

## 激光与光电子学进展

黄东海悬浮颗粒物质量比后向散射特性  
Mie 理论模拟与实证分析

曹爽, 韩冰\*, 朱建华, 李芝凤

国家海洋技术中心, 天津 300111

**摘要** 悬浮颗粒物的质量比后向散射系数( $b_{bp}^*$ )主要受颗粒物的成分、大小等因素影响,研究其变化特性对于揭示水体中颗粒物种类、时空分布以及提升水色遥感定量化精度等具有重要意义。本文利用 Mie 理论,对海水中常见的具有不同粒径分布、相对折射率及表观密度的多种藻类和无机矿物颗粒的质量比后向散射系数进行了模拟计算。研究发现:当粒径分布斜率 $\xi$ 相同时,无机矿物颗粒的平均 $b_{bp}^*$ 约为藻类颗粒的 2 倍; $\xi$  为 4.0 时,无机矿物颗粒和藻类颗粒在 532 nm 处的平均 $b_{bp}^*$ 分别为 $(9.12 \pm 3.18) \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $(4.09 \pm 0.48) \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ;藻类颗粒具有较低 $b_{bp}^*$ 的主要原因是其折射率实部较低。黄东海实测数据研究结果表明: $b_{bp}^*$ 的空间变异性低于后向散射系数,当无机颗粒质量浓度在总颗粒物中占主导时,平均 $b_{bp}^*$ (532)为 $8.46 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ;而有机颗粒物占主导时为 $3.63 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ,前者为后者的 2.3 倍。实测 $b_{bp}^*$ 随有机颗粒物质量浓度占比的增大呈乘幂函数形式减小,结合模拟结果,发现研究区水体颗粒物的粒径分布斜率 $\xi$ 的变化范围为 3.6~4.2,对于有机颗粒占主导的远岸水体, $\xi$  约为 3.9,而在长江入海口附近水域,悬浮颗粒物的质量比后向散射系数因受粒径分布变化的影响具有较大的变化幅度。

**关键词** 海洋光学; 质量比后向散射系数; Mie 理论; 粒径分布; 颗粒物组成; 黄东海

中图分类号 P76

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1301002

Mie Theory Simulation and Empirical Analysis of Mass-Specific  
Backscattering Properties of Suspended Particles in the  
Yellow and East China Seas

Cao Shuang, Han Bing\*, Zhu Jianhua, Li Zhifeng

National Ocean Technology Center, Tianjin 300111, China

**Abstract** The mass-specific backscattering coefficient ( $b_{bp}^*$ ) of suspended particles is mainly affected by their composition and sizes. Studying the variation characteristics of  $b_{bp}^*$  is of great significance to revealing the types and temporal and spatial distribution of such particles in waters and improving the quantitative accuracy of ocean color remote sensing. In this paper, the Mie theory is applied to calculate the  $b_{bp}^*$  of various common algae and inorganic mineral particles in seawater with different particle size distributions, relative refractive indexes, and apparent densities by simulation. It is found that the average  $b_{bp}^*$  of inorganic mineral particles is about twice that of algae particles when their particle size distribution slope  $\xi$  is the same. When  $\xi$  is 4.0, the  $b_{bp}^*$  of inorganic mineral particles and algae particles at 532 nm are  $(9.12 \pm 3.18) \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$  and  $(4.09 \pm 0.48) \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$  respectively. The lower  $b_{bp}^*$  value of algae particles can be explained by the lower real part of their refractive index. Research results of the measured data on the Yellow and East China Seas show that the spatial variability of  $b_{bp}^*$  is lower than that of the backscattering coefficient. When the mass concentration of inorganic particles is dominant in the total particles, the average  $b_{bp}^*$ (532) is  $8.46 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ , which is 2.3 times that,  $3.63 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$  to be specific, when organic particles dominate. The measured  $b_{bp}^*$  decreases in the form of power-law function as the mass concentration proportion of organic particles increases. In view of the simulation results, it is concluded that the variation range of the particle size distribution slope  $\xi$  of particles in the study waters is 3.6–4.2. In offshore waters dominated by organic particles,  $\xi$  is about 3.9. In the vicinity of the Yangtze River Estuary, the  $b_{bp}^*$  of the suspended particles varies greatly under the influence of the change in the particle size distribution.

