

黄渤海悬浮颗粒物散射特性研究*

Light Scattering Properties of Suspended Particulate Matter in Yellow Sea and Bohai Sea

沈晓晶, 丘仲锋**, 孙德勇, 何宜军, 王胜强

SHEN Xiao-jing, QIU Zhong-feng, SUN De-yong, HE Yi-jun, WANG Sheng-qiang

(南京信息工程大学海洋科学学院, 江苏南京 210044)

(School of Marine Science, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu, 210044, China)

摘要:【目的】研究悬浮颗粒物的散射特性,用以描述水体固有光学特性。【方法】利用2014年11月黄渤海海区航测数据,分别选取555 nm和532 nm作为参考波长,建立悬浮颗粒物散射及后向散射的光谱模型,并对模型拟合效果进行检验;此外,还建立了悬浮颗粒物散射参数与水体组分浓度的关系模型。【结果】模型验证结果表明:光谱模型的平均相对误差绝对值(MAPE)分别在60%和35%以内;散射参数与悬浮颗粒物质量浓度模型MAPE的最小值仅为15.0%。【结论】黄渤海颗粒物散射特性主要由非藻类颗粒物主导。

关键词: 悬浮颗粒物 散射 后向散射 模型建立

中图分类号: P733.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-9164(2015)03-0308-07

Abstract: 【Objective】The scattering properties of suspended particulates were analyzed to describe important inherent optical properties of water. 【Methods】In this study, light scattering properties of suspended particulate matter in Yellow Sea and Bohai Sea were investigated in November 2014. Based on these data, spectrum models of the scattering and backscattering coefficient of suspended particulate matter were developed using 555 nm and 532 nm as the reference bands. In addition, estimation models of scattering parameters were developed using concentrations of water constituents. 【Results】The model performance assessments indicated that the mean absolute percentage errors (MAPE) of spectrum models were within 60% and 35%. Among the estimation models of scattering properties using concentrations of water constituents, those models using concentrations of suspended particulate matter are the best, with the minimum MAPE of 15%. 【Conclusion】These results imply that non-algal particles may be the dominant component controlling the scattering properties of suspended particulate matter in this region.

Key words: suspended particulate matter, scattering, backscattering, establishing spectrum models

收稿日期: 2015-03-20

修回日期: 2015-05-20

作者简介: 沈晓晶(1990-), 女, 博士研究生, 主要从事海洋水色遥感研究。

* 国家自然科学基金项目(41276186), 国家海洋公益性行业专项(201005030)和浙江省十二五生态建设项目: 浙江省近岸海域浮标实时监测系统建设项目资助。

** 通讯作者: 丘仲锋(1979-), 男, 教授, 主要从事海洋光学与水色遥感等方面研究, E-mail: zhongfeng.qiu@nuist.edu.cn.

0 引言

【研究意义】吸收系数和散射系数是衡量水体各组分对光照吸收和散射程度的物理量, 是描述水体固有光学特性的重要参量, 其大小只与水体各组分的浓

度有关,不受外界光场变化的影响。其中后向散射部分的光线穿透水面形成离水辐亮度,这是获取水体信息遥感的来源和物理基础^[1]。因此,对近岸水体散射特性的研究有利于对水体固有光学特性的深入理解,也有利于海洋水色遥感的发展。【前人研究进展】针对水体散射特性的研究,自20世纪90年代开始有了很大进展。Whitmire等^[2]基于5个航次数据的分析,发现各航次的后向散射比的光谱形状存在一定差异,但后向散射比的光谱变化并不明显。Whitmire对3个藻属类别的15种藻类的后向散射光谱和吸收光谱进行测量,发现每种藻类具有独特的后向散射光谱,且后向散射光谱曲线变化平缓。Evlyn等^[3]分析了实验室水体光谱反射率和总悬浮颗粒物浓度之间的关系,发现二者之间呈线性关系,在红光波段相关性最高。Mahtaba等^[4]利用地物光谱仪数据模拟不同TM波段设置对不同悬浮物浓度的光谱反射率的影响,并且利用TM4波段反射率建立了与悬浮物浓度的二次回归模型,结果表明二次回归模型的拟合效果优于线性模型。David等^[5]通过现场水体光学参数的测量,分析水体的光谱特征,认为水体内部的光学参数(后向散射系数和吸收系数)是影响水体反射率的主要因素。李铜基等^[6]利用春季的实验数据集,开发了基于水面下遥感反射率 R_{rs} 的后向散射系数 b_b 统计反演模型。李敏敏等^[7]利用2003年4月黄东海春季航次测得的吸收、衰减和后向散射数据,研究该区域悬浮颗粒物后向散射系数的光谱特征,并选取532 nm作为参考波段建立了悬浮颗粒物后向散射系数光谱模型,其幂函数的指数为-1.541。宋庆君等^[8]和孙德勇等^[9]分别对黄东海近岸水体和太湖水体的后向散射特性进行研究,初步建立了后向散射系数与总悬浮物浓度的关系模型,他们的研究表明,颗粒物后向散射系数随光谱变化的指数在高低浑浊度水体有很大差异,而且近岸水体以及湖泊水体的后向散射系数参数化方法有所不同。综上所述,前人对于水体的散射特性已经开展了大量的研究工作,也取得了很大进展。【本研究切入点】因为中国近岸水体大都属于光学性质复杂的二类水体,本文着重于对黄渤海海区的散射特性进行研究,以更好的描述近岸水体的光学特性。【拟解决的关键问题】利用水体固有光学特性测量仪器AC-S和HS-6实测黄渤海的水体散射和后向散射系数,建立光谱模型,同时还建立了散射参数与悬浮颗粒物浓度的关系模型,为深入研究黄渤海水体固有光学特性奠定基础,对于水色遥感的发展也具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区域

