

dent. However, when it continues decomposing and decays, the decayed matter plays a dominant role in absorption of CDOM. Accordingly, the organic suspended matter takes a relative stated proportion in total suspended matter. And the absorption and scatter properties of suspended matter should be taken fully into account when we measure or estimate the total absorption and scatter coefficients of the water-body in East Taihu Lake. Otherwise, great error will be caused.

The wavelength range from 300 to 700nm is divided into two parts, one from 300 to 500nm and the other from 500 to 710nm, and then the different S-values are quantitated, which can improve the estimation of CDOM absorption, proved by their comparative analysis results.

In fact, S-value here is a linear function following with wavelength. So when we use the appropriate linear function to define S-value, the estimation precision of CDOM absorption can be improved farther. To the water-body of East Taihu Lake in Spring, when the wavelength λ is more than 300nm and less than 500nm, $S(\mu\text{m}^{-1}) = -0.0193 \times \lambda + 20.821$. And when the wavelength λ is more than 500 nm and less than 700 nm, $S(\mu\text{m}^{-1}) = -0.0121 \times \lambda + 16.003$.

Keywords: Remote sensing of water colour; CDOM; East Taihu Lake

水色遥感包括正演和反演两个过程,正演就是利用水体的固有光学属性,通过生物光学模型推演包括遥感反射率在内的表观光学量的过程;反演就是利用离水辐亮度或遥感反射率等表观光学量,通过生物光学模型推演水体的固有光学属性以及水体物质组份含量的过程.生物光学模型把水体的固有光学量和表观光学量有机地结合在一起,能够通过独立于遥感影像的野外数据进行校正,降低了对地面实测数据的依赖度,在水色遥感过程中扮演着重要角色,利用生物光学模型反演物质组份含量的方法称为半分析方法,关键是建立适合的生物光学模型,其中涉及的参数具有一定的区域性,需要大量实验数据的支撑、验证和调整.对内陆湖泊等 II 类水体而言,主要包括浮游植物色素即叶绿素 (Chlorophyll, CHL)、悬浮物质 (Suspended Substance, SS) 以及黄色物质 (yellow substance, gilvin, DOC) 等水体组分的吸收与散射参数.太湖属于典型的 II 类水体,固有光学特性受水体三要素即 CHL、SS 以及 DOC 等物质组份的共同影响. CDOM (Coloured Dissolved Organic Matter) 是 DOC 的主要组成部分,光学特性较为单一,主要表现为吸收,是构建生物光学模型的重要因子,影响着水体的遥感反射率;吸收光谱的形状在不同的环境中都具有明显的特征^[1,2],一般符合波长的负指数关系(式 1)^[3]:

$$a_g(\lambda) = a_g(\lambda_0)e^{-S(\lambda-\lambda_0)} \quad (1)$$

式中, $\lambda_0 = 440 \text{ nm}$ ^[3,4], 是指数函数的曲线斜率,称作形态因子.

不同的湖泊、同一湖泊的不同湖区、相同湖区在不同的季节, CDOM 吸收的影响因素可能不同, S 值也不同. 文献^[5,6]对太湖特别是太湖梅梁湾湖区水体的 CDOM 吸收进行了详细研究,梅梁湾是太湖湖水的主要入口之一,悬浮物质含量高,水质处于富营养化水平;而东太湖是太湖湖水的主要出水通道之一,水生植物很多,水体比较清澈,水质处于中营养化水平,梅梁湾水体的物质组成结构不同于东太湖,因此两个湖区的 CDOM 的吸收特性也会不同.