收稿日期: 2022-02-06; 修回日期: 2022-02-19; 录用日期: 2022-02-28

基金项目: 中欧科技合作“龙计划”五期项目(59053)、国家重点研发计划(2016YFC1400906, 2016YFC1400903)

通信作者: hotrice@sina.com

**Key words** oceanic optics; mass-specific backscattering coefficient; Mie theory; particle size distribution; particle composition; the Yellow and East China Seas

## 1 引言

水体悬浮颗粒物的光学散射和后向散射是其重要的物理特性。对于海洋水色遥感而言,悬浮颗粒物在可见光范围内的后向散射是影响和改变水体光谱特征的主要因素。我国黄东海近海水体属于典型的二类水体,其后向散射特性主要由悬浮颗粒物决定,而悬浮颗粒物的含量、粒径分布、组成和形状等多种地球物理化学特征是导致后向散射系数( $b_{bp}$ )发生变化的因素<sup>[1]</sup>。在量值上, $b_{bp}$ 通常与总悬浮颗粒物质量浓度( $C_{SPM}$ )呈显著的正相关<sup>[2-6]</sup>,也就是说,后向散射系数是颗粒物含量的指示因子<sup>[7]</sup>。质量比后向散射系数( $b_{bp}^*$ )作为 $b_{bp}$ 与 $C_{SPM}$ 的比值,则反映了悬浮颗粒物后向散射的二阶变化<sup>[8]</sup>,更多体现的是颗粒物的折射率、粒径分布(PSD)、表观密度(粒子干重与湿体积之比)以及颗粒物组成等特征。由于受河流径流、陆源输入以及海流等多种因素的影响,实际水体中悬浮颗粒物的这些特性会呈现出显著的时空差异,这也使得颗粒物质量比后向散射特性成为目前水色遥感和水体光学领域的研究热点之一。

目前,针对 $b_{bp}^*$ 的研究主要集中在它的光谱形状和量值变化两个方面。1)光谱变化特征: $b_{bp}^*$ 随波长的增大而衰减。宋庆君等<sup>[9]</sup>通过分析黄东海实测数据发现乘幂模型光谱斜率的变化范围为0.61~1.99,且随 $C_{SPM}$ 的增大先减小后趋于平稳,据此建立了分段函数模型;Loisel等<sup>[10]</sup>结合海洋卫星观测结果和实测数据,得出从贫营养到富营养水域光谱斜率呈现总体减小的趋势。2)量值变化特征:周雯等<sup>[11]</sup>基于Mie理论对不同粒径分布和折射率的矿物质颗粒的质量比后向散射进行了模拟分析,发现 $b_{bp}^*$ 与折射率实部和粒径分布斜率呈显著的正相关;Neukermans等<sup>[5]</sup>基于欧洲近岸水体的多种实测数据集,分析了 $b_{bp}^*$ 与颗粒物表观密度、平均粒径以及颗粒物组成的相关性,发现 $b_{bp}^*$ 随颗粒物有机碳占总碳浓度的比例的增大而线性减小;Reynolds等<sup>[12]</sup>基于实测数据发现有有机颗粒物占主导的水体平均 $b_{bp}^*$ 最小 $[(7.2 \pm 3.0) \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}]$ ,有机和无机混合时次之 $[(9.1 \pm 6.0) \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}]$ ,无机占主导时最大 $[(13.7 \pm 10.0) \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}]$ 。综上所述可以看出, $b_{bp}^*$ 无论是在量值还是在光谱形状的变化都与颗粒物的状态存在一定的相关性。对于海水中普遍存在的悬浮颗粒物的散射而言,Mie散射理论具有非常好的模拟仿真能力,而且能够有效补充实测数据代表性不足的问题。因此,本文首先基于近海水体悬浮颗粒物的特征,利用Mie散射理论对海水中悬浮颗粒物的

后向散射效率( $Q_{bb}$ )和 $b_{bp}^*$ 进行了数值模拟,对比分析了藻类颗粒和无机矿物颗粒的 $b_{bp}^*$ ;然后,利用我国黄东海水域的生物光学实测数据,对理论模拟的结果进行了验证。研究结果可为揭示水体悬浮颗粒物组成、监测水域泥沙变化以及改进水色遥感算法精度等提供借鉴和指导。

## 2 数据与方法

### 2.1 研究区域和观测站位

选用2003年9月黄东海海上试验获取的现场实测数据。试验数据包括水体后向散射光谱、总悬浮颗粒物以及有机、无机悬浮颗粒物质量浓度等生物光学参数。此次试验共获取了63个站位的测量数据(图1),其中悬浮颗粒物样本分层采集,而后向散射为连续剖面测量。本文选取表层水体的悬浮物浓度和0~3 m深度内平均的后向散射系数作为研究数据。