本文的研究区域为黄渤海。黄海是太平洋西部的一个边缘海,位于中国大陆与朝鲜半岛之间,其经纬度约为 $31^{\circ}\sim 37^{\circ}\text{N}$ 和 $119^{\circ}\sim 126^{\circ}\text{E}$ 。渤海是中国内海,三面环陆,在辽宁、河北、山东、天津三省一市之间,其经纬度约为 $37^{\circ}\sim 41^{\circ}\text{N}$, $117^{\circ}\sim 122^{\circ}\text{E}$ 。渤海通过渤海海峡与黄海相通。

1.2 数据来源

研究数据来源于2014年11月国家自然科学基金委的公开航次。本航次共设20个离岸断面,115个站位(图1),每个站位主要针对水体的吸收系数、散射系数、后向散射系数、悬浮颗粒物粒径、悬浮颗粒物浓度等参量展开测量。

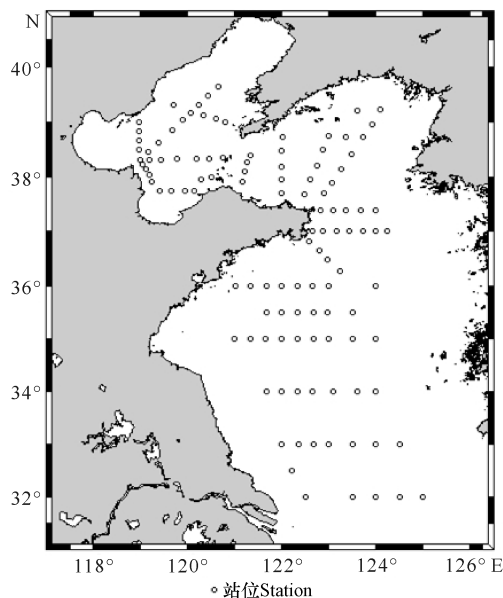


图1 2014年秋季航次站位分布图

Fig. 1 Station locations in Yellow Sea and Bohai Sea of the cruise during fall 2014

1.3 数据测量方法

悬浮颗粒物的粒子浓度(N_d)和体积浓度(V_c)由现场激光粒度仪LISST-100 X(Laser In-Site Scattering and Transmissometry, Type C)测得。LISST运用Mie散射理论,可以区分32个呈对数分布的粒级,测量范围为 $2.5\sim 500\ \mu\text{m}$,并可给出每个粒级的体积浓度。单位体积内所含粒子个数 $N'(D)$ 由式(1)和式(2)可得:

$$V(D) = N(D)(\pi D^3/6), \quad (1)$$

$$N'(D) = N(D)/\Delta D, \quad (2)$$

其中, $V(D)$ 表示32个不同粒级的体积浓度, D 表示对应的粒径大小; $N(D)$ 表示每单位尺寸、单位

体积浓度内的粒子个数(\sim 个/ $\text{m}^3 \mu\text{m}^{-1}$), ΔD 表示每个粒级的尺寸范围。

水体总吸收 $a(\lambda)$ 和总衰减 $c(\lambda)$ 系数由高光谱水体吸收-衰减测量仪 AC-S 测得。水体总散射系数 $b_t(\lambda)$ 则可由水体总衰减系数与水体总吸收系数相减获得, 表示为 $b_t(\lambda) = c(\lambda) - a(\lambda)$, 则悬浮颗粒物的散射系数 $b_p(\lambda) = b_t(\lambda) - b_w(\lambda)$, 其中 $b_w(\lambda)$ 是纯水的散射系数。

水体后向散射系数 $b_b(\lambda)$ 由 6 通道后向散射系数测量仪 HS-6 (HydroScat-6 Spectral Backscattering Sensor) 测得, HS-6 是通过测量 140° 角处的散射相函数来计算得到的水体后向散射系数^[10,11], 包括 6 个波长: 410 nm, 442 nm, 488 nm, 532 nm, 550 nm, 640 nm。则悬浮颗粒物的后向散射系数 $b_{bp}(\lambda) = b_b(\lambda) - b_{bw}(\lambda)$, 其中 $b_{bw}(\lambda)$ 为纯水的后向散射系数。

悬浮颗粒物的质量浓度通过 GF/F 滤膜和过滤设备来测定。过滤海水前先通过烧膜处理的方法除去膜上原有的有机质和水分, 再对冷却后的滤膜进行称重测得空白滤膜的质量 m_1 , 然后将 GF/F 滤膜放在过滤器上, 在微光和低真空度下过滤定量海水样品, 对过滤后的样品滤膜进行干燥、称重, 得到样本滤膜的质量 m_2 , 则悬浮颗粒物的质量浓度 $\text{TSM} = (m_2 - m_1 - \Delta m) / V$, 其中 V 是海水样品的体积, Δm 为校正滤膜的质量。

叶绿素浓度由 WET Labs ECO-AFL/FL 荧光计测得。叶绿素的计算公式为 $\text{Chl a} (\mu\text{g/L}) = \text{Scale Factor} * (\text{Output} - \text{Dark counts})$, 其中 Scale Factor 和 Dark counts 均为常数, 其值分别为 0.0121 和 48, Output 为仪器所测数据, 经计算可得到叶绿素浓度。