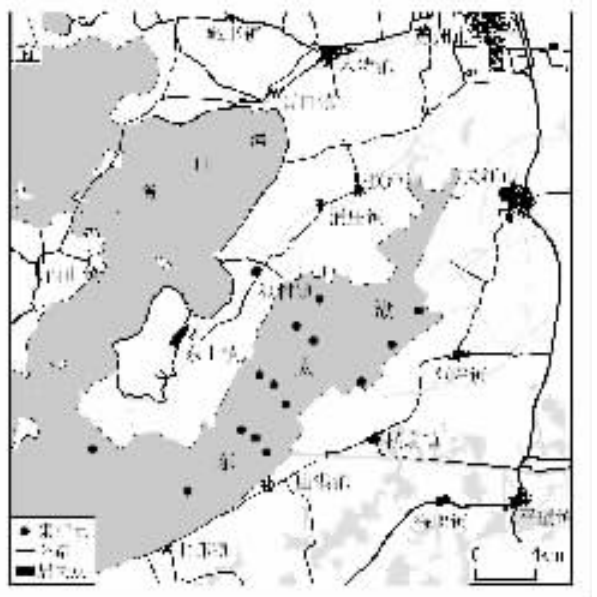


图 1 样点位置

Fig. 1 Location of supervision points

1 实验量测

研究区域主要位于东太湖水域,总长 27.5 km,最大宽度 9.0 km. 2004 年 4 月 4 日 11:00 - 16:00 时通过标准取水器采集 14 个样点的表层水样(图 1),放冷藏箱回实验室进行分析. CDOM 的光谱吸收系数测

定^[5]采用通过 0.45 μm GF/F 过滤的水样先在分光光度计下测定吸光度, 然后根据(2)式进行计算, 最后根据(3)式对计算结果进行散射效应校正, 得到最终结果.

$$a'_g(\lambda)(m^{-1}) = 2.303 \times \frac{D(\lambda)}{r} \tag{2}$$

$$a_g(\lambda)(m^{-1}) = a'_g(\lambda) - a(700) \times \frac{\lambda}{700} \tag{3}$$

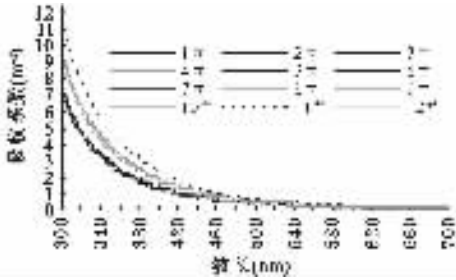


图2 东太湖 14 个样点的实测 CDOM 吸收曲线
Fig.2 Spectral absorption curves of CDOM from 14 sample stations in East Taihu Lake

式中, $a'_g(\lambda)$ 为波长 λ 处未经校正的吸收系数, $a_g(\lambda)$ 为校正后吸收系数, $D(\lambda)$ 为吸光度, r 为光程路径. 用 Whatman GF/F 玻璃纤维滤膜 (直径 25 mm, 孔径 0.45 μm) 通过针管抽滤器进行过滤; DOC 的含量用 1020 型 TOC 仪测定, 叶绿素 a 含量采用分光光度法测定, 即用 0.45 μm 的 Whatman GF/C 滤纸过滤, 90% 热乙醇提取, 然后用 7230 分光光度计检测、计算; 悬浮物含量的测定采用电子天平称重法, 即用灼烧后的 GF/C 滤纸过滤, 烘干, 冷却, 计算.

2 结果分析

所有样点的 CDOM 吸收光谱的形状都十分相似 (图 2), 根据 300 - 440 nm 范围内吸收系数的大小以及随波长变化的关系, 把所有样点分为三组: 第一组包括 1[#]、2[#]、3[#]、5[#]、6[#]、7[#] 和 10[#] 等 7 个样点, 位于东太湖湖水通道 (航道) 以及东太湖湖区; 第二组包括 4[#]、8[#]、9[#]、12[#]、13[#] 和 14[#] 等 6 个样点, 靠近岸边, 附近有围网鱼池, 水底植被很多; 第三组只有 11[#] 点, 离岸距离更近, 且位于大型人工围网鱼池的边上. 所有分组样点之间的 DOC 浓度没有显著差异 (最高 7.965 mg/L, 最低 6.599 mg/L, 图 3). 弄清这种 DOC 浓度相近而 CDOM 吸收相异的原因对 CDOM 吸收波谱的理解以及 S 值的确定等都具有重要作用. 第三组样点只有一个, 不具有足够的代表性, 本文重点考察第 1 组和第 2 组样点.

