

# 胶州湾黄色物质反演模式建立 及在黄、东海海域的适应性检验\*

吴永森 孙培光 张振生 张士魁 高新华 叶 臣

(国家海洋局第一海洋研究所 青岛 266061)

(青岛科技大学 青岛 266042)

**提要** 利用胶州湾现场黄色物质吸收系数测量数据,建立了胶州湾水域黄色物质反演的三种统计模式。与 Bricaud 和 Pegau 所建立的模式进行比较发现,胶州湾黄色物质均值模式中的  $S$  值比 Pegau 和 Bricaud 模式中的  $S$  值要小近 1 倍。为了进一步检验所建模式的真实性、可靠性,利用 2003 年 3 月 12 日—4 月 6 日在黄、东海海域 ( $120^{\circ}30'05''E, 35^{\circ}59'46''N$ — $123^{\circ}27'04''E, 36^{\circ}00'04''N$ ;  $122^{\circ}12'50''E, 30^{\circ}45'40''N$ — $125^{\circ}00'26''E, 30^{\circ}00'10''N$ ) 81 个站点的现场数据分别对已建的胶州湾模式和国外相应模式进行了比较、验证。结果表明,用胶州湾 400 均值模式、440 均值模式、Bricaud 模式和 Pegau 模式获得的黄色物质吸收系数计算值与现场同步实测值的误差平均值分别为  $-14.37\%$ 、 $-35.20\%$ 、 $0.19\%$  和  $19.95\%$ 。对比值进行计算,给出胶州湾 400 均值模式、440 均值模式、Bricaud 模式和 Pegau 模式计算值与实测值的平均比值分别为 0.85012、0.63932、0.98180 和 1.17541。同时,也给出胶州湾海域  $S$  值的变化区间为  $0.00166 \leq S \leq 0.02403$ 。

分析认为,胶州湾 400 均值模式和 Bricaud 模式优于胶州湾 440 均值模式和 Pegau 模式,在黄、东海海域有较好的适应性。

**关键词** 胶州湾,黄色物质,模式研究,适应性检验

**中图分类号** P733.3

自海洋形成伊始,陆地上大量有机物和无机物就以各种不同的方式进入海洋。特别是在近代,随着各国国家工业化进程的加快,大大加强并促进了最终汇入海洋有机和无机物的形成、累积,使海洋中的有机物和无机物含量得以迅速增加。作为海水中有机物的一部分——黄色物质的存在和增加,使海洋光学的研究变得更加丰富多彩。

水中黄色物质发现于 20 世纪 40 年代。进入 90 年代后,随着美国 SeaWiFS 卫星的发射,它更加引起了各国海洋学家和遥感专家们的广泛关注。但在我国黄、东、南海海域、大陆沿岸和海湾相关研究则刚刚开始(吴永森等,2002;郭卫东等,

2005),有众多物理问题鲜为人知,其中包括光谱表达模式。分析国际上在该领域的研究发现,早在 1957 年,Jerby 就提出了黄色物质吸收系数  $A_y(\lambda)$  随波长的数学表达模型,其中,  $S$  (slope 斜率或称坡度)值常被作为准物理常数 (a physical quasi-constant) 处理。这个  $S$  值由 Lundgren 在 1976 年第一次被量化。之后,科学家对世界众多海域、海区进行了大量的现场实验测量,做了大量的研究工作,取得了不少进展,但大多以确定  $S$  值和验证 Jerby 模式为主要研究内容 (Højerslev *et al.*, 2001; Højerslev, 1989; Højerslev *et al.*, 1996; Højerslev, 1982; Bricaud, 1981; Andre *et al.*, 1977; Pegau *et al.*, 1995; Tassan, 1994)。由于地域的差

\* 国家 863 高技术计划资助项目, 863AA636010 号和国家自然科学基金项目, 4978605 号, 吴永森, 研究员, E-mail yswt@sina.com

