J. Lake Sci.(湖泊科学),2010,**22**(3):383-390
http://www.jlakes.org. E-mail:jlakes@niglas.ac.cn
© 2010 by *Journal of Lake Sciences*

有色溶解有机物吸收光谱模型对比*

姜广甲[1,2],刘殿伟[1**],宋开山[1],王宗明[1],张　柏[1]
(1:中国科学院东北地理与农业生态研究所,长春 130012)
(2:中国科学院研究生院,北京 100049)

摘　要: 利用6种统计模型对吉林省石头口门水库、松花湖CDOM吸收光谱曲线(350-650nm)进行拟合,从统计 F 值大小和归一化残差两个角度均证明双曲线模型效果最好;采用15个波段范围拟合CDOM吸收均值光谱斜率 S,单指数模型 S 值变化幅度较大,平均变异系数为12.41%;而双曲线模型 S 值相对稳定,变异系数为5.85%.将双曲线模型应用于生物光学模型,研究表明双曲线模型可以反映CDOM时空变化规律和物质组成;且双曲线模型拟合光谱斜率 S 值与CDOM特征波长吸收具有很好的负相关关系,呈幂指数递减,决定系数达0.8137.
关键词: CDOM;双曲线模型;光谱斜率;石头口门水库;松花湖

Comparison of spectral models for absorption coefficient of colored dissolved organic matter

JIANG Guangjia[1,2], LIU Dianwei[1], SONG Kaishan[1], WANG Zongming[1] & ZHANG Bai[1]
(1:*The Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology*, *Chinese Academy of Sciences*, *Changchun* 130012, *P. R. China*)
(2:*Graduate School of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049, *P. R. China*)

Abstract: Six statistics models are presented based on the four cruises (2 cruises in Shitoukoumen Reservoir in June, September, and 2 cruises in Lake Songhua in July, September). The dataset including 94 sampling sites was used to fit the spectral slope of colored dissolved organic matter (CDOM) absorption over the range of 350-650nm. The result shows that the Hyperbola Model (HM) is the best fitting model with the best F value and normalized residuals. The spectral slope S is calculated over different ranges of wavelength. The S values for Single Exponential Model (SEM) change markedly while steadily for the HM by ways of comparing the variation coefficients. The variation coefficients are 12.41% and 5.85% for SEM and HM, respectively. So HM is better to fit the spectra curves of CDOM absorption than SEM. HM is applied to the CDOM bio-optical model in the form of $a_g(\lambda) = a_g(440)(\lambda/440)^S$, and it proves that HM can response to the changes in temporal and spatial variation and the source of CDOM. There is a steady inverse relationship between S and absorption of CDOM at 440nm for HM. Four fitting methods are analyzed, such as liner, exponent, logarithm and power index. It is obvious that the power index is the best with a determination coefficient of 0.8137.
Keywords: CDOM; Hyperbola Model; spectral slope; Shitoukoumen Reservoir; Lake Songhua

有色溶解有机物(CDOM)对蓝光具有强烈的吸收作用[1],从而决定着水体颜色变化[2].CDOM对光的衰减作用主要表现为吸收,精确模拟CDOM的吸收光谱的必要前提是充分了解CDOM的吸收特性[3].

在350-650nm波长范围内CDOM吸收光谱呈指数递减,可以用指数模型来模拟[4].

$$a_{CDOM}(\lambda) = a_{CDOM}(\lambda_0)\exp[S(\lambda_0-\lambda)] \tag{1}$$

* 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-340, KZCX2-YW-341)和吉林省科技发展计划重点项目(20080425)联合资助.2009-07-13收稿;2009-11-11收修改稿.姜广甲,男,1984年生,硕士研究生;E-mail:jgj030106@yahoo.com.cn.
** 通讯作者;E-mail:liudianwei@neigae.ac.cn.