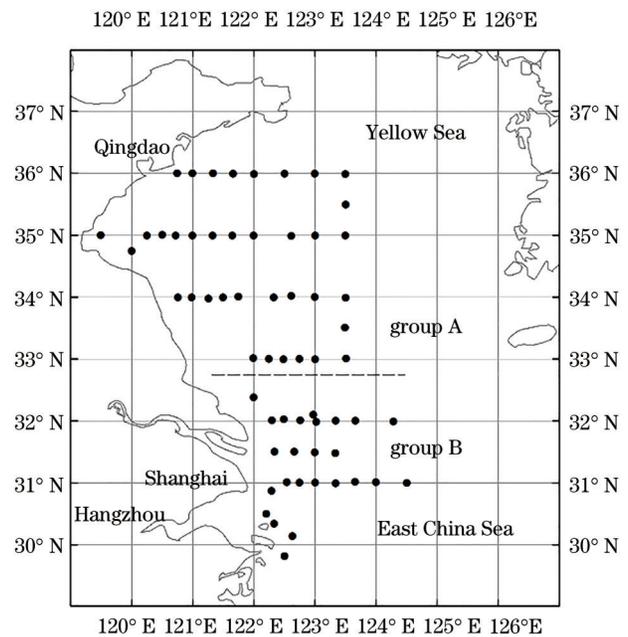


图1 2003年秋季黄东海试验站位示意图

Fig. 1 Diagram of observation station during the autumn cruise carried out in 2003 over the Yellow and East China Seas

水体后向散射是使用美国HOBILabs公司生产的6通道(442, 488, 532, 589, 676, 852 nm)后向散射仪HydroScat 6通过测量140°角处的散射相函数获得的,经异常点剔除以及sigma校正等处理得到悬浮颗粒物的后向散射系数<sup>[9]</sup>。悬浮颗粒物浓度采用称重法测定。海上试验期间,使用Niskin采水瓶采集表层(0~3 m之间)水体样本,将水样带回船上的湿实验室后,用Whatman GF/F玻璃纤维滤膜过滤水样,将

带有颗粒物的滤膜样本放入冰柜冷冻保存。试验结束后,经过恒温烘干、灼烧、称重等步骤,计算得到总悬浮颗粒物质量浓度( $C_{SPM}$ )、有机悬浮颗粒物质量浓度( $C_{POM}$ )和无机颗粒物质量浓度( $C_{PIM}$ )<sup>[13-14]</sup>,  $C_{SPM} = C_{POM} + C_{PIM}$ 。

悬浮颗粒物的质量比后向散射系数为后向散射系数  $b_{bp}$  与总悬浮颗粒物质量浓度  $C_{SPM}$  的比值,即

$$b_{bp}^*(\lambda) = \frac{b_{bp}(\lambda)}{C_{SPM}} \quad (1)$$

图 2 给出了各站点的质量比后向散射系数光谱。 $b_{bp}^*$  光谱随波长的变化通常用乘幂函数表征<sup>[9,12]</sup>,即  $b_{bp}^*(\lambda) = b_{bp}^*(\lambda_0) \left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right)^{-\eta}$ , 式中  $\lambda_0$  为参考波长,  $\eta$  为光谱斜率。表 1 为各参数的统计结果。

表 1 现场实测数据统计结果

Table 1 Statistical results of *in situ* measured data

Parameter	Minimum	Maximum	Average	Median	SD	CV / %
$b_{bp}(442)/(10^{-2} m^{-1})$	0.38	111.24	8.49	0.96	19.00	223.0
$b_{bp}(488)/(10^{-2} m^{-1})$	0.27	89.14	7.20	0.84	16.00	216.0
$b_{bp}(532)/(10^{-2} m^{-1})$	0.19	88.66	7.02	0.70	15.00	220.0
$b_{bp}(589)/(10^{-2} m^{-1})$	0.15	87.70	6.76	0.60	15.00	225.0
$b_{bp}(676)/(10^{-2} m^{-1})$	0.11	75.57	5.84	0.51	13.00	225.0
$b_{bp}(852)/(10^{-2} m^{-1})$	0.07	63.38	4.85	0.42	11.00	226.0
$C_{SPM}/(g \cdot m^{-3})$	0.40	95.30	8.91	1.90	18.00	197.0
$C_{PIM}/(g \cdot m^{-3})$	0.10	88.60	7.66	1.00	17.00	216.0
$C_{POM}/(g \cdot m^{-3})$	0.20	6.70	1.26	1.00	1.08	86.3
$C_{POM}/C_{SPM}/10^{-1}$	0.48	8.42	4.44	4.55	2.46	55.5
$b_{bp}^*$ spectral slop $\eta$	0.53	2.46	1.29	1.22	0.48	37.4
$b_{bp}^*(532)/(10^{-3} m^2 \cdot g^{-1})$	2.22	17.50	5.43	4.58	2.89	53.3
$b_{bp}^*(676)/(10^{-3} m^2 \cdot g^{-1})$	1.53	14.11	4.12	3.21	2.55	61.8

Notes: SD, Standard deviation; CV, Coefficient of variation.

