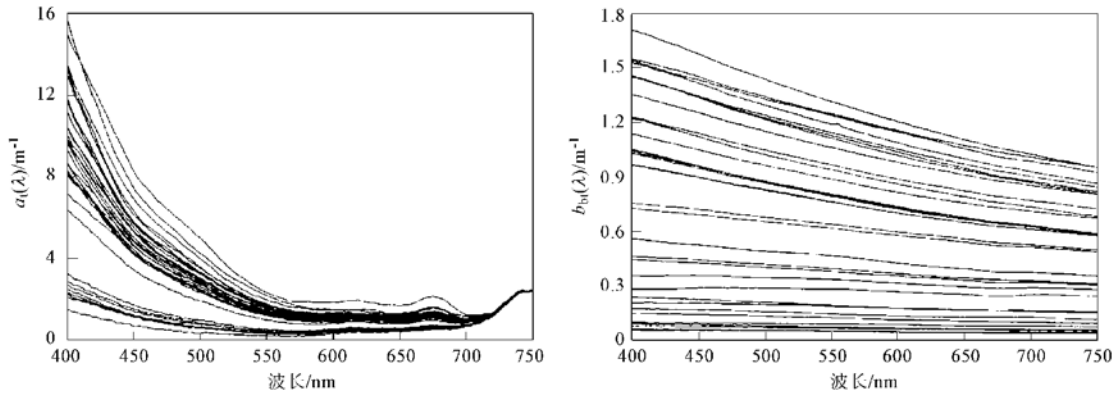


图 2 2005-08 全湖吸收系数和后向散射系数的光谱分布
Fig. 2 Spectral distributions of total absorption coefficients and total backscattering coefficients in August in 2005

2.3 色素浓度反演模型

利用特征波段辐照度比或遥感反射率的比值与水体中色素浓度建立定量关系时,不同研究者选择不同波段组合.如 Gons 选取 704nm 和 672nm 的辐照度比的比值来定量反演浑浊的内陆水体、海湾和沿岸带水体中的叶绿素 a 浓度^[10, 11];马荣华等选取 706nm 和 682nm 的光谱反射率的比值估算太湖梅梁湾附近水域的叶绿素 a 浓度^[4, 5];李素菊等则选取 705nm 和 680nm 的光谱反射率的比值计算巢湖的叶绿素 a 浓度^[1].但在波段组合的选取上都基于一个原则,即选取反射率的峰值和谷值的比值来反演水体中叶绿素 a 浓度.

本研究选取上述不同波段组合并利用线性、指数函数、幂函数拟合反射率比值与水体中叶绿素 a、叶绿素 a 跟脱镁叶绿素 a 总和之间定量关系,结果列于表 2.

从表 2 的拟合结果来看,线性、指数函数、幂函数均能较好地反映叶绿素 a 和脱镁叶绿素浓度随反射率比值的变化趋势.但相比而言,幂函数拟合的效果最好,线性关系其次,指数函数拟合结果最差.并且反射率比值与叶绿素 a、脱镁叶绿素之和拟合的结果要好于单独与叶绿素 a 的拟合结果,说明脱镁叶绿素的变化也会影响水体反射率的变化.而从波段的选取来看, $R(706)/R(682)$ 与色素浓度的拟合效果最好.为此,本研究选取 706nm 和 682nm 的波段组合,并采用幂函数来估算太湖水体的叶绿素 a 和脱镁叶绿素浓度,拟合结果见图 3.图 4 给出了实测的和生物-光学模型估算的叶绿素 a 和脱镁叶绿

素的对比结果,实测值和估算值较好的分布在 1:1 线的两边,说明基于吸收系数和光束衰减系数等固有光学测定的生物-光学模型能较好地用于太湖色素浓度的定量反演.模型误差可能主要来自于后向散射系数,由于缺乏后向散射仪,后向散射系数只能通过散射系数近似得到,可能会影响到反射率比的计算精度.