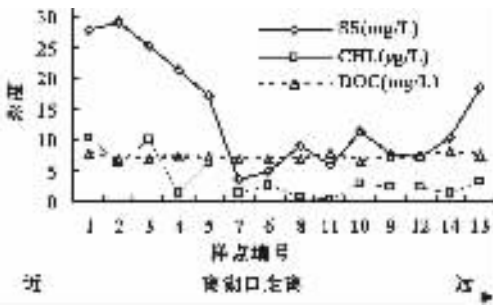


图3 所有样点的水体物质组分含量
Fig.3 Concentrations of SS, CHL and DOC of all the samples

2.1 CDOM 吸收与水体三要素之间的关系

为便于对不同采样点的 CDOM 吸收波谱进行比较, 有效消除因实验仪器等引起的系统误差, 找出影响 CDOM 吸收的物质组分, 分别按照(4)式和(5)式对吸收光谱和三要素含量进行标准化处理, 然后进行相关性分析.

$$a_g^b(\lambda) = \frac{a_g(\lambda)}{a_g(440)} \tag{4}$$

式中, $a_g(440)$ 为 440nm 处 CDOM 的吸收系数, $a_g(\lambda)$ 为任意波长 λ 处的吸收系数, $a_g^b(\lambda)$ 为任意波长 λ 处的标准化吸收系数.

$$\bar{x}_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{S_j} \tag{5}$$

式中, $\bar{x}_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_{ij}$, $S_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_j)^2}{m-1}}$, i 为光谱采样点 (波长) 序号 ($i=1, 2, \dots, m$), j 为采样点序号 ($j=1, 2, \dots, n$), m 为光谱采样点数量, n 为采样点数量.

CDOM 吸收系数与 14 个样点的水体三要素含量数据之间的相关分析表明 (图 4a), 三要素与 CDOM 吸

收系数具有一定程度的相关性,其中 CHL 以及 SS 与 CDOM 吸收系数的相关关系随波长变化的趋势和幅度极其相似,但与 DOC 的关系却表现出刚好相反的变化趋势,可见 CHL 和 SS 一定程度上影响着 CDOM 的吸收,但二者与 DOC 所起的作用相反,在参考波长 440nm 处 CHL 是影响 CDOM 的主要因素(表 1);CHL 与 SS 之间存在很好的相关关系,表明 SS 中有机悬浮颗粒占有一定的比例,这些有机悬浮颗粒大部分来自浮游植物或者由浮游植物引起. 为了进一步揭示不同水质环境中水体三要素与 CDOM 吸收的关系,揭示影响 CDOM 吸收的主导因素,利用前述的标准化处理方法对第一组和第二组样点分别进行相关分析(图 4b、4c). 图 4b 表明:(1)CDOM 吸收与 SS、CHL 以及 DOC 之间的相关关系随波长的变化趋势是一致的,其中 DOC 与 CDOM 吸收系数的相关性最好,说明第一组样点中三要素对 CDOM 的吸收具有相似的作用,但 DOC 的贡献最大;(2)SS 和 CHL 之间高度相关,表 1 也证明了这一点,说明第一组样点水体的悬浮物质大多是浮游植物引起的,有机悬浮物质占的比重可能比较大,(3)DOC 与另外两要素之间的正相关关系表明浮游植物的变化会引起 DOC 的变化,浮游植物的自身降解是 DOC 的一个重要来源. 但第二组样点却表现出了不同的关系特征(图 4c),几乎在整个波长 300 - 700 nm 范围内,CHL 与 CDOM 的吸收系数都高度相关,说明第二组样点中浮游植物的降解对 CDOM 的吸收起着主导作用,而 SS 和 DOC 对 CDOM 的吸收作用不是十分明显,但 DOC 好于 SS,这同时也说明第二组水体中三要素之间相互独立(表 1 的相关结果也可以证明这一点),因此第二组水体的悬浮物质中无机悬浮颗粒占有非常大的比重. 总之,浮游植物的降解对 CDOM 吸收具有重要作用,当其首先降解为有机颗粒再悬浮时,对 CDOM 吸收的贡献不是很明显,继续降解、腐败变质后,便主导着 CDOM 的吸收.