收稿日期: 2005-07-12 收修改稿日期: 2006-06-16

异,环境状况和生化成分的不一,因而,迄今还没有一个大家公认的普适模式,但有一点大家是认可的,即它服从指数变化规律(Jerlov模式),其量值主要取决于使用的波长 $\lambda$ 、 $\lambda_0$ (参考波长)和 $S$ 值取值。

本研究的目的在于,1)根据胶州湾现场黄色物质吸收系数测量数据,建立适应于描述胶州湾黄色物质吸收系数的光谱模式;2)计算给出胶州湾海域的 $S$ 值取值范围;3)与国外相关模式一起对黄色物质的吸收系数进行计算、比较;4)检验胶州湾所建模式和国外相关模式在黄、东海海域的适应性。为进一步建立适合我国海域的黄色物质反演模式提供理论和实验分析依据。

## 1 数据来源与分析方法

模式建立所使用的数据为1999年9月1—3日在胶州湾现场取样,在实验室测得的黄色物质吸收系数数据。实验室样品测量方法详见“胶州湾现场黄色物质吸收特性研究”一文(吴永森等,2002),而作为检验所使用的数据为2003年3月19日13:00—4月23日14:00时在黄、东海海域( $120^{\circ}30'05''E$ ;  $35^{\circ}59'46''N$ — $123^{\circ}27'04''E$ ;  $36^{\circ}00'04''N$ ;  $122^{\circ}12'50''E$ ;  $30^{\circ}45'40''N$ — $125^{\circ}00'26''E$ ;  $30^{\circ}00'10''N$ )81个站点现场实验测得的同步黄色物质吸收系数和350—890nm的吸收光谱数据。

采用统计分析方法对数据进行分析。

## 2 统计模型分析

分析现场数据知,黄色物质吸收系数随波长呈指数递减,且其中无波峰和波谷存在。这一点已被多次研究所证实(Pegau *et al.* 1995; Bricaud 1981; 吴永森等,2002)。因此,确定或验证斜率(或称“坡度”)  $S$  值的大小,就可以对由Jerlov确定的黄色物质吸收系数计算模式(或称Jerlov模型)进行调整,给出适用于局地研究海域的黄色物质反演模型。本研究中,对胶州湾现场取样25个站点选定波段(200—800nm)监测到的黄色物质的吸收系数进行了计算,给出了 $S$ 值的取值范围。对模型调整获得如下结果。

### 2.1 黄色物质吸收系数的反演模式

根据Jerlov模式:

$$A_y(\lambda) = a_y(\lambda_0) \text{EXP}[-S(\lambda - \lambda_0)] \quad (1)$$

其中, $A_y(\lambda)$ 为测量波长的黄色物质吸收系数( $\text{m}^{-1}$ ); $a_y(\lambda_0)$ 为参考波长的黄色物质吸收系数( $\text{m}^{-1}$ ); $\lambda$ 为测量波长(nm)(常取380nm); $\lambda_0$ 为参考波

长(nm), $S$ 为坡度(或斜率)(无量纲单位)。

分析胶州湾现场测量数据得到调整后的胶州湾黄色物质吸收系数计算模式如下:

1)胶州湾黄色物质吸收系数计算的最小值模式:

$$A_y(\lambda) = a_y(\lambda_0) \text{EXP}[-0.00166(\lambda - \lambda_0)], \text{ 当 } (S = 0.00166) \text{ 时} \quad (2)$$

2)胶州湾黄色物质吸收系数计算的平均值模式:

$$A_y(\lambda) = a_y(\lambda_0) \text{EXP}[-0.00684(\lambda - \lambda_0)], \text{ 当 } (S = 0.00684) \text{ 时} \quad (3)$$

3)胶州湾黄色物质吸收系数计算的最大值模式:

$$A_y(\lambda) = a_y(\lambda_0) \text{EXP}[-0.02403(\lambda - \lambda_0)], \text{ 当 } (S = 0.02403) \text{ 时} \quad (4)$$