式中,$a_{CDOM}(\lambda)$是 CDOM 在波长λ处的吸收系数(m^{-1});λ_0是参照波长(nm),一般取 440nm;S 是指数函数曲线斜率参数(m^{-1}),通常用于指示 CDOM 组成变化[5]. 该模型常用来指示水体中 CDOM 含量多少,大量国内外文献[6-10]利用该模型进行 CDOM 时空变化分析以及判断 CDOM 可能来源. Markager 等[11]、Stedmon 等[7]加入背景值对该模型进行了改进,说明该模型并不是拟合 CDOM 吸收光谱最好的模型,因此,建立一种更为精确的 CDOM 生物光学模型对于理解和分析 CDOM 的物质组成和光谱特征具有重要意义. 同时,国内外学者在 CDOM 吸收光谱斜率 S 确定方面也做了大量研究. 海洋[1]、沿海[6]以及湖泊[8]等不同水体、非线性[7]和线性[9]的不同方法、不同拟合波段范围[4,10]得到的 S 值均有不同,因此并不能用同一个均值(如 14.0μm^{-1})去拟合所有样点的 CDOM 吸收光谱曲线. Twardowski 等[3]利用 9 个波长(412,440,448,532,555,630,650,676 和 715nm)处 CDOM 吸收系数对比分析了单指数模型、改进单指数模型和双曲线模型等 6 种统计模型,研究表明双曲线模型拟合 CDOM 吸收光谱效果最好. 本文旨在利用实测 II 类水体高光谱数据比较分析 6 种统计模型,从而确定哪一种模型能够更有效模拟 CDOM 吸收光谱;分析该模型光谱斜率 S 值变化规律,探讨模型稳定性;并试图将模型应用于生物光学模型,这对于提高 CDOM 遥感反演精度有重要意义.

表 1 四次实验采样点信息

Tab. 1 Information of four experiments

采样地点	简称	采样日期	采样个数
石头口门水库	STKM-06	2008 年 6 月 13 日	20
石头口门水库	STKM-09	2008 年 9 月 23 日	20
松花湖	SHH-07	2008 年 7 月 25 日	26
松花湖	SHH-09	2008 年 9 月 24 日	28

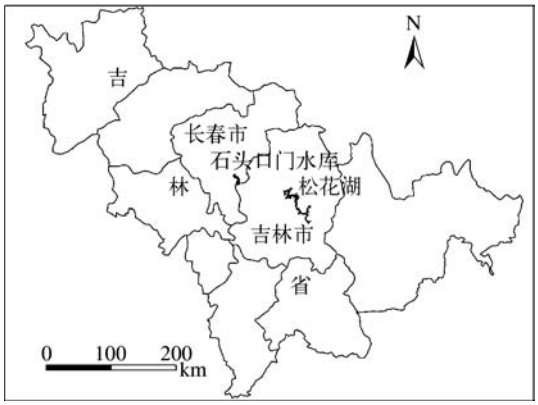

图 1 研究区位置

Fig. 1 Location of study area

1 材料与方法

1.1 样品采集与处理

对吉林省长春市石头口门水库和吉林市松花湖共进行四次光谱测量(表 1),并同步采集表层水样和 GPS 定位,采样区域如图 1 所示. 所有样品采集后,立即放入有冰块的苯板保温箱运回实验室,采用 NASA 规范[12]测量水体固有光学特性.

1.2 实验方法

实验室内用 10% 盐酸浸泡好的 Whatman 聚碳酸酯滤纸(直径 25mm,孔径 0.2μm)通过针管过滤器过滤水样,然后以 Milli-Q 水为参比,用 UV-2401 分光光度计在 200 - 800nm (1nm 间隔)波长范围内测定滤液吸光度,再根据式(2)计算得到 CDOM 的吸收系数[4].

$$a_{CDOM}(\lambda)' = 2.303D(\lambda)/l \qquad (2)$$

式中,λ为波长(nm),$a_{CDOM}(\lambda)'$为未校正的吸收系数(m^{-1}),$D(\lambda)$ 为吸光度,l 为光程路径(m).

由于滤液中可能残留细小颗粒物和胶状物,可能会引起散射,因此利用式(3)进行散射效应校正[4,13]:

$$a_{CDOM}(\lambda) = a_{CDOM}(\lambda)' - a_{CDOM}(\lambda) \times \lambda/700 \qquad (3)$$

式中,$a_{CDOM}(\lambda)$为校正后波长λ的吸收系数(m^{-1}),下文用 $a_g(\lambda)$表示.

1.3 模型及模型优劣评价方法

CDOM 吸收光谱曲线随波长增大而递减,我们可以不考虑 CDOM 本身光学特性,而直接采用经验统计模型来模拟其吸收光谱. Twardowski 等[3]采用以下 6 种经验统计模型拟合 9 个波长处的 CDOM 吸收系数(表 2),本文则采用同样的模型拟合 350 - 650nm 波段范围内 CDOM 吸收光谱曲线.