## 2.2 Mie 散射理论模拟方法

### 2.2.1 Mie 散射理论原理

在自然水体中,悬浮颗粒物通常由不同种类、不同大小的单一颗粒组成,构成复杂多样且动态变化的系统,在某些情况下还会发生颗粒物的聚集、分裂现象。但对于均质、球形的颗粒而言,根据 Mie 散射理论,多粒径、多分散性的单一物质颗粒群的后向散射系数由后向散射效率( $Q_{bb}(\lambda, D, m)$ )和颗粒物粒径分布( $N(D)$ )所决定<sup>[15-17]</sup>,即

$$b_{bp}(\lambda) = \frac{\pi}{4} \int_{D_{min}}^{D_{max}} N(D) Q_{bb}(\lambda, D, m) D^2 dD \quad (2)$$

$Q_{bb}$  刻画了颗粒对入射到几何截面积的能量进行后向散射的能力,与入射光波长  $\lambda$ 、粒径大小  $D$ 、相对折射率  $m = n - in'$  有关,其中  $n$  表示折射率实部,  $n'$  表示虚部。 $Q_{bb}$  可以通过 Mie 理论精确计算出来<sup>[11,18]</sup>,具体表示为

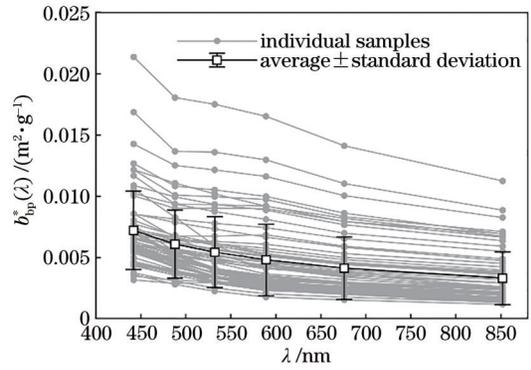


图 2 各采样点悬浮颗粒物质量比后向散射光谱及平均光谱 (平均值±标准差)

Fig. 2  $b_{bp}^*$  spectra for all of the data measured during the cruise, and the average spectrum shown with one standard deviation range ( $\bar{x} \pm s$ )

$$Q_{bb} = x^{-2} \int_{\pi/2}^{\pi} i(\theta, x, m) \sin \theta d\theta \quad (3)$$

式中:  $x = \pi D / \lambda$ ;  $i(\theta) = \frac{i_1(\theta) + i_2(\theta)}{2}$ ,  $i_1(\theta) = |S_1(\theta)|^2$ ,  $i_2(\theta) = |S_2(\theta)|^2$ ,  $S_1(\theta)$  和  $S_2(\theta)$  分别为散射光复振幅函数在垂直和平行两个方向的振幅分量,与散射角  $\theta$  有关,可表示为无穷项之和,即

$$S_1(\theta) = \sum_{N=1}^{\infty} \frac{2N+1}{N(N+1)} (\alpha_N \pi_N + \beta_N \tau_N) \quad (4)$$

$$S_2(\theta) = \sum_{N=1}^{\infty} \frac{2N+1}{N(N+1)} (\alpha_N \tau_N + \beta_N \pi_N) \quad (5)$$

式中:  $\alpha_N$  和  $\beta_N$  为 Mie 散射系数,与粒径参数  $x$  和相对折射率  $m$  有关;角方程系数  $\pi_N$  和  $\tau_N$  为散射角  $\theta$  的函数,由关于  $\cos \theta$  的一阶  $N$  次第一类缔合勒让德函数表示为

$$\pi_N(\theta) = \frac{P_N^{(1)}(\cos \theta)}{\sin \theta} \quad (6)$$

$$\tau_N(\theta) = \frac{dP_N^{(1)}(\cos \theta)}{d\theta} \quad (7)$$

在已知悬浮颗粒物表观密度  $\rho_a$  和粒径分布  $N(D)$  的情况下,质量比后向散射系数  $b_{bp}^*(\lambda)$  可表示为

$$b_{bp}^*(\lambda) = \frac{b_{bp}(\lambda)}{C_{SPM}} = \frac{b_{bp}(\lambda)}{V_c \rho_a} \quad (8)$$