其中 $S$ 值由式(1)解出,将连续吸收光谱中选定波长 $\lambda$ 、 $\lambda_0$ 处的光谱吸收系数实测值代入,给出 $S$ 值,并进行统计分析,获得 $S$ 的均值。计算获得胶州湾海域 $S$ 值的变化区间为 $0.00166 \leq S \leq 0.02403$ ,均值为0.00684。

值得说明的是式(2)、(3)和(4)中的最小值,平均值和最大值指的是在胶州湾海域各测点现场测量获得的黄色物质吸收系数的最小值、平均值和最大值,其中最大值和最小值是由实验获得的极限值。在计算模式中, $\lambda$ 取值取决于所期望研究的特定波长,因各研究者的期望稍有差异,通常国际上大多科学家取 $\lambda = 380\text{nm}$ ,但也有少数科学家取 $\lambda = 375\text{nm}$ 。本研究中取 $\lambda = 380\text{nm}$ 。

由于常规水光学测量和水上卫星的主要观测波段均选在可见光谱段(如SeaWiFS的1—6波段的光谱覆盖范围在412nm—670nm),因而大多给出的是在可见光波段内的黄色物质吸收系数,所以需要Jerlov模式进行计算。这种计算取决于现场获取的光谱测量数据,当然,也取决于选用的参考波长。本研究将利用胶州湾黄色物质吸收系数计算的平均值模式[式(3)]计算各相关测点的黄色物质吸收系数并对模式的适应性进行比较和检验,为此,进一步取参考波长 $\lambda_0 = 400\text{nm}$ ,代入相应模式,获得了参考波长为 $\lambda_0 = 400\text{nm}$ 时的 $A_y(380)$ 计算模式,故,在此简称为“胶州湾400均值模式”或“400均值模式”;同理,当取 $\lambda_0 = 440\text{nm}$ 时,所获得的 $A_y(380)$ 计算模式被称为“胶州湾440均值模式”或“440均值模式”(下同)。

### 2.2 各模式在胶州湾海域的适应性比较

为了比较模式的适应性和可靠性, 首先将 1999年 9月 1—3日胶州湾 25个站点现场水样在 200—800nm 波长获得的原始光吸收系数数据代入 Bricaud Morel和 Pegau模式以及本研究建立的上述式 (2)、(3)和 (4), 对在波长 380nm 处的胶州湾黄色物质吸收系数  $A_y(380)$ , 进行了计算、比较。其中, 由于 Bricaud模式和 Morel模式 (Morel et al, 1977)中  $S$ 值均取  $-0.01400$  两模式是相同的, 故, 这里仅给出使用 Bricaud模式所获得的计算结果。用各模式计算获得的黄色物质吸收系数值与实测值的比较见图 1。

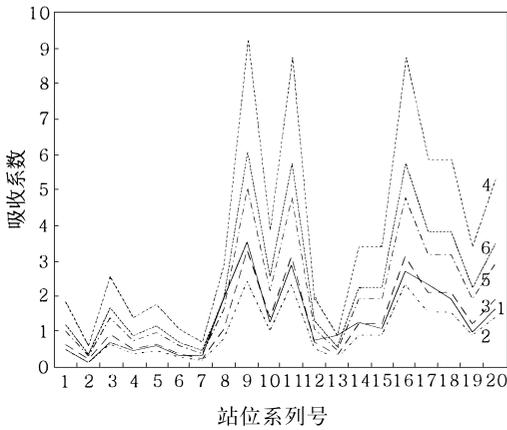


图 1 胶州湾黄色物质在波长 380nm 处的吸收系数实测值与多模式计算值比较

Fig 1 The comparison of the in-situ measurements of yellow substance absorption coefficient [ $A_y(380)$ ] in Jiaozhou Bay with values calculated from several models