利用两个参数来判断 6 个模型的优劣:(1) 方差分析中 F 值的大小[14];(2) 模拟值与实测值之间残差大小.

F 值计算公式如下：

$$F = \frac{R^2/D_m}{(1-R^2)/D_e} \tag{4}$$

式中，R^2 是最小二乘法拟合得到的相关系数；D_m 是模型自由度；D_e 是拟合模型所采用的变量的自由度. 如果模型参数个数为 p，拟合模型所采用的波长个数为 n，则 $D_m = p-1$，$D_e = n-p$.

虽然模拟值与实测值之间的相关系数 R^2 可以作为模型拟合优劣的标志，但 F 值考虑了模型参数个数以及决定系数 R^2，其大小更好的反映出模型拟合的优劣程度. 一个好的模型应该有尽量少的参数个数，且具有较好的相关系数[3].

表 2 6 种经验统计模型模拟 CDOM 吸收光谱曲线

Tab. 2 Six statistics models for modeling spectrum curves of CDOM absorption

模型名称	表达式	参数
单指数模型(SEM)1)	$y = A\exp(-S_e\lambda)$	A, S_e
单指数变换模型(SEM-W)	$y = A\exp(-S_w/\lambda)$	A, S_w
双曲线模型(HM)	$y = A(\lambda/440)^{-S_h}$	A, S_h
单指数模型加背景值(SEM-O)	$y = A\exp(-S_o\lambda) + O$	A, O, S_o
双指数模型、一斜率固定(DEM-F)	$y = A_1\exp(-S_1\lambda) + A_2\exp(-0.010\lambda)$	A_1, A_2, S_1
双指数模型(DEM)	$y = A_1\exp(-S_1\lambda) + A_2\exp(-S_2\lambda)$	A_1, A_2, S_1, S_2

1) 即为指数模型(式(1))的统计形式.

1.4 模型拟合和数据统计分析方法

各模型所需参数均采用 MATLAB 中非线性最小二乘拟合函数 fminsearch 拟合得到. 给各参数一个初始值后，根据给定波长范围，搜寻确定参数的最优值. 数据统计分析均在 Origin 8.0 中进行，利用统计模块中的假设检验方法来计算各实验中描述性统计以及 t-test 双尾检验.

2 结果与分析

2.1 CDOM 吸收特性分析

四次实验 CDOM 的吸收光谱曲线(图 2)表明，不同时间、不同水域的光谱特征各不相同，但都随波长增加呈递减趋势. 对于 SHH-09 第 17、18 两个样点，可能由于滤液中残留细小颗粒物散射效应在 500nm 附近有凸起，但并不影响本文的分析和结论. CDOM 浓度不易测得，通常选用 CDOM 特征波长吸收系数来表征其浓度大小，一般选取具有典型意义的 355nm、375nm 和 440nm 等处[8,15]. 本文取 375nm 为 CDOM 吸收特征波长. 对同一湖区不同月份来说，石头口门水库 6 月份不同采样点吸收系数变化相差最大，在 1.77 - 12.87 m^{-1} 之间变化，$a_g(375)$ 均值为 4.54 ± 3.82 m^{-1}；而 9 月份 $a_g(375)$ 均值为 4.376 ± 1.390 m^{-1}，最大值为 7.376 m^{-1}，最小值为 2.437 m^{-1}. 这说明石头口门水库 CDOM 空间差异显著，且经 t-test 双尾检验，在 $\alpha = 0.05$ 的水平上，STKM-06 和 STKM-09 两次实验差异不显著，说明两次实验 CDOM 含量变化不大. 松花湖 7 月份和 9 月份除个别点外，CDOM 均具有相似吸收光谱，且空间差异不明显. 7 月份 $a_g(375)$ 变化范围为 3.723 - 7.751 m^{-1}，均值 4.719 ± 0.882 m^{-1}；9 月份均值为 3.657 ± 0.270 m^{-1}，最大值为 4.415 m^{-1}，最小值为 3.267 m^{-1}. 通过 t-test 双尾检验，在 $\alpha = 0.05$ 的水平上，SHH-07 与 SHH-09 两次实验 $a_g(375)$ 差异显著，说明松花湖 CDOM 含量时间上差异较大. 对不同湖区同一月份来说，石头口门水库 9 月份 $a_g(375)$ 均值高于松花湖，且方差比较大，说明石头口门水库 CDOM 含量空间差异大于松花湖.