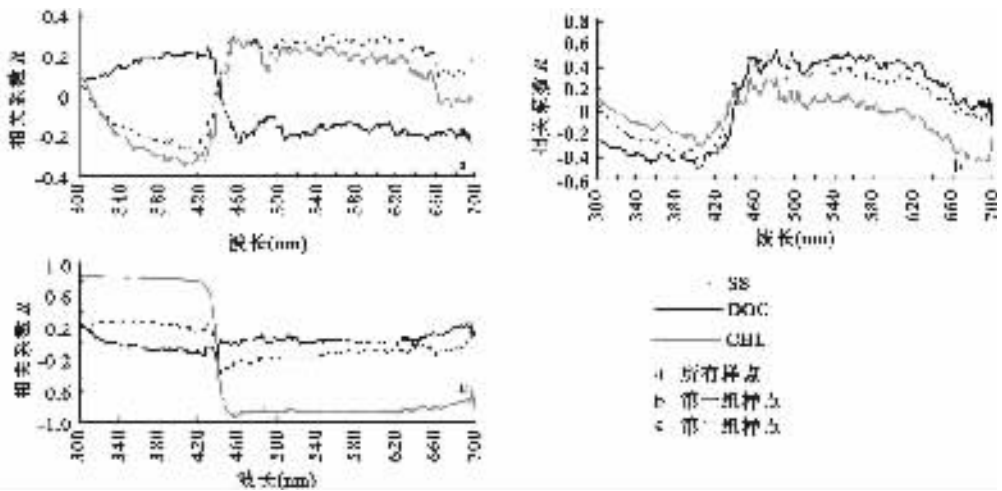


图 4 东太湖 CDOM 吸收与 SS、CHL 以及 DOC 含量之间的相关关系
 Fig.4 Correlations between absorption coefficients of CDOM and concentrations of SS, CHL and DOC from three group samples in East Taihu Lake

表 1 SS、CHL 以及 DOC 之间的相关关系
 Tab.1 The correlations each other between SS, CHL and DOC

	全部采样点			第一组采样点			第二组采样点		
	SS	CHL	DOC	SS	CHL	DOC	SS	CHL	DOC
SS	1			1.00			1.00		
CHL	0.77	1.00		0.88	1.00		0.10	1.00	
DOC	-0.07	-0.11	1.00	0.46	0.59	1.00	-0.19	0.23	1.00
$a_g(440)^*$	-0.34	-0.65	0.49	-0.12	-0.15	0.18	-0.11	-0.87	-0.28

* CDOM 在参考波长 440nm 处的吸收

2.2 确定 S 值

通过 $a_g(\lambda_0)$ 估测 CDOM 吸收系数的关键是 S 值的确定, 一般而言, S 值随水体的不同在 $11 - 18 \mu\text{m}^{-1}$ 之间变化, 通常取 $14 \mu\text{m}^{-1}$ [7], 但在不同的水体环境中差异较大.

2.2.1 假设 S 值相对固定 对(1)式取自然对数, 转换为线性方程, 以 440 nm 为参考波长, 根据最小二乘法, 在 300 - 500 nm、500 - 700 nm 以及整个波段范围 300 - 700 nm 内分别计算各个样点的 S 值(图 5a), 结果表明:(1) 同一样点、不同波段范围内的 S 值的差异较大(图 5a), 最大相差达 $5.0 \mu\text{m}^{-1}$, 300 - 500 nm 范围内 14 个样点中 S 的最大值为 $16.1 \mu\text{m}^{-1}$, 最小值为 $12.6 \mu\text{m}^{-1}$, 平均值为 $13.8 \mu\text{m}^{-1}$, 500 - 700 nm 范围内最大值为 $8.9 \mu\text{m}^{-1}$, 最小值为 $5.5 \mu\text{m}^{-1}$, 平均值为 $6.8 \mu\text{m}^{-1}$, 整个波段 300 - 700 nm 范围内最大值为 $11.8 \mu\text{m}^{-1}$, 最小值为 $8.5 \mu\text{m}^{-1}$, 平均值为 $9.8 \mu\text{m}^{-1}$, 表明不同波段范围的 S 值差异较大, 但相同波段范围内不同分组的样点之间的 S 值差别较小, 说明东太湖湖区的水质环境对 CDOM 吸收光谱的曲线斜率即 S 值的影