1.4 数据分析方法

利用 MATLAB 对实测数据进行统计分析, 得到每个参数的最大值 (Maximum)、最小值 (Minimum)、平均值 (Mean)、标准差 (Standard derivation, SD) 和变异系数 (Coefficient of variation, CV)。将总样本数据随机分为两部分, 一部分用于模型建立 ($n = 25$), 一部分用于效果检验 ($n = 13$)。针对悬浮颗粒物散射系数 b_p 和后向散射系数 b_{bp} 光谱建立模型, 主要是线性模型和幂函数模型两种类型, 具体形式如下:

$$b_p(\lambda) = M(\lambda)b_p(555), \quad (3)$$

$$b_{bp}(\lambda) = M(\lambda)b_{bp}(532). \quad (4)$$

为了检验模型的效果, 可以通过比较实测值与模拟值之间的平均相对误差绝对值 (MAPE)、均方根误差 (RMSE)、相对误差 (RE), 其中 $b_p(\lambda)'_i$ 和 $b_p(\lambda)_i$ 分别表示悬浮颗粒物散射的模拟值和实测值, i 表示样

本数。

$$\text{MAPE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{b_p(\lambda)_i - b_p(\lambda)'_i}{b_p(\lambda)_i} \right|, \quad (5)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [b_p(\lambda)_i - b_p(\lambda)'_i]^2}{n}}, \quad (6)$$

$$\text{RE} = \frac{b_p(\lambda)_i - b_p(\lambda)'_i}{b_p(\lambda)_i}. \quad (7)$$

2 结果与讨论

2.1 水体生物光学参数变化

如表 1 所示, b_p 在红光波段(波长 675 nm 处)变化幅度最小, 最大值为 7.09×10^{-2} , 最小值为 2.05×10^{-2} , 平均值为 4.27×10^{-2} ; 而在绿光波段(波长 550 nm 处)变化幅度最大, 标准差为 4.76×10^{-2} , 变异系数达到 58.6%。 b_{bp} 在各个波长处的变化幅度都较大, 变异系数都超过 100%, 且 3 个波长处的变异系数相差不大。 b_{bp} 在蓝光波段(波长 442 nm 处)变化范围为 $0.73 \times 10^{-3} \sim 103.2 \times 10^{-3}$, 在绿光波段(波长 550 nm 处)变化范围为 $0.87 \times 10^{-3} \sim 127.4 \times 10^{-3}$, 在红光波段(波长 640 nm 处)变化范围为 $0.95 \times 10^{-3} \sim 119.5 \times 10^{-3}$ 。对悬浮颗粒物的浓度而言, 体积浓度的变化幅度最小, 变异系数只有 84.3%, 而粒子浓度的变化幅度最大, 变异系数达到 161.6%, 是体积浓度变异系数的两倍; 叶绿素浓度 (Chl a) 的变化幅度相对较小, 变化范围为 0.41~2.83, 变异系数为 54.2%, 标准差只有 0.44。

表 1 2014 年秋季黄渤海光学参量统计结果

Table 1 Statistical parameters of data collected in Yellow Sea and Bohai Sea during fall 2014

参量 Parameters	最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均值 Mean	标准差 SD	变异系数 CV(%)
$b_p 440 (\times 10^{-2}, \text{m}^{-1})$	19.32	64.70	32.22	11.21	34.8
$b_p 550 (\times 10^{-2}, \text{m}^{-1})$	2.41	23.54	8.12	4.76	58.6
$b_p 675 (\times 10^{-2}, \text{m}^{-1})$	2.05	7.09	4.27	1.08	25.3
$b_{bp} 442 (\times 10^{-3}, \text{m}^{-1})$	0.73	103.20	18.50	27.60	149.2
$b_{bp} 550 (\times 10^{-3}, \text{m}^{-1})$	0.87	127.40	23.40	34.30	146.6
$b_{bp} 640 (\times 10^{-3}, \text{m}^{-1})$	0.95	119.50	21.30	31.60	148.4
TSM(mg/L)	0.13	11.33	3.13	3.36	107.3
$V_c (\mu\text{L/L})$	3.50	45.45	15.00	12.64	84.3
$N_d (\times 10^7 / \text{m}^3)$	0.09	9.19	1.38	2.23	161.6
Chl a ($\mu\text{g/L}$)	0.41	2.83	0.81	0.44	54.2

注: N_d 取在 $D = 38.4$ 处。

Note: N_d was determined when $D = 38.4$.

图 2 表示的是 TSM 与其它水质参数的关系模型, 明显可以看出 TSM 与 N_d 的拟合效果最佳, 决定系数 R^2 达到 0.885, 而与 Chl a 的拟合效果最差, R^2 只有 0.102, 由此可见, 黄渤海海区水体光学特性主要受悬浮颗粒物影响, 受叶绿素的影响相对较小。

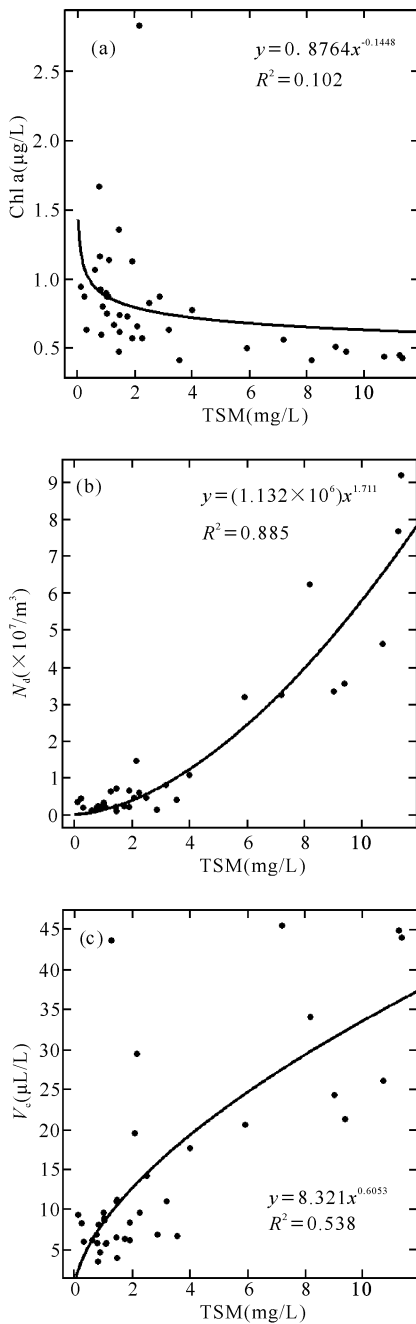


图2 TSM与Chl a(a), N_d (b)和 V_c (c)的关系
Fig. 2 Relationships between TSM with Chl a(a), N_d (b) and V_c (c)