在一类水体里,由于悬浮颗粒物和 CDOM 浓度

表 2 太湖叶绿素 a 和脱镁叶绿素的反演模型¹⁾
Table 2 Retrieval models of chlorophyll a and pheophytins concentrations in Lake Taihu

	拟合函数	关系式	R^2
R1	线性	$c_{Chla} = 104.65R1 - 85.951$	0.788 8
		$c_{Chla+Pa} = 119.82R1 - 95.453$	0.825 3
	指数函数	$c_{Chla} = 0.939e^{2.886R1}$	0.774 5
		$c_{Chla+Pa} = 1.317e^{2.797R1}$	0.802 8
	幂函数	$c_{Chla} = 16.977R1^{3.526}$	0.811 7
		$c_{Chla+Pa} = 21.672R1^{3.450}$	0.858 2
R2	线性	$c_{Chla} = 112.02R2 - 90.82$	0.815 3
		$c_{Chla+Pa} = 127.52R2 - 100.18$	0.843 2
	指数函数	$c_{Chla} = 0.850e^{2.059R2}$	0.785
		$c_{Chla+Pa} = 1.211e^{2.954R2}$	0.808
	幂函数	$c_{Chla} = 18.489R2^{3.651}$	0.823
		$c_{Chla+Pa} = 23.591R2^{3.562}$	0.864 5
R3	线性	$c_{Chla} = 105.71R3 - 85.488$	0.795 7
		$c_{Chla+Pa} = 120.51R3 - 94.313$	0.825 3
	指数函数	$c_{Chla} = 0.967e^{2.900R3}$	0.773 1
		$c_{Chla+Pa} = 1.355e^{2.812R3}$	0.802 1
	幂函数	$c_{Chla} = 17.941R3^{3.486}$	0.807 7
		$c_{Chla+Pa} = 22.850R3^{3.420}$	0.858 2

1) R1 表示 $R(704)/R(672)$, R2 表示 $R(706)/R(682)$, R3 表示 $R(705)/R(680)$, $n = 92$, $p \leq 0.000 1$

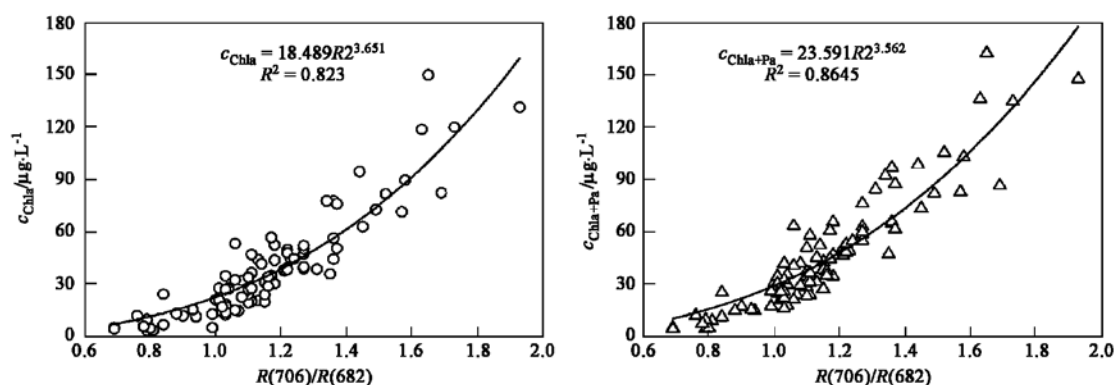


图 3 叶绿素 a 和脱镁叶绿素幂函数拟合结果

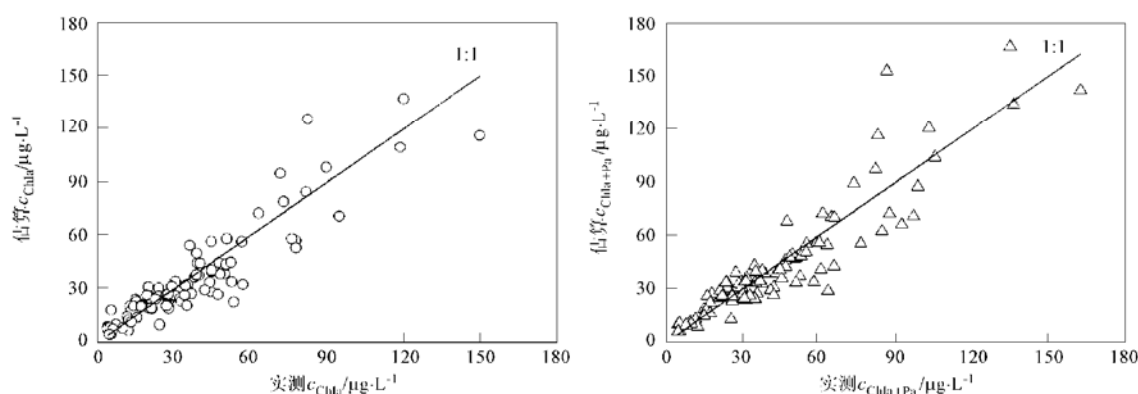
Fig. 3 Power fitting between reflectance ratio $R(706)/R(682)$ and chlorophyll a, pheophytins concentrations