四次实验 CDOM 吸收系数均值见图 3，虚线代表 375nm 处 CDOM 吸收系数. 总体上说，石头口门水库和松花湖 CDOM 吸收系数均值基本相似，但前者略大于后者. 四次实验 CDOM 吸收系数均值不同波长范围拟合的 S 值见图 4.

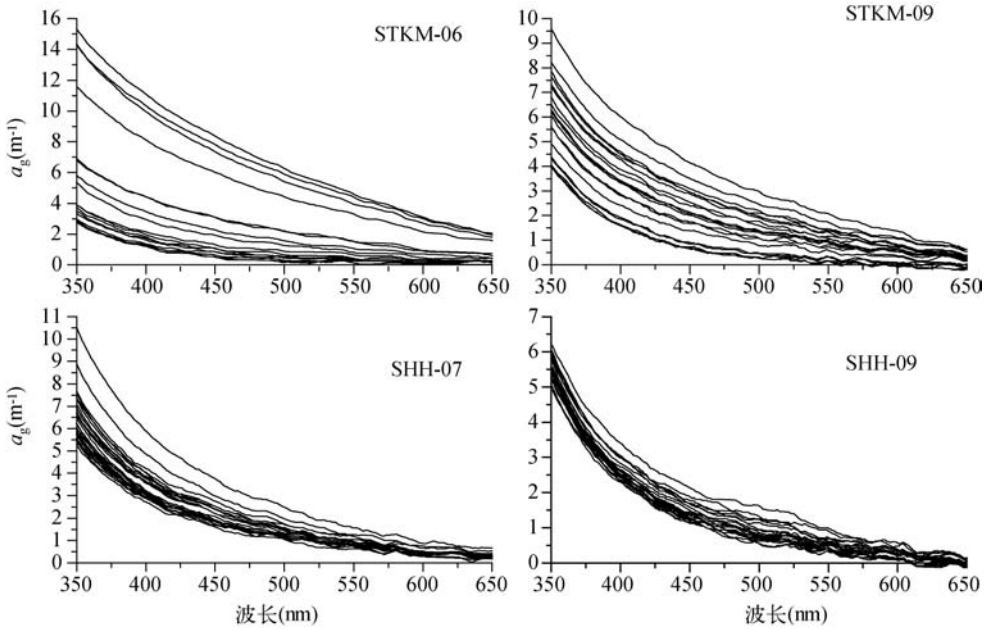

图 2 四次实验 CDOM 的吸收光谱曲线

Fig. 2 Spectrum curves of CDOM absorption in four experiments

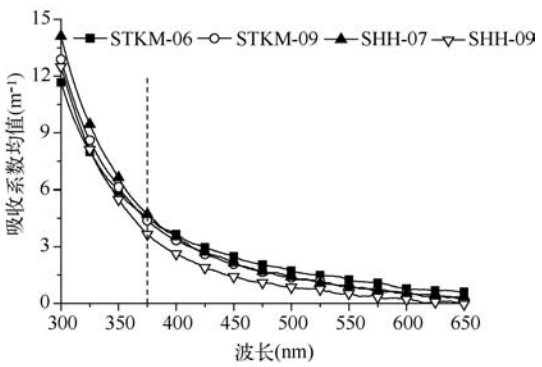

图 3 四次实验 CDOM 吸收系数均值

Fig. 3 Average CDOM absorption coefficients

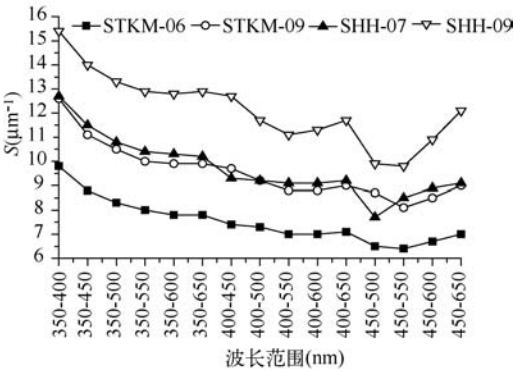

图 4 四次实验 CDOM 吸收系数均值不同波长范围拟合的 S 值

Fig. 4 Resulting slopes of average CDOM absorption coefficient calculated over different wave ranges in four experiments

2.2 6 种统计模型模拟 CDOM 吸收光谱

6 种统计模型在 350 - 650nm 波段范围内分别对 CDOM 吸收光谱进拟合,并根据式(4) 计算各模型的 F 值,同时计算 F 值的均值(表 3). 不同实验中各模型进行比较,除 STKM-06 中单指数模型(SEM) F 均值高于双曲线模型(HM)外,其余各次实验 HM 模型最大,其次 SEM 模型,DEM 模型最小(表 3). 这说明双曲线模型在统计上拟合效果最好,这与 Twardowski 等[3]、刘明亮等[16]研究结果一致.