2.2 悬浮颗粒物散射系数的光谱建模

根据(3)式可得 b_p 光谱建模结果:

$$b_p(\lambda) = (-9.97 \times 10^{-3}\lambda + 6.702)b_p(555), \quad (8)$$

$$b_p(\lambda) = b_p(555) \left(\frac{\lambda}{555}\right)^{-4.363}, \quad (9)$$

两者的 R^2 分别为 0.946 和 0.966, RMSE 分别为 0.228 和 0.180。此处 b_p 的参考波长选取的是 555 nm, 而下文 b_{bp} 的参考波长选取的是 532 nm, Lee 等^[12]认为,在高吸收水体中,参考波长的选择需要向广西科学 2015年6月 第22卷第3期

长波方向移动,由此来获得更好的拟合效果,而本文选取的参考波长在遥感反射率 R_{rs} 出现峰值的波段。

由(5)、(6)、(7)式可以分别计算悬浮颗粒物散射模型的 MAPE、RMSE、RE, 图 3a、3b 为悬浮颗粒物散射光谱模型的 MAPE 和 RMSE 分布图, 图 3c 为 RE 分布图。从图 3 中可以看出两个模型的 MAPE 在越接近 555 nm 波长处值越小, 主要是由于参考波长选取的是 555 nm 造成的, 线性模型的 MAPE 略大于幂函数模型, 在蓝光波段和绿光波段表现尤为明显; RMSE 在 555 nm 之前的波段随波长增大而急剧减小, 555 nm 以后的波段随波长增大而趋于平缓, 总体而言, 两个模型的 RMSE 相差不大, 但是蓝光波段线性模型的 RMSE 大于幂函数模型; 悬浮颗粒物散射光谱模型的 RE 在 555 nm 之前的波段基本为正值, 则说明存在高估现象, 555 nm 之后的波段出现负值, 则说明存在低估现象。图 4 是幂函数模型在各个波长处的模拟效果检验结果, R^2 分别为 0.894, 0.996, 0.711。由图 4 可见, 蓝光波段的实测值小于模拟值, 而绿光和红光波段的实测值和模拟值趋于一致, 尤其是绿光波段表现最为明显, 模拟效果较好。

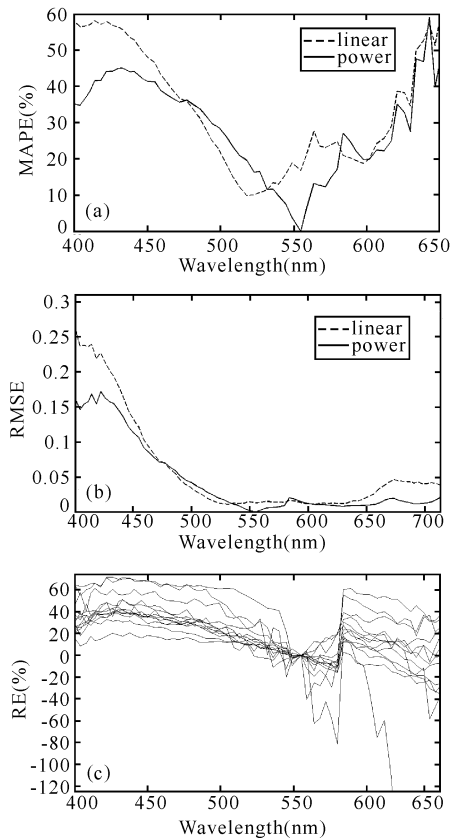


图3 悬浮颗粒物散射光谱模型的 MAPE(a)、RMSE(b)和 RE(c)分布

Fig. 3 Variations in MAPE (a), RMSE (b) and RE (c) of scattering spectrum model of suspended particles

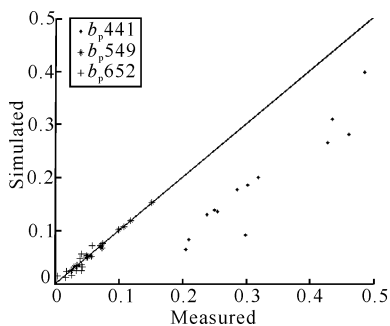


图4 各个波长处悬浮颗粒物散射光谱模型效果检验

Fig. 4 Performance assessment of the scattering spectrum models of suspended particle in different wavelengths

2.3 悬浮颗粒物后向散射系数的光谱建模

根据(4)式可得 b_{bp} 光谱建模结果:

$$b_{bp}(\lambda) = (-4.15 \times 10^{-4} \lambda + 1.3) b_{bp}(532), \quad (10)$$

$$b_{bp}(\lambda) = b_{bp}(532) \left(\frac{\lambda}{532}\right)^{-0.08387}. \quad (11)$$

本文中后向散射光谱建模时选取 532 nm 作为参考波长,建立了 b_{bp} 与波长的关系模型,幂函数模型的系数为 -0.2168 ,两个模型的 R^2 分别为 0.172 和 0.284, RMSE 分别为 0.1381 和 0.1371。