图 4 实测和估算的叶绿素 a 和脱镁叶绿素的对比

Fig. 4 Comparison between measured and estimated chlorophyll a, pheophytins concentrations

非常低, 水体吸收主要由纯水和浮游植物决定, 因而在短波的 440nm 附近浮游植物吸收峰非常明显, 造成在此波段反射率谷值, 常常利用其他波段与 440nm 的反射率的比值来估算水体中叶绿素 a 浓度^[14, 16, 17], 并与水色遥感器 SeaWiFS 在此波段的通道联系起来遥感反演大洋水体中的色素浓度. 但对于太湖这类典型的二类水体, 浮游植物在 440nm 附近的吸收峰被高浓度的悬浮物和 CDOM 所掩盖, 而在红光的 680nm 和近红外的 706nm 由于受悬浮物和 CDOM 的干扰要小得多, 使得在此波段浮游植物造成的反射率峰谷值非常明显, 可以用于内陆水体色素浓度的反演, 尽管不适合 SeaWiFS 遥感器, 但可用于 MERIS 遥感器.

相比于马荣华等利用野外原位实测光谱得到的叶绿素 a 的反演模型^[4], 基于吸收系数和后向散射系数的生物-光学模型与之既有相似之处, 也有不同的地方. 相同的地方就是最佳拟合效果波段组合是一致的, 均为 706nm 和 682nm 反射率的比值, 不同

之处是研究发现线性模型和幂函数模型都能用于色素浓度的反演, 并且幂函数模型拟合效果相对要好于线性模型. 与统计模型相比, 基于吸收系数和后向散射系数的生物-光学模型具有自身的优势和特色. 由于现场遥感反射率和辐照度比的测定受太阳高度角、天空状况、风浪情况、湖底反射等众多因素的影响, 会带来较大误差. 对于处于季风气候和台风影响的太湖这种大型浅水湖泊, 要想选择天气晴好并且风浪很小时进行现场反射率的测定并不容易. 由于太湖是 1 个浅水湖泊, 平均水深只有 1.9m, 而在东太湖、胥口湾、贡湖湾等草型湖区水深更浅^[18]. 在这些湖区尤其是在夏季当沉水植物大量生长时, 湖水有时清澈见底, 沉水植物和湖底反射贡献的反射率往往在实测的光谱反射率中无法分离出来, 导致由此建立的模型往往将这些水域的色素、悬浮物和营养盐浓度高估^[4, 19, 20]. 如马荣华的研究显示在东太湖、胥口湾和贡湖湾叶绿素 a 和悬浮物浓度均为高值所在^[4], 王学军的研究也发现东太湖水域 TP

是全湖最高的^[19],而事实上这些湖区是太湖水质最好,色素、悬浮物和营养盐浓度最低的区域,造成了遥感估测与现实情况的巨大误差.而基于吸收系数和后向散射系数的生物-光学模型既能克服天气状况和风浪对反射率的影响,又能消除湖底和沉水植物反射对水面反射率的影响,一定程度上能提高遥感精度.同时,利用生物-光学模型还可以对统计模型进行校正,最大限度地降低天气状况、风浪和湖底反射造成的误差,并逐步建立起校正后的遥感反射率与水体固有光学特性和光学成分浓度之间的定量关系,提高水质、水色遥感精度.

3 结论

(1) 全湖叶绿素 a、脱镁叶绿素变化范围较大,存在很大的空间差异,北部湖区高于南部湖区,湖心区和草型湖区的东太湖、胥口湾、贡湖湾色素浓度较低.