6 种模型模拟值与实测值之间的残差归一化结果(图 5)表明,除 SEM-W 模型在 350 - 500nm 范围内残差值与其他 5 种模型有相反趋势外,各模型残差分布形式较一致,且 HM 模型四次实验的残差变化相对稳

定，在较小范围内波动，这说明 HM 模型在拟合 CDOM 吸收光谱时效果最佳.

比较不同实验 6 种模型的模拟值与实测值残差发现，SHH-07 次实验变化最为强烈，其次是 STKM-06，STKM-09 和 SHH-09 两次实验的变化基本一致，并且变化范围较小.

表 3 四次实验 6 种统计模型拟合得到的 F 值均值

Tab. 3 Mean of F-values calculated by six statistics models in four experiments

实验	模型					
	SEM	SEM-W	HM	SEM-O	DEM-F	DEM
STKM-06	64282.786	31450.572	52178.807	48576.989	39443.350	23797.328
STKM-09	64077.995	35528.483	86658.362	38863.285	38070.770	21778.427
SHH-07	57420.540	51687.197	127366.557	42447.705	13963.205	20747.339
SHH-09	53114.518	34967.186	67575.730	28801.329	36905.293	17704.074

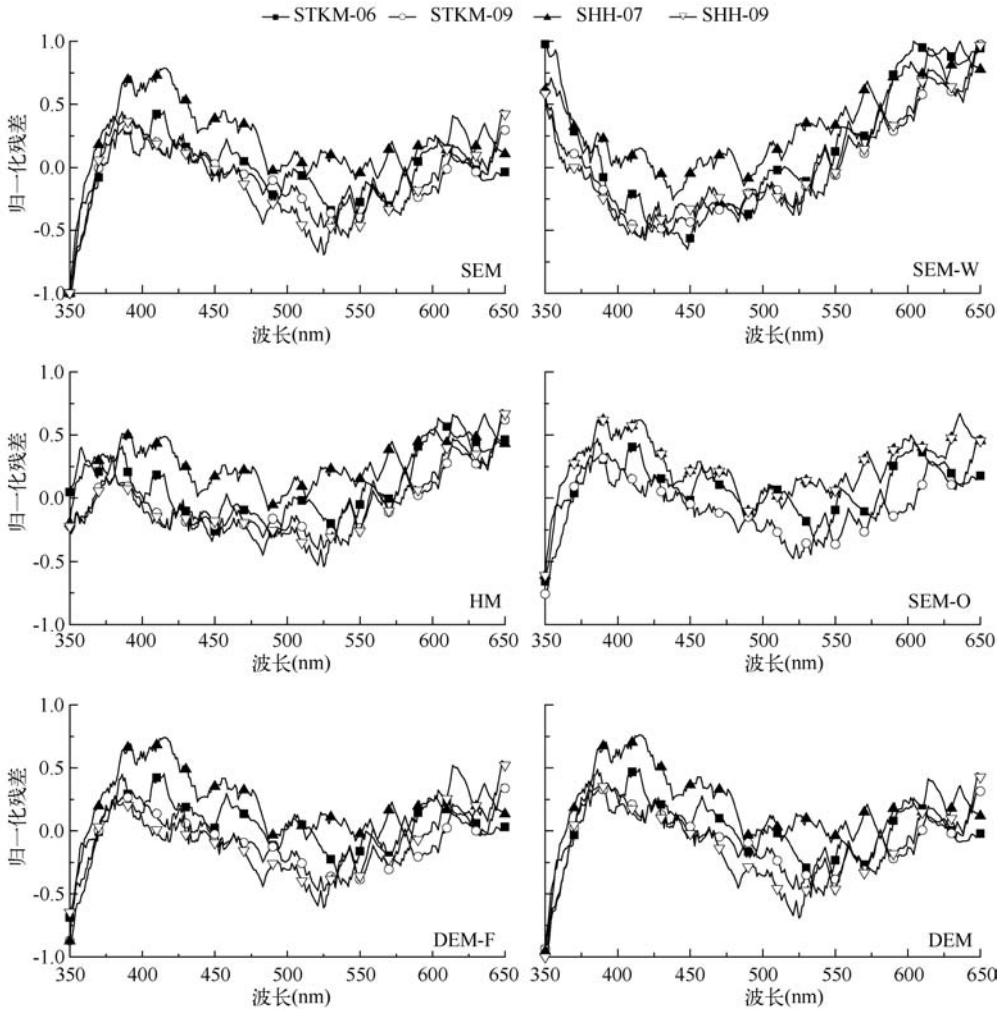

图 5 6 种模型模拟值与实测值之间的残差归一化结果

Fig. 5 Normalized residuals between six models and *in situ* values

3 讨论

3.1 双曲线模型(HM)

大量研究表明[8-10],利用式(1)不同波段范围拟合得到的 S 值均有不同,这主要是因为在应用单指数模型来比较光谱斜率 S 值大小时,其隐含假设是在某一波段范围内 CDOM 系数光谱严格满足指数递减模型[3]. 而对于同一样点 CDOM 吸收光谱曲线,在利用不同波长拟合 S 值时,其结果有显著差异.