图中 1、2、3、4、5、6 为数据系列号。数据系列 1 为胶州湾黄色物质在 380nm 处的吸收系数现场实测值; 数据系列 2 为胶州湾黄色物质最小值模式 (取  $S = -0.00166$ ) 计算值; 数据系列 3 为胶州湾黄色物质均值模式 (取  $S = -0.00684$ ) 计算值; 数据系列 4 为胶州湾黄色物质最大值模式 (取  $S = -0.02403$ ) 计算值; 数据系列 5 为 Bricaud 模式 (取  $S = -0.01400$ ) 计算值; 数据系列 6 为 Pegau 模式 (取  $S = -0.01700$ ) 计算值

图 1 比较可见, 采用胶州湾黄色物质均值模式和 Bricaud 模式计算给出在 380nm 处的黄色物质吸收系数 [ $A_y(380)$ ] 值更接近各测点的实测值。其各模式计算值与实测值的统计偏差值略。

### 2.3 各模式在黄、东海海域的适应性比较与检验

为了检验所建的胶州湾黄色物质吸收系数

计算模式和国外其他现有模式在黄、东海海域的适应性, 利用 2003年 3月 19日 13 00—4月 23日 14 00(北京)时在黄、东海海域 ( $120^{\circ}30'05''E$ ;  $35^{\circ}59'46''N$ — $123^{\circ}27'04''E$ ;  $36^{\circ}00'04''N$ ;  $122^{\circ}12'50''E$ ;  $30^{\circ}45'40''N$ — $125^{\circ}00'26''E$ ;  $30^{\circ}00'10''N$ ) 81个站点现场测得的黄色物质吸收系数和 350nm—890nm 吸收光谱数据对所建的胶州湾 400、440 均值模式与国外同类模式——Bricaud 和 Pegau 模式一起对该研究海域的黄色物质吸收系数进行了计算, 并与现场在波长 380nm 处同步测得的黄色物质吸收系数进行了比较和误差计算。各模式所获黄色物质吸收系数平均值、标准偏差 (STDEV) 和反演产生的误差平均值以及所呈误差的标准偏差见表 1。

相关误差由式 (5) 进行计算:

$$\text{误差} = \frac{A_{y, \text{计算}}(\lambda) - A_{y, \text{实测}}(380)}{A_{y, \text{实测}}(380)} \times 100\% \quad (5)$$

总样本数 = 81 个

式中,  $A_{y, \text{计算}}(\lambda)$  指在各不同模式下计算给出的在波长 380nm 处的黄色物质吸收系数;  $A_{y, \text{实测}}(380)$  指在波长  $\lambda = 380\text{nm}$  处现场获得的黄色物质吸收系数实测值。

值得说明的是, 表 1 中误差栏平均值数据并不等于计算栏计算平均值与实测值代入式 (5) 的计算结果, 造成这种不一致的原因是计算栏平均值和误差栏的平均值是逐一对应点的计算结果的算术平均值, 而不是由表 1 中计算栏平均值计算而得。因而, 这种不一致是合理的。

为了进一步明确给出偏差值 [ $A_{y, \text{计算}}(380) - A_{y, \text{实测}}(380)$ ] 与各计算值之间的关系, 给出下图 2 至图 5 同时给出数据拟合线及拟合方程。

对各种模式获得的黄色物质吸收系数计算值和黄、东海海域现场实测值进行比较和偏差分析, 其统计结果见表 2。

表 2 中,  $A$  为黄色物质  $A_{y, \text{实测}}(380)$ ;  $B$  为 400 均值模式获得的黄色物质吸收系数 [ $A_{y, \text{计算}}(380)$ ];  $C$  为 440 均值模式获得的黄色物质吸收系数 [ $A_{y, \text{计算}}(380)$ ];  $D$  为 Bricaud 模式获得的黄色物质吸收系数 [ $A_{y, \text{计算}}(380)$ ];  $E$  为 Pegau 模式获得的黄色物质吸收系数 [ $A_{y, \text{计算}}(380)$ ]。