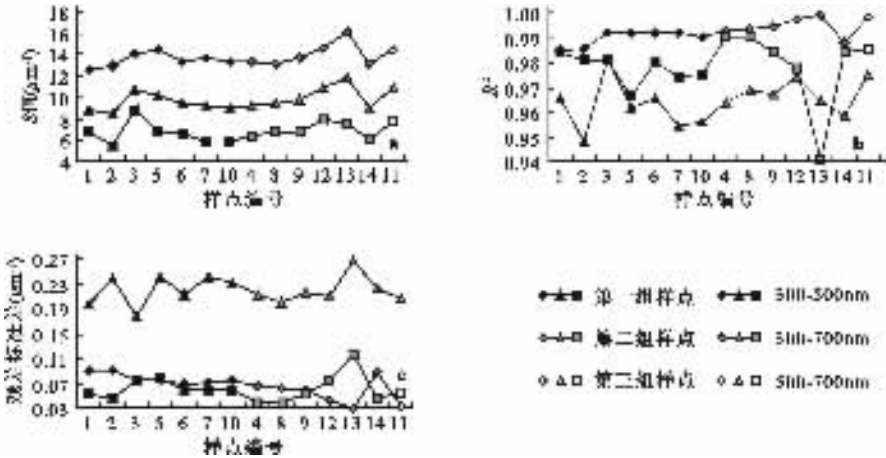


图 5 不同波段范围内的各样点 S 值的确定

Fig. 5 To quantitate S-values of all the samples in different bands

响不大, 影响较大的是波长. (2) 线性拟合度 R^2 都在 0.94 以上(图 5b), 不同波段范围不同分组样点的 S 值都具有较高的可靠性; (3) 残差标准差(residual standard error) 的差别较大(图 5c), 300 - 500 nm 范围内的平均值为 0.0663, 500 - 700 nm 范围内为 0.0609, 300 - 700 nm 范围内为 0.2190, 但相同波段范围内不同分组之间差异不大, 表明通过分波段获取的 S 值具有较低误差. 因此以 500 nm 为分界点, 把 300 - 700 nm 的

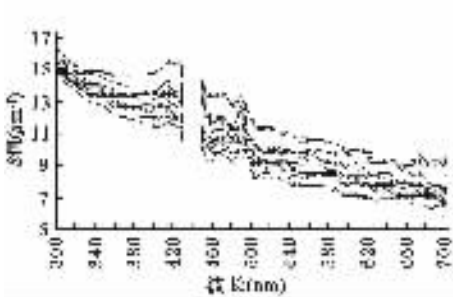


图 6 S 值随波长的变化

在参考波长 440 nm 附近, 根据式(6)计算的 S 值出现异常, 因此剔除该波段附近处的 S 值

Fig. 6 Change of S-values of all the samples with wavelength

波段范围分为两个部分即 300 - 500 nm 和 500 - 700 nm, 分别定义 CDOM 吸收光谱的曲线斜率即 S 值, 可以提高其精度. 认为 S 值相对固定的情况下, 上述两个波段范围内的 S 值分别为 $(13.80 \pm 0.88) \mu\text{m}^{-1}$ 以及 $(6.84 \pm 0.93) \mu\text{m}^{-1}$.