根据(5)、(6)、(7)式可以计算出悬浮颗粒物后向散射光谱模型的线性模型以及幂函数模型的 MAPE、RMSE 和 RE。图 5a 为两个站点的 b_{bp} 实测值以及两个模型的模拟值,图 5b、5c 为悬浮颗粒物后向散射光谱模型的 MAPE 和 RMSE 分布图,图 5d 为悬浮颗粒物后向散射幂函数模型的 RE 分布图。从图 5a 中可以明显看出幂函数模型的模拟效果较好。由图 5b、5c 可以看出在蓝光和绿光波段,线性模型的 MAPE 及 RMSE 大于幂函数模型,而在红光波段,线性模型的 MAPE 和 RMSE 比幂函数模型的小,同时可以看出两个模型的 MAPE 和 RMSE 在越接近 532 nm 波长处值越小;悬浮颗粒物后向散射光谱模型的相对误差正值和负值分布较均匀,则说明悬浮颗粒物后向散射光谱模型的模拟值和实测值相差不大(图 5d)。图 6 是幂函数模型在各个波长处的拟合效果检验结果, R^2 分别为 0.894, 0.996, 0.711。由图可见,蓝光波段的部分实测值大于模拟值,而绿光和红光波段的实测值和模拟值趋于一致,尤其在绿光波段较为明显,模拟效果较好。

2.4 散射参数与悬浮颗粒物浓度的关系分析

表 2 为散射参数与悬浮颗粒物浓度的建模结果,从中可以看出,对于悬浮颗粒物的散射而言,其与 Chl a 的拟合效果最差,蓝、绿、红 3 个波段与 Chl a

建模的模型 R^2 最小, RMSE 相对值最大。对于悬浮颗粒物的后向散射而言,其与 V_c 的拟合效果最差,各个波长处的 b_{bp} 与 V_c 建模的模型 R^2 最小, RMSE 相对值最大。由此可见,黄渤海海区散射参数与浓度的关系不是简单的线性关系,宋庆君等^[8]在黄东海海区也得到此结论。而 3 个波长处的 b_p 和 b_{bp} 与 TSM 的建模结果较好,图 7 即为各个波长处的悬浮颗粒物散射参数与 TSM 的关系模型。

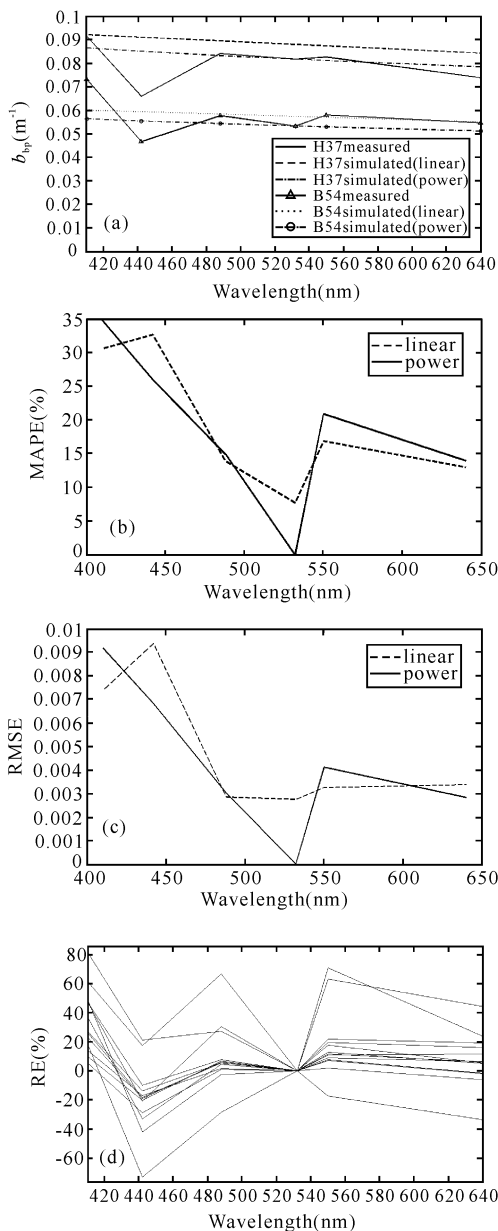


图5 实测悬浮颗粒物后向散射光谱与模型模拟光谱的比较(a),以及相应模型的 MAPE (b)、RMSE (c) 和 RE (d)

Fig. 5 Comparisons between measured b_{bp} with those derived spectrum using linear and power models (a), and the corresponding MAPE (b), RMSE (c) and RE (d) of these models

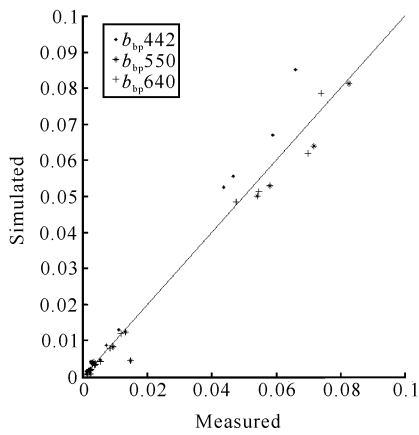


图 6 各个波长处悬浮颗粒物后向散射光谱模型效果检验

Fig. 6 Performance assessment of the backscattering spectrum models of suspended particle in different wavelengths

表 2 散射参数和后向散射参数与悬浮颗粒物浓度、Chl a、 N_d 以及 V_c 的关系模型

Table 2 The fitting functions and statistical parameters of the relationship between scattering and backscattering parameters with TSM, Chl a, N_d , and V_c