由表 2 数据分析可见, 利用胶州湾 400 均值模式和 Bricaud 模式可以获得比较好的实验海域

表 1 各模式的黄、东海实验海域黄色物质吸收系数计算值与现场实测值的统计分析

Tab. 1 The statistical results of absorption coefficient of yellow substance in the Yellow Sea and Eastern China Sea based on in-situ measurements and different calculations

项 目	计 算 值		误差 (%)	
	平均值	标准偏差 (SFDEV)	平均值	标准偏差 (STDEV)
$A_{y\text{实测}} (380)$	0.21742	$\pm 0.09335$	—	—
胶州湾 400 均值模式 $A_{y\text{计算}} (380)$	0.18483	$\pm 0.07524$	- 14.37	$\pm 0.02843$
胶州湾 440 均值模式 $A_{y\text{计算}} (380)$	0.13900	$\pm 0.05227$	- 35.20	$\pm 0.06735$
Pegau 模式 $A_{y\text{计算}} (380)$	0.25556	$\pm 0.09616$	19.95	$\pm 0.12390$
Bricaud 模式 $A_{y\text{计算}} (380)$	0.21346	$\pm 0.08032$	0.190	$\pm 0.10350$

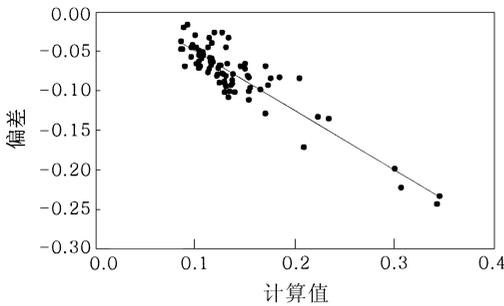


图 2 偏差随胶州湾 440 均值模式计算黄、东海现场黄色物质吸收系数数值的变化图

Fig. 2 The variation of deviations with the absorption coefficients of yellow substance in the Yellow Sea and Eastern China Sea calculated with "440" submodel

Note The linear regression is

$$y = -0.751x + 0.0258 \quad R^2 = 0.8202$$

where:  $y$ : the absorption coefficient of yellow substance in the Yellow Sea and Eastern China Sea calculated with "440" submodel  $x$ : deviation

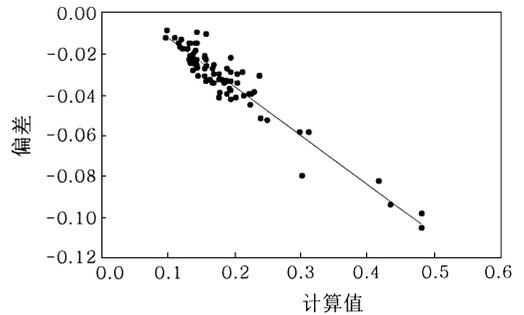


图 3 偏差随胶州湾 400 均值模式计算黄、东海现场黄色物质吸收系数数值的变化图

Fig. 3 The variation of deviations with the absorption coefficients of yellow substance in the Yellow Sea and Eastern China Sea calculated with "400" submodel

Note The linear regression is

$$y = -0.2385x + 0.0115 \quad R^2 = 0.9099$$

where:  $y$ : the absorption coefficient of yellow substance in the Yellow Sea and Eastern China Sea calculated with "440" submodel  $x$ : deviation

表 2 各模式计算值与实测值偏差分析统计

Tab. 2 Statistics of deviations between in-situ measurements and calculations

计算项目	平均值	平均标准偏差
$B-A$	- 0.03259	0.01881
$C-A$	- 0.07842	0.04335
$D-A$	- 0.00396	0.02153
$E-A$	0.03814	0.01896
$B/A$	0.85012	0.02872
$C/A$	0.63932	0.22910
$D/A$	0.98180	1.21431
$E/A$	1.17541	0.34645