式中,体积浓度为

$$V_c = \frac{\pi}{6} \int_{D_{min}}^{D_{max}} N(D) D^3 dD \quad (9)$$

式中,积分上下限  $D_{max}$  和  $D_{min}$  分别表示参与计算的颗粒群中最大和最小颗粒的直径。

### 2.3 参数设置

通常认为自然水体中的悬浮颗粒物的粒径分布遵

循 Junge 分布模型<sup>[15-17,19-20]</sup>,即

$$N(D) = KD^{-\xi} \quad (10)$$

式中: $\xi$ 为无量纲参数,表示  $\lg N$  随  $\lg D$  线性变化的斜率,称之为粒径分布斜率,其数值范围通常为 3~5<sup>[5,16]</sup>,平均情况下取  $\xi=4$ <sup>[17,19]</sup>;  $K$  为常数项,决定了颗粒数量级,表示粒子直径  $D$  为 1  $\mu\text{m}$  时的粒子数量。虽然  $K$  值在不同的水域存在较大的变化<sup>[13,21]</sup>,但结合式(8)、(9)和(10)可知  $K$  的取值不影响模拟的质量比后向散射系数,本研究假设  $K$  值为  $10^{12}$ 。

参考国内外的研究结果,确定本文 Mie 散射模拟时各输入参数的取值范围和步长(表 2)。同时,考虑到水样过滤时所使用的滤膜标称孔径为 0.7  $\mu\text{m}$ ,为了更准确地刻画体积浓度,在计算时设置颗粒群粒径的下限  $D_{min}$  为 0.7  $\mu\text{m}$ 。

表 2 Mie 模拟的主要参数设置

Table 2 Setting of main parameters of Mie calculations

Parameter	Value (Increments are given in parentheses)	Reference
$\lambda / \text{nm}$	442, 488, 532, 589, 676, 852	—
$D / \mu\text{m}$	0.02 (Set 200 points at logarithmic intervals) 200	Babin et al. <sup>[16]</sup> ; Zhou et al. <sup>[22]</sup>
$n$	1.01 (0.02) 1.27	Mobley <sup>[19]</sup> ; Bricaud et al. <sup>[23]</sup>
$n'$	0, 0.001, 0.005	Bricaud et al. <sup>[18]</sup> ; Ahn et al. <sup>[24]</sup>
$\xi$	3.0 (0.2) 5.0	Babin et al. <sup>[16]</sup>
$\rho_a / (10^6 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3})$	0.3 (0.3) 5.1	Woźniak et al. <sup>[17]</sup> ; Aas <sup>[25]</sup>

#### 2.3.1 近海常见有机和无机颗粒物

海水中的颗粒物可分为生物成因的有机颗粒和矿物成因的无机颗粒,有机颗粒物包括活体浮游生物(如病毒、细菌、浮游植物和浮游动物等)和非活性的有机碎屑。浮游植物是最主要的有机悬浮颗粒,因此本研究参考 Aas<sup>[25]</sup> 的研究结果选取绿藻(*Green algae*)、硅藻(*Diatoms*)、蓝藻(*Blue-green algae*)、甲藻(*Dinoflagellates*)和颗石藻

(*Coccolithophorids*)作为有机颗粒的代表。同时,选择近海水域较为常见的几种矿物颗粒作为无机颗粒的代表,分别为蛋白石(Opal)、石英(Quartz)、高岭石(Kaolinite)、蒙脱石(Montmorillonite)、方解石(Calcite)、三水铝石(Gibbsite)、伊利石(Illite)、绿泥石(Chlorite)和霏石(Aragonite)。活体藻(含水量为 60%)和矿物颗粒的相对折射率实部和表观密度分别见表 3 和表 4。

表 3 假设  $n'=0$ ,不同  $\xi$  对应的藻类颗粒的质量比后向散射系数  $b_{bp}^*(532)$

Table 3  $b_{bp}^*(532)$  values of different algal particles, assuming  $n'=0$  and  $\xi$  value as indicated

Algae particle type	$n$	$\rho_a / (10^6 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3})$	$b_{bp}^*(532) / (10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$		
			$\xi=3.8$	$\xi=4.0$	$\xi=4.2$
<i>Green algae</i>	1.0558	0.492	1.88	3.96	8.14
<i>Diatoms</i>	1.0566	0.614	1.55	3.27	6.72
<i>Blue-green algae</i>	1.0574	0.501	1.96	4.13	8.48
<i>Dinoflagellates</i>	1.0604	0.496	2.22	4.66	9.53
<i>Coccolithophorids</i>	1.0631	0.570	2.12	4.44	9.08
Average	1.0587	0.535	1.95	4.09	8.39

#### 2.3.2 黄东海混合颗粒物 $b_{bp}^*$ 的模拟方法

为进一步了解水体颗粒物组成对  $b_{bp}^*$  的影响,结合黄东海藻类的研究结果<sup>[26-29]</sup>,选择藻类最为主要的两大优势类群:硅藻和甲藻作为研究区有机颗粒的代表。Liu 等<sup>[29]</sup> 研究发现秋季南黄海水体表层硅藻细胞丰度为  $1.981 \times 10^3 \text{ L}^{-1}$ ,甲藻细胞丰度为  $0.259 \times 10^3 \text{ L}^{-1}$ ,