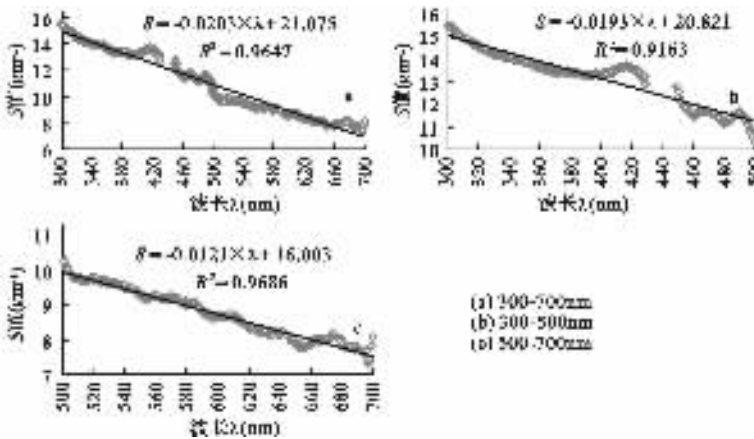
2.2.2 S 值随波长线性变化 实际上, 每一样点不同波长处的 S 值在整个波段 300 - 700 nm 范围内随波长几乎呈线性衰减(图 6); 但在小于 500 nm 的波段范围内, 衰减速度大于其它波段范围内(即大于 500 nm 的波段范围)的衰减速度, 寻找这种衰减规律即 S 值的变化规律将进一步减小 S 值的计算误差, 进而提高 CDOM 吸收光谱的估测精度. 对所有 14 个样点不同波长处的 S 值分别取平均, 并在 300 - 700 nm、300 - 500 nm 以及 500 - 700 nm 范围内进行线性回归拟合(图 7), 结果表明在上述三个波段范围内, S 值和波长之间具有十分显著的线性关系(R^2 均大于 0.9). 在整个波段 300 - 700 nm 范围内 S 值可以使用(6)式来计算, 平均相

对误差为 3.45% ;但以 500 nm 为分界点,在 300 - 500 nm 以及 500 - 700 nm 范围内使用(7)式来计算, S 值的相对误差分别只有 2.06% 和 1.15% ;可见分段确定 S 值可以提高其精度.

$$S(\mu\text{m}^{-1}) = -0.0203 \times \lambda + 21.075, R^2 = 0.9647, N = 384, 300 \leq \lambda \leq 700 \text{ nm} \quad (6)$$

$$\begin{cases} S(\mu\text{m}^{-1}) = -0.0193 \times \lambda + 20.821, R^2 = 0.9163, N = 183, 300 \leq \lambda \leq 500 \text{ nm} \\ S(\mu\text{m}^{-1}) = -0.0121 \times \lambda + 16.003, R^2 = 0.9686, N = 201, 500 \leq \lambda \leq 700 \text{ nm} \end{cases} \quad (7)$$

2.2.3 精度分析 分别把 2.2.1(以下称方法一)和 2.2.2(以下称方法二)中所得的 S 值代入(1)式,式中 $a_g(\lambda_0)$ 使用 440nm 处的实测值,模拟 14 个样点的 CDOM 吸收光谱(图 8).



(a) 300 - 700nm (b) 300 - 500nm (c) 500 - 700nm

图 7 不同波段范围内的 S 值

Fig. 7 To estimate S-value of different band ranges with linear fit

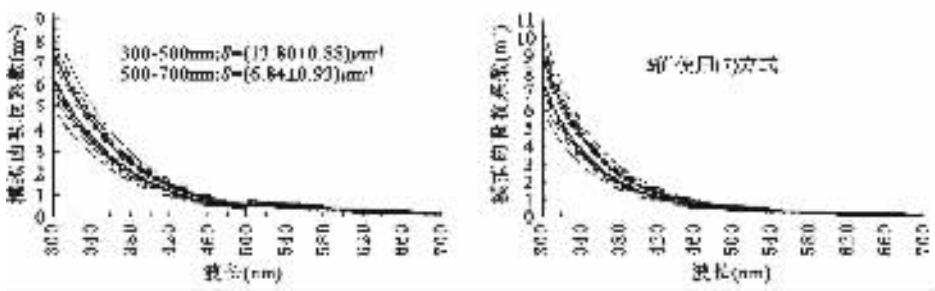


图 8 不同 S 值模拟的 CDOM 吸收光谱

Fig. 8 The modeled spectra of CDOM with different S-value

结果表明使用方法一模拟的 CDOM 吸收光谱在 500nm 附近出现波动,而使用方法二模拟的 CDOM 吸收光谱则较为光滑,连续性较好.二者的相对误差分析表明(图 9),除 1 号点和 2 号点外,其余 12 个点的模拟 CDOM 吸收光谱中,方法二的相对误差总是低于方法一,方法二的 14 个点的平均相对误差为 9.98%,而方法一的为 19.69%.因此,假定 S 值相对固定,给 S 值一个相对稳定的值将给 CDOM 吸收光谱的估测带来较大的误差;而认为 S 值随波长线性衰减,在 CDOM 吸收光谱的估测中引入 S 值随波长变化的函数将大幅提高其估测精度.除 S 值外,在 CDOM 吸收光谱的估测中,还需要获取参考波长 440nm 处的吸收系数;东太湖春季水体中,浮游植物的降解是 CDOM 吸收光谱的重要影响因素,可以使用叶绿素 a 的浓度 (C_{chl}) 来估测 $a_g(440)$ 的值,如式(8).