单指数模型四次实验 CDOM 吸收系数均值不同波长范围拟合的 S 值(图 4)表明,在 350 - 650nm 波段范围内共进行 15 次 S 值非线性拟合,总体来说,四次实验不同波段范围的拟合结果中,利用不同波段拟合的 S 值具有相似趋势,在 450 - 550nm 处为分界点,两侧逐渐增大. 从不同实验结果来看,石头口门水库 6 月份(STKM-06)各波段拟合值均小于其他实验结果,最大值为 $9.8\mu m^{-1}$,均值为 $7.53 \pm 0.92\mu m^{-1}$;松花湖 9 月份(SHH-09)S 值最大,最大值在 350 - 400nm 处,为 $15.4\mu m^{-1}$,均值 $12.17 \pm 1.50\mu m^{-1}$;石头口门水库 9 月份(STKM-09)和松花湖 7 月份(SHH-07)两结果比较一致,均值分别为:$9.59 \pm 1.16\mu m^{-1}$ 和 $9.73 \pm 1.26\mu m^{-1}$.

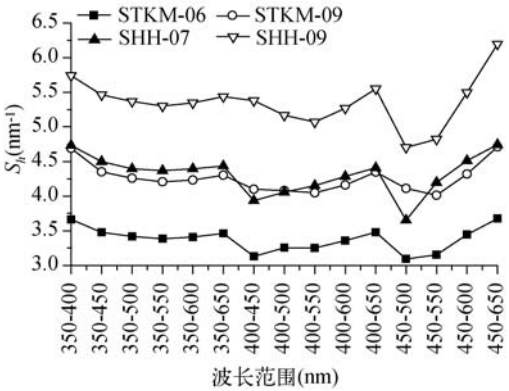

图 6 HM 模型四次实验 CDOM 吸收均值不同波段拟合得到的 S 值

Fig. 6 Resulting slopes of average CDOM absorption coefficient for HM model calculated over different wave ranges in four experiments

从统计 F 值大小和归一化残差两个角度都证明双曲线模型是拟合 CDOM 吸收光谱曲线的最优统计模型,本文讨论 HM 模型光谱斜率 S 的变化特性,以分析 HM 模型的稳定性. HM 模型四次实验 CDOM 吸收均值不同波段拟合得到的 S 值见图 6. 利用双曲线模型拟合得到的 S 值与单波段模型拟合得到的 S 值具有相同的变化趋势,即石头口门水库 6 月份 S 值最小,松花湖 9 月份最大,石头口门水库 6 月份和松花湖 7 月份具有相似的 S 值大小,这说明双曲线模型同样能够表达 CDOM 组分差异和时空分布情况.

与单波段模型拟合得到的 S 值相比(图 4),利用 HM 模型拟合的 S 值变化相对稳定,石头口门水库 6 月份 S 均值为 $3.38 \pm 0.18nm^{-1}$,9 月份为 $4.26 \pm 0.21nm^{-1}$,松花湖 7 月份 S 均值为 $4.32 \pm 0.29nm^{-1}$,9 月份为 $5.35 \pm 0.36nm^{-1}$,不同月份同一湖区、不同湖区同一月份 S 值均有较大变化,这主要是由于 II 类水体的复杂性导致 CDOM 组分不断发生变化. 刘明亮等[17]利用 HM 模型在 280 - 500nm 波段范围内拟合光谱斜率 S,发现太湖 S 均值为 $6.66 \pm 0.4nm^{-1}$;Twardowski 等[3]研究表明,6 个研究区 S 均值基本相同,在 $7nm^{-1}$ 左右变化. 本文研究区 S 值小于太湖和美国滨海地区研究结果.