结合表观密度,得到相同粒径分布时,硅藻与甲藻的质量浓度之比约为 10:1,并将其作为模拟过程中两种有机颗粒的分配比例。同时,参考黄东海无机矿物颗粒的有关研究<sup>[30-32]</sup>,选择伊利石、绿泥石、高岭石、蒙脱石分别作为无机颗粒的代表,根据研究得出的 4 种矿物含量占比(表 5),取平均值作为本研究中无机颗粒的

表 4 假设  $n'=0$ , 不同  $\xi$  对应的近岸水体典型矿物颗粒的  $b_{bp}^*$  (532)

Table 4  $b_{bp}^*$  (532) of the typical mineral particles in coastal waters, assuming  $n'=0$  and  $\xi$  value as indicated

Mineral particle type	$n$	$\rho_a / (10^6 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3})$	$b_{bp}^* (532) / (10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$		
			$\xi=3.8$	$\xi=4.0$	$\xi=4.2$
Opal	1.075	1.90	0.94	1.95	3.93
Quartz	1.156	2.65	3.83	7.41	14.08
Kaolinite	1.164	2.65	4.30	8.30	15.73
Montmorillonite	1.167	2.50	4.72	9.13	17.32
Calcite	1.173	2.71	4.69	9.10	17.24
Gibbsite	1.177	2.42	5.49	10.67	20.25
Illite	1.179	2.80	4.87	9.46	17.94
Chlorite	1.206	3.00	6.09	11.93	22.65
Aragonite	1.218	2.83	7.18	14.16	27.00
Average	1.168	2.61	4.68	9.12	17.35

Notes: The real part of relative refractive index ( $n$ ) and apparent density ( $\rho_a$ ) of particles in the table are from Haynes<sup>[33]</sup>.

分配比例, 各组分质量分数分别为: 伊利石 62.00%、绿泥石 12.00%、高岭石 13.00%、蒙脱石 13.00%。在模拟过程中, 首先输入粒径分布参数、有机颗粒质量浓度占总颗粒物质量浓度的比值 ( $C_{POM}/C_{SPM}$ ) 以及混合颗粒物中不同种类颗粒的质量浓度占比, 列方程组计

算出每种颗粒物对应的  $K$  值。然后, 根据  $b_{bp}^*(\lambda) = \frac{\sum_{i=1}^6 b_{bp_i}(\lambda)}{\sum_{i=1}^6 V_{c_i} \rho_{a_i}}$  (式中  $i$  代表每种颗粒物类型), 得到混合颗粒物的质量比后向散射系数  $b_{bp}^*$  与颗粒物组分的变化关系。

表 5 黄东海主要的无机矿物种类和含量占比

Table 5 Type and content ratio of main inorganic minerals in the Yellow and East China Seas

Mineral particle type	Illite	Chlorite	Kaolinite	Montmorillonite	Reference
	61.00	17.06	13.94	8.00	Wei et al. <sup>[30]</sup>
Proportion / %	61.80	9.40	13.00	15.80	Song et al. <sup>[31]</sup>
	61.90	10.00	13.10	15.00	Zhang et al. <sup>[32]</sup>
Average / %	62.00	12.00	13.00	13.00	This study

### 3 分析与讨论

#### 3.1 模拟结果分析

##### 3.1.1 后向散射效率 $Q_{bb}$ 模拟结果

图 3、图 4 分别给出了不同波长、相对折射率实部

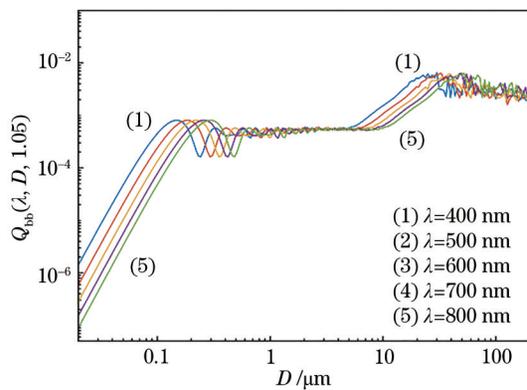


图 3 不同波长对球形均质颗粒的后向散射效率  $Q_{bb}$  随颗粒直径  $D$  的变化规律的影响

Fig. 3 Variations of backscattering efficiency  $Q_{bb}$  of spherical homogeneous particles with particle diameter  $D$  for various wavelengths