$$a_g(440) (\text{m}^{-1}) = 307.36 \times e^{-4.9816C_{chl}}, R^2 = 0.6714, N = 14 \quad (8)$$

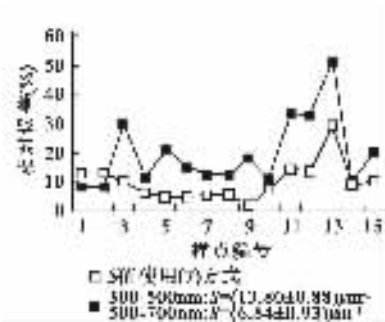


图9 不同S值模拟CDOM吸收光谱的相对误差对比

Fig.9 Comparison of error between the measured and modeled spectra of CDOM with different S-value

3 结论

(1) 不同的湖泊、同一湖泊在不同的湖区、同一湖区在不同的季节, CDOM 吸收光谱的影响因素可能不同; 对东太湖春季水体而言, 浮游植物的降解对 CDOM 吸收具有重要甚至具有主导作用; 水体中有机悬浮颗粒占有一定的比例, 在测试或计算东太湖总的吸收或散射系数时, 必须充分考虑有机悬浮颗粒的吸收与散射特性, 否则会带来较大的误差。

(2) 以 500 nm 为分界点, 把 300 - 700 nm 的波段范围分为两个部分即 300 - 500 nm 和 500 - 700 nm, 分别定义 CDOM 吸收光谱的曲线斜率即 S 值, 可以提高 CDOM 吸收光谱的估测精度; 把 S 值定义为随波长线性变化的函数, 可以进一步提高 CDOM 吸收光谱的估测精度; 对东太湖春季水体而言, 当 $300 \leq \lambda < 500 \text{ nm}$ 时, $S(\mu\text{m}^{-1}) = -0.0193 \times \lambda + 20.821$, 当 $500 \leq \lambda \leq 700 \text{ nm}$ 时, $S(\mu\text{m}^{-1}) = -0.0121 \times \lambda + 16.003$ 。

致谢 南京大学国际地球系统科学研究所田庆久教授给予大力支持和帮助, 中国科学院南京地理与湖泊研究所范成新研究员在数据分析方面给予指导, 季江高级工程师、张旻博士帮助采集水样, 谨此致谢。

4 参考文献

- [1] Prieur L Sathyendranath S. An optical classification of coastal and oceanic waters based on the specific spectral absorption curves of phytoplankton pigments, dissolved organic matter, and other particulate materials. *Limnol & Oceanogr*, 1981, **26**: 671 - 689.
- [2] Carder K L, Steward R G, Harvey G R, et al. Marine humic and fulvic acids; their effects on remote sensing of ocean chlorophyll. *Limnol & Oceanogr*, 1989, **34**: 68 - 81.
- [3] Bricaud A, Morel A, Prieur L. Absorption by dissolved organic matter in the sea (yellow substance) in the UV and visible domain. *Limnol & Oceanogr*, 1981, **26**: 43 - 53.
- [4] Nelson J R, Guarda, S. Particulate and dissolved absorption on the continental shelf of the southeastern United States. *Journal of Geophysics Research*, 1995, **100**: 8715 - 8732.
- [5] 张运林, 吴生才, 秦伯强等. 太湖梅梁湾有色可溶性有机物对光的吸收. *中国环境科学*, 2004, **24**(4): 405 - 413.
- [6] 俞宏, 蔡启铭. 太湖水体的光学特性及其参数化方案. 见: 蔡启铭主编. 太湖环境生态研究(一). 北京: 气象出版社, 1998: 63 - 73.
- [7] 唐军武, 田国良. 水色光谱分析与多成分反演算法. *遥感学报*, 1997, **1**(4): 252 - 256.