对比分析 HM 模型和单指数模型光谱斜率 S 的变异系数,以确定模型的稳定性. HM 模型变异系数 STKM-06、STKM-09、SHH-07、SHH-09 分别为:5.20%、4.90%、6.67%、6.63%,均值为 5.85%;单波段模型变异系数 STKM-06、STKM-09、SHH-07、SHH-09 分别为:12.22%、12.10%、12.98%、12.34%,均值为 12.41%. HM 模型变异系数均小于单波段模型,稳定性好,更适合 CDOM 吸收光谱曲线拟合.

3.2 双曲线模型应用于生物光学模型

以 440nm 为 CDOM 特征吸收波长,建立双曲线模型(HM)的 CDOM 吸收生物光学模型,其形式可表达为:

$$a_g(\lambda) = a_g(440)\left(\frac{\lambda}{440}\right)^{-S_h} \tag{5}$$

该模型与单指数模型(式(1))参数个数相同,因此根据决定系数决定模型的优劣. 利用式(5)和式(1)计算拟合四次实验 CDOM 吸收系数均值,其决定系数分别为:0.995 ± 0.001 和 0.990 ± 0.003. 说明利用双曲线模型拟合 CDOM 吸收光谱优于单指数模型.

四次实验分别根据式(5)在 350－650nm 波段范围内拟合光谱斜率 S_h(表4)，说明石头口门水库 S_h 值方差较大，CDOM 空间差异明显(表4)，这与图2表述一致，因此，HM 模型可以反映 CDOM 时空变化规律和物质组成.

国内外许多学者研究表明，CDOM 吸收光谱斜率 S 与特征波长有负相关关系[10,15,16-18]. del Castillo 等[17]研究 1994－1995 年阿拉伯海地区季风性气候对 CDOM 造成的季节性变化，发现 CDOM 特征波长吸收系数与光谱斜率 S 具有线性递减关系；段洪涛等[15]研究表明太湖沿岸水体 CDOM 特征参数 $a_g(400)$ 与 S 呈负相关关系，但由于腐殖酸和灰黄酸比例变化存在一定不规则性，造成负相关关系较为不稳定. 四次实验 CDOM 特征波长吸收系数 $a_g(400)$ 与 HM 模型光谱斜率 S 相关关系，通过线性、指数、对数和幂指数方法拟合，发现两者幂指数负相关系数 R^2 最大(图7)，为 0.8137，进一步证明 CDOM 特征波长吸收与光谱斜率 S 有稳固的负相关关系.

表4 四次实验 HM 模型光谱斜率 S_h 值

Tab. 4 Spectra slopes of HM model in four experiments

实验	S_h 值	
	变化范围(nm^{-1})	均值(nm^{-1})
STKM-06	2.6324－6.9208	4.5913 ±1.4122
STKM-09	3.3430－7.6456	4.8052 ±1.4128
SHH-07	3.8020－4.8837	4.3088 ±0.2120
SHH-09	4.1745－6.3605	5.4917 ±0.5936

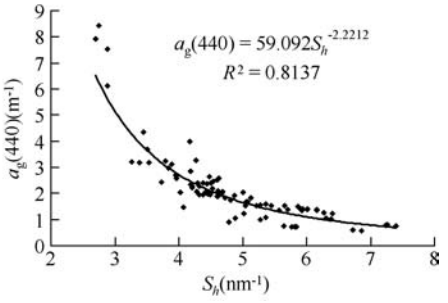

图7 四次实验 CDOM 特征波长吸收系数 $a_g(400)$ 与 HM 模型光谱斜率 S 相关关系

Fig. 7 Relations between $a_g(400)$ and spectra slope for HM model in four experiments

4 结论

(1) 基于石头口门水库6月份、9月份和松花湖7月份、9月份四次实验、94个样点 CDOM 吸收数据，对比分析了6种统计模型在 350－650nm 波段范围内拟合 CDOM 吸收光谱曲线的精度，从统计 F 值大小和归一化残差两个角度都证明双曲线模型(HM)是拟合 CDOM 吸收光谱曲线的最优统计模型.