和虚部情况下,  $Q_{bb}$  随颗粒直径  $D$  的变化规律。首先从图中可以发现,  $Q_{bb}$  在粒径区间内存在两个较明显的峰, 分别位于  $D=2.00 \mu\text{m}$  两侧, 并在  $0.40 \mu\text{m}$  左右有一较小的谷值。总体上看,  $Q_{bb}$  随  $D$  的增大呈现出先增大后平稳的趋势。对于相同折射率的均质球形颗粒 (图 3), 当  $D < 0.20 \mu\text{m}$  时, 颗粒对波长的变化非常敏感, 随着波长的增大,  $Q_{bb}$  逐渐减小, 说明颗粒物对短波的后向散射能力强于长波。随着  $D$  的增大, 波长变化对  $Q_{bb}$  的影响逐渐消失。

从图 4(a) 可知, 随着相对折射率实部  $n$  的增大, 单一粒径颗粒的  $Q_{bb}$  逐渐增大,  $D < 2.00 \mu\text{m}$  范围内的  $Q_{bb}$  峰值对应的粒径位置变化不大, 始终位于  $0.20 \mu\text{m}$  处, 而  $D > 2.00 \mu\text{m}$  范围内的峰值位置向小粒径方向移动,  $Q_{bb}$  更快地趋于稳定。总之, 相同粒径时, 无机颗粒的后向散射能力强于有机颗粒。相对折射率虚部对  $Q_{bb}$  的影响与实部不同, 如图 4(b) 所示, 在给定波长处, 当  $D > 1.00 \mu\text{m}$  时, 随  $n'$  的增大,  $Q_{bb}$  减小得更快, 导致大粒径范围内的  $Q_{bb}$  波动峰逐渐消失。由此可见, 给定相同虚部时, 大颗粒的吸收削弱了其后的散射能力, 而小颗粒的吸收对后向散射的影响非常小。

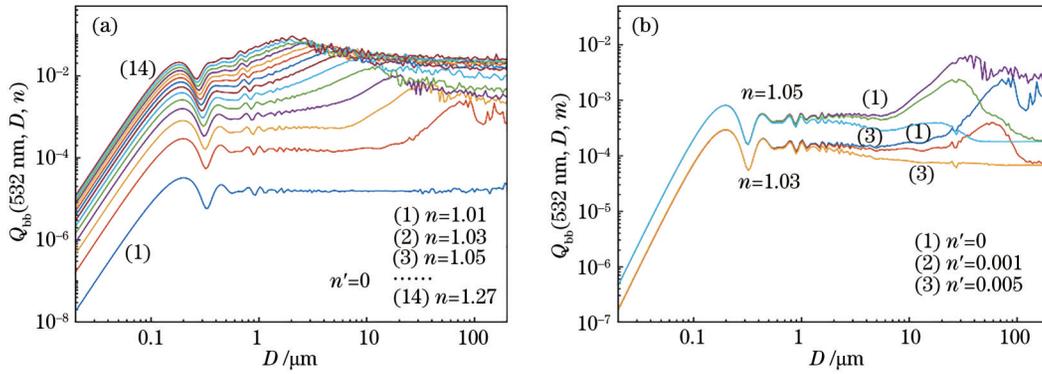


图 4 不同相对折射率实部  $n$  及折射率虚部  $n'$  对颗粒的后向散射效率  $Q_{bb}$  随颗粒直径  $D$  的变化规律的影响。(a) 相对折射率实部  $n$ ; (b) 相对折射率虚部  $n'$

Fig. 4 Variations of backscattering efficiency  $Q_{bb}$  with particle diameter  $D$  for various real part of relative refractive index  $n$  and imaginary part of relative refractive index  $n'$ . (a) Real part of relative refractive index  $n$ ; (b) imaginary part of relative refractive index  $n'$

### 3.1.2 有机和无机颗粒 $b_{bp}^*$ 对比及影响因素分析

#### 3.1.2.1 $b_{bp}^*$ 的比较

$b_{bp}^*$  模拟值随波长变化,但各波长的  $b_{bp}^*$  变化特征相似,因此本文主要以 532 nm 为例来说明  $b_{bp}^*$  的量值变化特征及影响机制。在模拟时,首先假设颗粒无吸收性,即  $n'=0$ ,不同种类的有机和无机颗粒群的质量比后向散射系数  $b_{bp}^*$  随粒径分布斜率  $\xi$  的变化如图 5 所示。 $b_{bp}^*$  量值随  $\xi$  的增大而增大。 $\xi$  从 3.0 到 5.0,每增大 0.2,  $b_{bp}^*$  增大 1/2 至 1 倍,即随着小粒径颗粒含量占比的增多,单位质量浓度颗粒物的后向散射能力逐渐增强。当  $\xi$  为 4.0 时,波长 532 nm 处无机(表 3)和有机颗粒群(表 4)的  $b_{bp}^*$  平均值分别为  $9.12 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$  和  $4.09 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ,前者约为后者的 2 倍。除蛋白石以外,相同  $\xi$  时,无机颗粒的  $b_{bp}^*$  (532) 均大于有机颗粒,