模型方程 Models functions	R^2	RMSE ($\times 10^{-3}$)
$b_p 441 = 0.24 \exp(7.99 \times 10^{-2} (TSM))$	0.861	45.94
$b_p 441 = 0.25 (Chl a)^{-0.752}$	0.373	97.50
$b_p 441 = 8.21 \times 10^{-3} (N_d)^{0.2358}$	0.882	42.23
$b_p 441 = 0.12 (V_c)^{0.3866}$	0.675	70.21
$b_p 549 = 5.51 \times 10^{-2} \exp(0.12 (TSM))$	0.801	23.73
$b_p 549 = 0.05 (Chl a)^{-1.308}$	0.383	41.78
$b_p 549 = 4.38 \times 10^{-4} (N_d)^{0.3369}$	0.775	25.23
$b_p 549 = 2.35 \times 10^{-2} (V_c)^{0.5128}$	0.480	38.34
$b_p 639 = 2.77 \times 10^{-2} \exp(0.09 (TSM))$	0.722	9.77
$b_p 639 = 2.78 \times 10^{-2} (Chl a)^{-0.9161}$	0.357	14.87
$b_p 639 = 6.68 \times 10^{-10} (N_d) + 0.03$	0.778	8.73
$b_p 639 = 2.61 \times 10^{-2} \exp(2.39 \times 10^{-2} (V_c))$	0.657	10.86
$b_{bp} 442 = 2.75 \times 10^{-3} (TSM)^{1.436}$	0.949	6.81
$b_{bp} 442 = 4.06 \times 10^{-4} (Chl a)^{-6.367}$	0.763	14.69
$b_{bp} 442 = 5.38 \times 10^{-8} (N_d)^{0.7911}$	0.949	6.82
$b_{bp} 442 = 18.38 \times 10^{-4} (V_c) - 8.38 \times 10^{-3}$	0.617	18.67
$b_{bp} 550 = 34.99 \times 10^{-4} (TSM)^{1.429}$	0.951	8.30
$b_{bp} 550 = 59.45 \times 10^{-5} (Chl a)^{-6.171}$	0.761	18.41
$b_{bp} 550 = 7.04 \times 10^{-8} (N_d)^{0.7886}$	0.954	8.11
$b_{bp} 550 = 2.3 \times 10^{-3} (V_c) - 0.01$	0.622	23.13
$b_{bp} 640 = 33.67 \times 10^{-4} (TSM)^{1.408}$	0.949	7.80
$b_{bp} 640 = 4.92 \times 10^{-4} (Chl a)^{-6.3}$	0.764	16.75
$b_{bp} 640 = 7.34 \times 10^{-8} (N_d)^{0.7813}$	0.946	8.01
$b_{bp} 640 = 20.85 \times 10^{-4} (V_c) - 90.68 \times 10^{-4}$	0.609	21.57

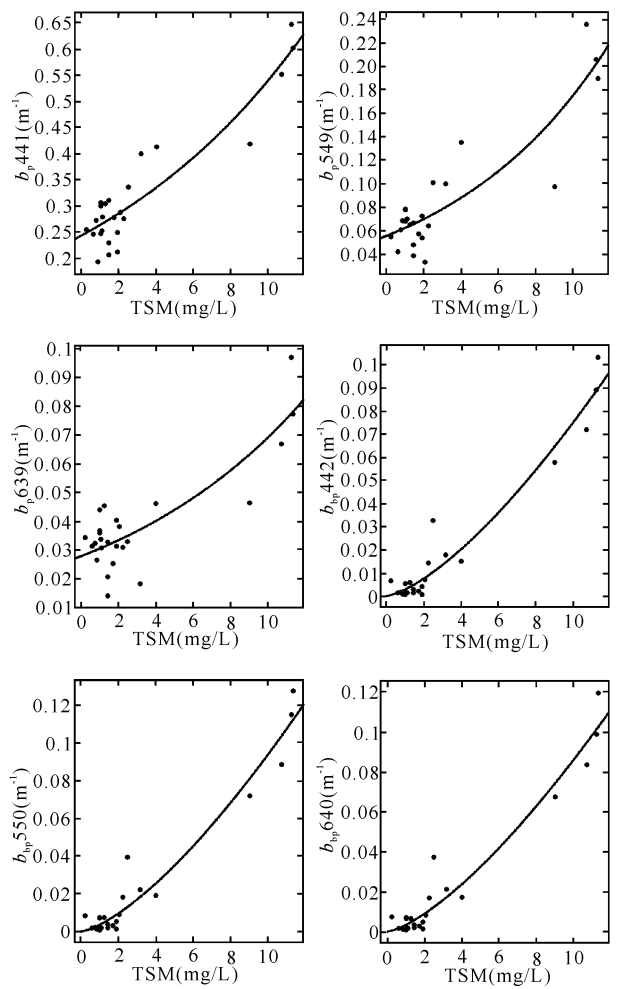


图 7 各个波长处散射参数与 TSM 关系模型

Fig. 7 Relationships between TSM with $b_p 441, b_p 549, b_p 639, b_{bp} 442, b_{bp} 550$ and $b_{bp} 640$

图 8 是各个波长处实测散射参数与模拟的散射参数的拟合效果图。

表 3 和表 4 是散射参数与悬浮颗粒物浓度的模型效果检验结果, b_p 的 MAPE 明显小于 b_{bp} 的, 则可以看出悬浮颗粒物散射系数与悬浮颗粒物浓度的拟合效果好于后向散射系数与悬浮颗粒物浓度的拟合效果。此外, 蓝光波长处散射参数的 RMSE 相差较大, b_p 为 0.053 而 b_{bp} 只有 0.012, 红光波长处散射参数的 RMSE 相差较小。整体而言, 散射参数与 TSM 的拟合效果较好, MAPE 的最小值只有 15.0%; 与叶绿素浓度的拟合效果最差, MAPE 最大值高达 280.3%。对于悬浮颗粒物的散射而言, 蓝光波长处的拟合效果最佳 (MAPE 最小值为 14.1%), 红光波长处的拟合效果最差 (MAPE 最小值为 80.0%), 后向散射在各个波长处的拟合效果相近。