(2) 利用15个不同波段范围拟合 CDOM 吸收光谱斜率 S，单指数模型 S 值差异较大，双曲线模型则相对稳定，变异系数分别为：12.41% 和 5.85%，因此，双曲线模型能更好地拟合 CDOM 吸收光谱曲线.

(3) 将双曲线模型应用于生物光学模型，该模型可以反映 CDOM 吸收时空变化和物质组成；双曲线模型拟合光谱斜率 S 值与 CDOM 特征波长吸收具有很好的负相关关系，通过线性、指数、对数和幂指数方法拟合，发现幂指数拟合效果最好，决定系数达 0.8137%.

致谢：徐京萍博士提供了本论文数据，曾丽红博士在论文作图中帮助很大，谨此致谢！

5 参考文献

[1] Davies-Colley RJ. Yellow substance in coastal and marine waters round the South Island, New Zealand. *Journal of Marine and Freshwater Research*, 1992, **26**(3-4): 311-322.

[2] Carder KL, Hawes SK, Baker KA *et al*. Reflectance model for quantifying chlorophyll a in the presence of productivity degradation products. *Journal of Geophysical Research*, 1991, **96**(C1): 20599-20611.

[3] Twardowski MS, Boss E, Sullivan JM *et al*. Modeling the spectral shape of absorption by chromophoric dissolved organic matter. *Marine Chemistry*, 2004, **89**(1-4): 69-88.

[4] Bricaud A, Morel A, Prieur L. Absorption by dissolved organic matter of the sea (yellow substance) in the UV and visible domain. *Limnology and Oceanography*, 1981, **26**(1): 43-53.

[5] Carder KL, Steward RG, Harvey GR *et al*. Marine humic and fulvic acids: Their effects on remote sensing of ocean Chlorophyll. *Limnology and Oceanography*, 1989, **34**(1): 68-81.

[6] Vodacek A, Blough NV, de Grandpre MD *et al*. Seasonal variation of CDOM and DOC in the middle Atlantic Bight: Terrestrial inputs and photooxidation. *Limnology and Oceanography*, 1997, **42**(4): 674-686.

[7] Stedmon CA, Markager S, Kaas H. Optical properties and signatures of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in Danish coastal waters. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2000, **51**(2): 267-278.

[8] Zhang YL, Qin BQ, Zhu GW *et al*. Chromophoric dissolved organic matter (CDOM) absorption characteristics in relation to fluorescence in Lake Taihu, China, a large shallow subtropical lake. *Hydrobiologia*, 2007, **581**: 43-52.

[9] 马荣华,戴锦芳,张运林. 东太湖 CDOM 吸收光谱的影响因素与参数确定. 湖泊科学,2005,**17**(2):120-126.

[10] 周虹丽,朱建华,李酮基等. 青海湖水色要素吸收光谱特性分析——黄色物质、非色素颗粒物和浮游植物色素. 海洋技术,2005,**24**(2):55-58.

[11] Markager W, Vincent WF. Spectral light attenuation and absorption of UV and blue light in natural waters. *Limnology Oceanography*, 2000, **45**(3): 642-650.

[12] Fargion GS, Mueller JL. Ocean optics protocols for satellite ocean color sensor validation, Revision 2. NASA/TM-2000-209966.

[13] Keith DJ, Yoder JA, Freeman SA. Spatial and temporal distribution of coloured dissolved organic matter (CDOM) in Narragansett Bay, Rhode Island: implications for phytoplankton in coastal waters. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2002, **55**: 705-717.

[14] 何书元. 概率论与数理统计. 北京:高等教育出版社,2006.

[15] 段洪涛,马荣华,孔维娟等. 太湖沿岸水体 CDOM 吸收光谱特性. 湖泊科学,2009,**21**(2):242-247.

[16] 刘明亮,张运林,王 鑫等. 太湖有色可溶性有机物 4 种光谱模型的对比. 生态与农村环境学报,2009,**25**(1):42-46.

[17] del Castillo CE, Coble PG. Seasonal variability of the colored dissolved organic matter during the 1994-95 NE and SW Monsoons in the Arabian Sea. *Deep-Sea Research II*, 2000, **47**: 1563-1579.

[18] Kowalczuk P, Stedmon CA, Markager S. Modeling absorption by CDOM in the Baltic Sea form salinity and Chlorophyll. *Marine Chemistry*, 2006, **101**(1): 1-11.