黄色物质吸收系数计算值, 比较接近于现场实测值。故, 认为该模式在黄、东海海域有较好的适应性。

### 3 结论

利用黄、东海海域 81 个站点现场测得的黄色物质吸收系数, 对用胶州湾现场数据建立的胶州湾黄色物质吸收系数均值模式进行了独立应用、验证, 并与 Pegau 和 Bricaud 所建立的模式进行比较, 结果发现;

1) 胶州湾海域  $S$  值的变化区间为  $0.00166 \leq S \leq 0.02403$

2) 在胶州湾海域, 胶州湾 400 均值模式要优于 Pegau 模式;

3) 在黄、东海海域, 胶州湾 400 均值模式和

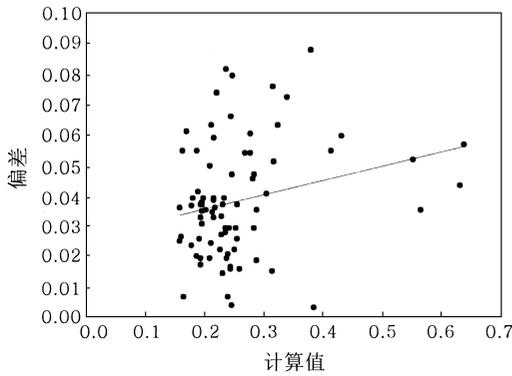


图4 偏差随 Pegau模式计算黄、东海现场黄色物质吸收系数数值的变化图

Fig 4 The variation of deviations with the absorption coefficients of yellow substance in the Yellow Sea and Eastern China Sea calculated with Pegau's model

Note The linear regression is  
 $y = 0.0482x + 0.0258 \quad R^2 = 0.0597$

where  $y$ : the absorption coefficient of yellow substance in the Yellow Sea and Eastern China Sea calculated with Pegau's model  
 $x$ : deviation

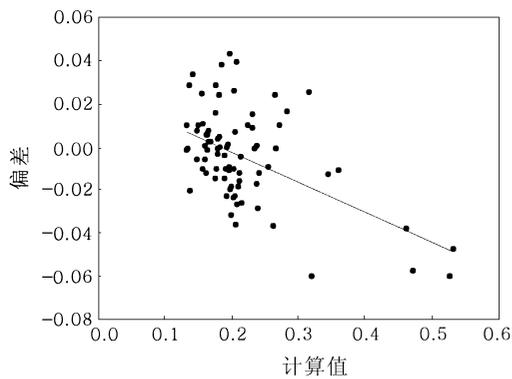


图5 偏差随 Bricaud模式计算的黄、东海现场黄色物质吸收系数数值的变化图

Fig 5 The variation of deviations with the absorption coefficients in the Yellow Sea and Eastern China Sea calculated with Bricaud's model

Note The linear regression is  
 $y = -0.1395x + 0.0258 \quad R^2 = 0.271$

where  $y$ : absorption coefficient of yellow substance of yellow substance in the Yellow Sea and Eastern China Sea calculated with Bricaud's model  
 $x$ : deviation

Bricaud模式要优于 Pegau模式和胶州湾 440 均值模式, 并有较好的适应性。

且认为, 不同的海域需要不同的黄色物质吸收系数反演模式, 国外相关模式需经验证和修正方可适用于中国特定研究海域。这对进一步改进国外现有模式和我国自行发展的不同海域的黄色物质卫星反演模式均具有重要的参考价值和借鉴意义。