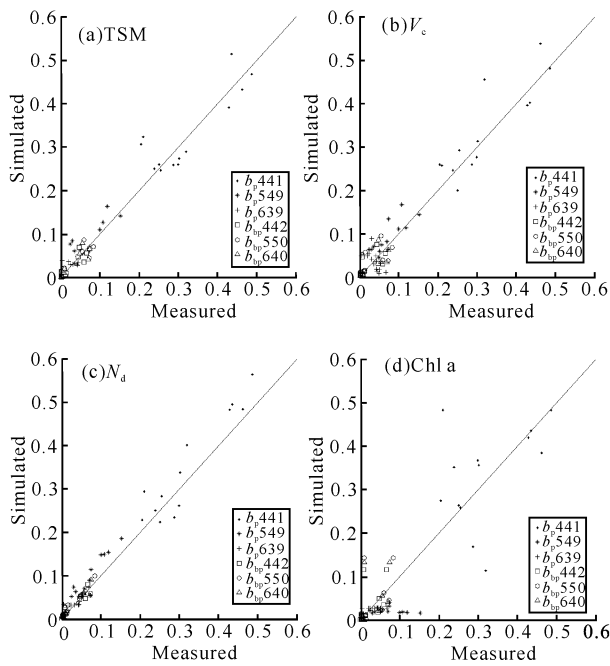


图 8 各个波长处悬浮颗粒物散射系数与浓度关系模型检验

Fig. 8 Performance assessment of the scattering and backscattering spectrum models of suspended particle based on TSM (a), V_c (b), N_d (c) and Chl a (d) in different wavelengths

表 3 2014 秋季黄渤海悬浮颗粒物散射参数与浓度关系模型检验 MEPE 结果

Table 3 MAPE of the models for estimation of b_p and b_{bp} using TSM, V_c , N_d and Chl a in Yellow Sea and Bohai Sea during fall 2014

Item	MAPE(%)					
	b_p 441	b_p 549	b_p 639	b_{bp} 442	b_{bp} 550	b_{bp} 640
TSM	15.0	47.5	97.3	126.3	104.2	115.4
V_c	14.1	47.8	170.3	189.1	132.2	190.3
N_d	15.0	47.7	80.0	147.1	98.3	141.1
Chl a	29.6	61.8	80.8	280.3	249.7	263.9

表 4 2014 秋季黄渤海悬浮颗粒物散射参数与浓度关系模型检验 RMSE 结果

Table 4 RMSE of the models for estimation of b_p and b_{bp} using TSM, V_c , N_d and Chl a in Yellow Sea and Bohai Sea during fall 2014

Item	RMSE					
	b_p 441	b_p 549	b_p 639	b_{bp} 442	b_{bp} 550	b_{bp} 640
TSM	0.0529	0.0267	0.0133	0.0104	0.0127	0.0121
V_c	0.0536	0.0300	0.0338	0.0175	0.0204	0.0208
N_d	0.0517	0.0305	0.0105	0.0080	0.0083	0.0100
Chl a	0.1118	0.0639	0.0182	0.0348	0.0427	0.0399

3 结论

1) 针对悬浮颗粒物散射系数的光谱建模, 选取

555 nm 为参考波长, 得到线性形式和幂函数形式两种模型, 两个模型的 R^2 分别为 0.946 和 0.966, RMSE 分别为 0.228 和 0.180。选取 532 nm 为参考波长, 得到线性形式和幂函数形式两种模型, 幂函数模型的系数为 -0.2168, 两个模型的 R^2 分别为 0.172 和 0.284, RMSE 分别为 0.138 和 0.137。

2) 分别选取各个波长处的散射参数与 TSM 建立关系模型, b_p 的 MAPE 明显小于 b_{bp} , 可以看出 b_p 与 TSM 的拟合效果优于 b_{bp} 与 TSM 的拟合效果, 说明 b_p 与 TSM 有更密切的关系。

3) 建立散射参数与悬浮颗粒物浓度的关系模型, b_p 与 Chl a 的拟合效果最差, b_{bp} 与 V_c 的拟合效果最差, 而 b_p 和 b_{bp} 与 TSM 的建模结果较好, 经误差检验可知, 散射参数与 TSM 的 MAPE 最小值只有 15%, RMSE 基本在 0.01~0.02。这表明黄渤海颗粒物散射特性主要由非藻类颗粒物主导。

参考文献:

[1] Stramki D, Boss E, Bogucki D, et al. The role of seawater constituents in light backscattering in the ocean[J]. Progress in Oceanography, 2004, 61: 27-56.

[2] Whitmire A L, Boss E, Cowles T J, et al. Spectral variability of the particulate backscattering ratio[J]. Opt Express, 2007, 15: 7019-7031.

[3] Carlos A S, Evelyn M L, Claudia Z F B. Results of a laboratory experiment relating spectral reflectance to total suspended solids[J]. Remote Sensing of Environment, 1991, 36: 67-72.

[4] Mahtaba A L, Runquist D C, Han L H, et al. Estimation of suspended sediment concentration in water using integrated surface reflectance[J]. Geocarto International, 1998, 13(2): 11-15.

[5] Maritorena S, Siegel D A, Peterson A R. Optimization of a semi-analytical ocean color model for global-scale applications[J]. Appl Opt, 2002, 41: 2705-2714.

[6] 李铜基, 陈清莲, 杨安安, 等. 黄东海春季水体后向散射系数的经验模型研究[J]. 海洋技术, 2004, 23(3): 10-14.

Li T J, Chen Q L, Yang A A, et al. Study of the spring empirical model for backscattering coefficient in Yellow sea and East China sea[J]. Ocean Technology, 2004, 23(3): 10-14.