(2) 太湖吸收系数和后向散射系数空间上存在明显差异,8月份的采样显示东太湖、胥口湾、贡湖湾等草型湖区的吸收系数和后向散射系数明显低于其他湖区.总吸收系数的光谱特征是从 400nm 到 650nm 的短波部分总吸收系数大致呈下降趋势,到 675nm 附近存在 1 个峰值,峰值的强弱与水体中色素浓度有关,而到 720nm 以后则逐渐增加,后向散射系数随波长增加逐渐降低.

(3) 基于吸收系数和后向散射系数测定的 706nm 和 682nm 波长的反射率的比值能较好地用于太湖全湖色素浓度的反演,反射率比值与叶绿素 a、脱镁叶绿素之和拟合的结果要好于单独与叶绿素 a 的拟合结果.色素反演模型为: $c_{Chla} = 18.489R2^{3.651}$, $c_{Chla+Pa} = 23.591R2^{3.562}$.

致谢:野外采样得到朱广伟、龚志军、冯胜、季江、钱荣树等同志的帮助,在此表示感谢.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 刘堂友,匡定波,尹球.湖泊藻类叶绿素 a 和悬浮物浓度的高光谱定量遥感模型研究[J].红外与毫米波学报,2004,23(1):11~15.
- [3] 张运林,黄群芳,马荣华,等.基于反射率的太湖典型湖区溶解性有机碳的反演[J].地球科学进展,2005,20(7):772~777.
- [4] 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[J].湖泊科学,2005,17(2):97~103.
- [5] 马荣华,戴锦芳.应用实测光谱估测太湖梅梁湾附近水体叶绿素浓度[J].遥感学报,2005,9(1):78~86.
- [6] 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.
- [7] Strömbeck N, Pierson D C. The effects of variability in the inherent optical properties on estimations of chlorophyll a by remote sensing in Swedish freshwaters [J]. Sci. Total Environ., 2001, 268: 123~137.
- [8] Carder K L, Chen F R, Cannizzaro J P. Performance of the MODIS semi-analytical ocean color algorithm for chlorophyll a [J]. Adv. Space Res., 2004, 33(7): 1152~1159.
- [9] Harding Jr L W, Magnuson A, Mallonee M E. SeaWiFS retrievals of chlorophyll in Chesapeake Bay and the mid-Atlantic bight [J]. Estuar. Coast. Shelf S., 2005, 62(1): 75~94.
- [10] Gons H J. Optical teledetection of chlorophyll a in turbid inland waters [J]. Environ. Sci. Technol., 1999, 33(7): 1127~1132.
- [11] 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.
- [12] 张运林,秦伯强,朱广伟,等.长江中下游浅水湖泊沉积物再悬浮物对水下光场的影响研究——以龙感湖和太湖为例 [J]. 中国科学 D 辑, 2005, 35(增刊 II): 101~110.
- [13] 张运林,秦伯强,马荣华,等.太湖典型草、藻型湖区有色可溶性有机物的吸收及荧光特性 [J]. 环境科学, 2005, 26(2): 142~147.
- [14] Kirk J T O. Light and photosynthesis in aquatic ecosystem [M]. Cambridge, Britain: Cambridge University Press, 1994. 1~431.
- [15] 黄祥飞.湖泊生态调查观测与分析 [M]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [16] Carder K L, Hawes S K, Baker K A, et al. Reflectance model for quantifying chlorophyll a in the presence of productivity degradation products [J]. J. Geophys. Res., 1991, 96: 20599~20611.
- [17] Garcia C A E, Garcia V M T, McClain C R. Evaluation of SeaWiFS chlorophyll algorithms in the Southwestern Atlantic and Southern Oceans [J]. Remote Sens. Environ., 2005, 95: 125~137.
- [18] 秦伯强,胡维平,陈伟民.太湖水环境演化过程与机理 [M]. 北京: 科学出版社, 2004. 1~2.
- [19] 王学军,马廷.应用遥感技术监测和评价太湖水质状况 [J]. 环境科学, 2000, 21(6): 65~68.
- [20] 雷坤,郑丙辉,王桥.基于中巴地球资源 1 号卫星的太湖表层水体水质遥感 [J]. 环境科学学报, 2004, 24(3): 376~380.