**致谢** 参加本研究工作的还有吴隆业、张绪琴、刘占沛、郑建民、李宝华等同志及国家海洋卫星中心的唐军武研究员, 谨致谢忱。

## 参 考 文 献

- 吴永森, 张士魁, 张绪琴等, 2002 海水黄色物质光吸收特性实验研究. 海洋与湖沼, 33(4): 402—406
- 张绪琴, 吴永森, 张士魁, 1999 海水黄色物质的研究现状与展望. 黄渤海海洋, 18(1): 90—92
- 郭卫东, 夏恩琴, 韩宇超等, 2005 九龙江口 CDOM 的荧光特性研究. 海洋与湖沼, 36(5): 349—357
- Bricaud A, 1981 Absorption by dissolved organic matter of the sea (Yellow substance) in the UV and visible domains. *Limnol Oceanogr* 26: 43—53
- Højerslev N K, Aas E, 2001 Spectral light absorption by yellow substance in the Kattegat-Skagerrak area. *Oceanologia* 43(1): 39—60
- Højerslev N K, 1989 Surface water quality studies in the interior marine environment of Denmark. *Limnol Oceanogr* 34(8): 1630—1639
- Højerslev N K, Holt N, Aarup T, 1996 Optical measurements in the North Sea-Baltic Sea transition zone. I. On the origin of the deep water in the Kattegat Continental Shelf. *Research* 16: 1329—1343
- Højerslev N K, 1982 Yellow substance in the sea. In: *Calculation of the Role of Solar Ultraviolet Radiation in Marine Ecosystems*. New York: Plenum, 263—281
- Morel André, Louis Prieur, 1977. Analysis of variations in ocean color. *Limnol Oceanogr* 22(4): 709—722
- Pegau W S, Cleveland J S, Doss W *et al*, 1995. A comparison of methods for the measurements of the absorption coefficient in natural waters. *JGR*, 100(C7): 13201—13220
- Tassan S, 1994. Local algorithms using SeaWiFS data for the retrieval of phytoplankton pigments, suspended sediment and yellow substance in coastal waters. *Applied Optics* 33(12): 2369—2378

## INVERSION MODELS FOR ABSORPTION COEFFICIENT OF YELLOW SUBSTANCE IN JIAOZHOU BAY AND APPLICATION TEST IN THE YELLOW SEA AND EASTERN CHINA SEA

WU Yong-Sen, SUN Pei-Guang, ZHANG Zhen-Sheng, ZHANG Shi-Kui, GAO Xi-Hua, YE Chen

(*First Institute of Oceanography, State Oceanography Administration, Qingdao, 266061*)

(*Qingdao University of Science and Technology, Qingdao, 266042*)

**Abstract** Having analyzed the absorption of yellow substance based on in-situ samples in Jiaozhou Bay near Qingdao of China, three statistical models were used to calculate the absorption coefficients of yellow substance. They are the models of Jiaozhou Bay, Bricaud and Pegau. Among them, the Jiaozhou Bay Model was improved by the authors on the basis of in-situ observations and includes two sub-models according to different wavelengths for the inversion at 400 and 440 nm, named “400” and “440” sub-models. Among the results of these models, the Jiaozhou Bay Model had the smallest  $S$  value, which is about one time less than those from other two models.

In order to test the applicability and reliability of a model in Jiaozhou Bay, several models were tested at same time independently with in-situ data measured at 81 spots in the Yellow Sea ( $120^{\circ}30'05''\text{E}/35^{\circ}59'46''\text{N}$ — $123^{\circ}27'04''\text{E}/36^{\circ}00'04''\text{N}$ ), and Eastern China Sea ( $122^{\circ}12'50''\text{E}/30^{\circ}45'40''\text{N}$ — $125^{\circ}00'26''\text{E}/30^{\circ}00'10''\text{N}$ ). The results show that the errors using the models “400” and “440” of Jiaozhou Bay, Bricaud and Pegau to the in-situ measurements were  $-14.37\%$ ,  $-35.20\%$ ;  $0.19\%$  and  $19.95\%$ , and the ratios of the calculated values were  $0.85012$ ,  $0.63932$ ,  $0.98180$  and  $1.17541$ , respectively. Additionally, the  $S$  values of the Jiaozhou Bay Model was between  $0.02403$  and  $0.00166$ . Therefore, it is concluded that the “400” sub-model and Bricaud Model are better than the “440” sub-model and Pegau Model. They had a better suitability in the waters of the Yellow Sea and East China Sea.

**Key words** Jiaozhou Bay, Yellow substance, Model study, Suitability test