[7] 李敏敏, 李铜基, 朱建华, 等. 黄东海海区悬浮颗粒物后向散射系数和后向散射比的空间分布规律研究[J]. 海洋技术, 2013, 32(1): 50-55.

Li M M, Li T J, Zhu J H, et al. Spatial distribution of backscattering coefficient and backscattering ratio of suspended particle matter in Yellow Sea and East China Sea[J]. Ocean Technology, 2013, 32(1): 50-55.

(下转第 321 页 Continue on page 321)

海域夏季存在明显的上升流现象,在上升流海区的沿岸表层水团和次表层水团交汇处,存在明显的海洋锋;(2)广东东部沿岸上升流属于风生类季节性上升流,该上升流的强弱与盛行风的变化有着较强的对应关系;(3)2003年夏季广东东部沿岸上升流的总体变化趋势表现为强→弱→强的3个阶段。同时,沿岸水团的分布也是影响广东沿岸上升流空间分布的重要因素。

参考文献:

[1] Tang D L, Kawamura H, Doan-Nhu H, et al. Remote sensing oceanography of a harmful algal bloom off the coast of southeastern Vietnam[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978-2012), 2004, 109(C3).

[2] 管秉贤. 中国近海的海流系统[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 1964.

Guan B X. The Current System of Chinese Offshore [D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 1964.

[3] 李立, 郭小钢, 吴日升. 台湾海峡南部的海洋锋[J]. 台湾海峡, 2000(2): 147-156.

Li L, Guo X G, Wu R S. Oceanic fronts in southern Taiwan Strait [J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 2000(2): 147-156.

[4] 曾流明. 粤东沿岸上升流迹象的初步分析[J]. 热带海洋, 1986(1): 68-73.

Zeng L M. A preliminary analysis of indicators of offshore upwelling off eastern Guangdong[J]. *Tropic Oceanology*, 1986(1): 68-73.

[5] 于文泉. 南海北部上升流的初步探讨[J]. 海洋科学, 1987(6): 7-10.

Yu W Q. A preliminary approach of the upwelling for the northern South China Sea[J]. *Marine Sciences*, 1987(6): 7-10.

[6] 韩舞鹰, 马克美. 粤东沿岸上升流的研究[J]. 海洋学报(中文版), 1988(1): 52-59.

Han W Y, Ma K M. A study of upwelling over continental shelf off eastern Guangdong[J]. *Acta Oceanologica*

Sinica, 1988(1): 52-59.

[7] Li L. Summer upwelling system over the northern continental shelf of the South China Sea: A physical description[C]//Su J, Chuang W S, Hsurh R Y (eds.). *Proceedings of the Symposium on the Physical and Chemical Oceanography of the China Seas*. Beijing: China Ocean Press, 1993: 58-68.

[8] 洪启明, 李立. 粤东陆架区夏季的上升流[J]. 台湾海峡, 1991(3): 79-85.

Hong Q M, Li L. A study of upwelling over continental shelf off eastern Guangdong[J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 1991(3): 79-85.

[9] Wang D, Luo L, Liu Y, et al. Seasonal and Interannual Variability of the Thermal Fronts in the Tonkin Gulf [C]. *International Society for Optics and Photonics*, 2003: 415-425.

[10] 肖晖. 台湾海峡西部沿岸上升流的研究[J]. 台湾海峡, 1988(2): 135-142.

Xiao H. Studies of coastal upwelling in western Taiwan strait[J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 1988(2): 135-142.

[11] 庄伟, 王东晓, 吴日升, 等. 2000年夏季福建、广东沿海上升流的遥感与船舶观测分析[J]. 大气科学, 2005(3): 438-444.

Zhuang W, Wang D X, Wu R S, et al. Coastal upwelling off eastern Fujian-Guangdong detected by remote sensing[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2005(3): 438-444.

[12] Blanke B, Speich S, Bentamy A, et al. Modeling the structure and variability of the southern Benguela upwelling using QuikSCAT wind forcing[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978-2012), 2005, 110(C7).

[13] 颜廷壮. 中国沿岸上升流成因类型的初步划分[J]. 海洋通报, 1991(6): 1-6.

Yan T Z. Features and classification of coastal upwellings off China[J]. *Marine Science Bulletin*, 1991(6): 1-6.

(责任编辑:米慧芝)

(上接第 314 页 Continue from page 314)

[8] 宋庆君, 唐军武. 黄海东海海区水体散射特性研究[J]. 海洋学报, 2006, 28(4): 56-63.

Song Q J, Tang J W. The study on the scattering properties in the Huanghai Sea and East China Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2006, 28(4): 56-63.

[9] 孙德勇, 李云梅, 乐成峰, 等. 太湖水体散射特性及其与悬浮物浓度关系模型[J]. 环境科学, 2007, 28(12): 2688-2694.

Sun D Y, Li Y M, Le C F, et al. Scattering characteristics of Taihu lake and its relationship models with suspended particle concentration[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(12): 2688-2694.

[10] Maffione R A, Dana D R. Instruments and methods for measuring the backward-scattering coefficient of ocean

waters[J]. *Proceeding of Applied Optics*, 1997, 36: 6057-6067.

[11] Anon. HydroScat-6 Spectral Backscattering Sensor User's Manual, Revision date: Jan 22, 2002 [EB/OL]. [2014-09-20]. www.hobilabs.com, 2002-01-22/2002-05-10.

[12] Lee Z P, Carderkl, Arnone R A. Deriving inherent optical properties from water color: A multiband quasi-analytical algorithm for optically deep waters[J]. *Applied Optical*, 2002, 41(27): 5755-5772.

(责任编辑:米慧芝)