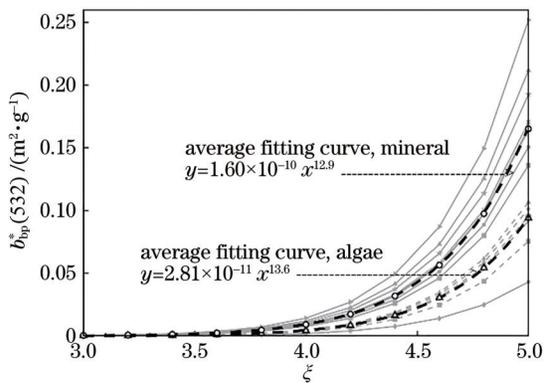


图 5 颗粒群的质量比后向散射系数  $b_{bp}^*$  (532) 与  $\xi$  的理论关系。图中浅色虚线表示藻类颗粒,浅色实线表示无机矿物颗粒,两条黑色虚线分别表示藻类颗粒和无机矿物颗粒在平均情况下的拟合曲线

Fig. 5 Theoretical relationship between  $b_{bp}^*$  (532) and  $\xi$ . In this figure, the light dashed lines represent the algae particles, the light solid lines represent the inorganic mineral particles, and the two black dotted lines represent the fitting curves of algae particles and inorganic mineral particles under the average condition

蛋白石具有较小的质量比后向散射的主要原因是其折射率较小,在数值上属于有机颗粒物的范畴。

#### 3.1.2.2 $\xi, n$ 和 $\rho_a$ 对 $b_{bp}^*$ 的影响

粒径分布斜率  $\xi$ 、相对折射率实部  $n$  以及表观密度  $\rho_a$  三者共同影响着  $b_{bp}^*$  量值,小粒子数量占比的增大以及高折射率无机矿物颗粒的增多均会使  $b_{bp}^*$  增大。由图 5 可知,  $b_{bp}^*$  随  $\xi$  的增大呈乘幂函数形式增大。图 6 刻画了  $b_{bp}^*$  (532) 随  $n$  和  $\rho_a$  的变化规律,其中  $b_{bp}^*$  随  $n$  的增大呈二次函数形式增长,而随  $\rho_a$  的增大而减小。理论上,颗粒物的相对折射率实部与表观密度具有正相关<sup>[16-17]</sup>,藻类颗粒虽然具有较低的  $\rho_a$ ,但  $n$  对  $b_{bp}^*$  的影响更大,从而导致  $b_{bp}^*$  较小。而对于由藻类和无机矿物颗粒构成的混合颗粒物,其  $b_{bp}^*$  量值则位于纯有机和纯无机颗粒群的  $b_{bp}^*$  之间。

#### 3.1.2.3 吸收作用对 $b_{bp}^*$ 的影响

由于藻类颗粒通常是具有吸收性的,因此设置两个虚部梯度:  $1.00 \times 10^{-3}$  和  $5.00 \times 10^{-3}$ , 分别代表吸收较弱和较强来分析颗粒的吸收作用对  $b_{bp}^*$  的影响。从表 6 可以看出,藻类颗粒的吸收会减弱后向散射,从而引起  $b_{bp}^*$  减小,该结论与 Woźniak 等<sup>[17]</sup> 的研究结果相一致。而且,颗粒物的吸收对  $b_{bp}^*$  的影响随  $\xi$  的增大而减小。当  $\xi$  较小时,即大颗粒数量占比较大时,藻类细胞的吸收作用对  $b_{bp}^*$  存在更大的影响,主要原因是  $Q_{bb}$  对大颗粒的吸收更为敏感,如图 4(b) 所示。当  $\xi$  为 4.0 时,相比于无吸收情况,相对折射率虚部为  $1.00 \times 10^{-3}$  和  $5.00 \times 10^{-3}$  时,硅藻的  $b_{bp}^*$  (532) 分别为  $3.15 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$  和  $3.01 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$  左右,变化率约为  $-3.6\%$  和  $-8.0\%$ 。由于 532 nm 处藻类细胞的折射率虚部通常小于 0.002<sup>[24]</sup>,因此折射率虚部对该波长处的  $b_{bp}^*$  影响较小。但值得注意的是,在 442 nm 以及 676 nm 处藻类颗粒具有吸收峰<sup>[34]</sup>,较强的吸收会引起  $b_{bp}^*$  较大幅度的减小,以绿藻纲 (*Chlorophyceae*) 中的杜氏藻 (*Dunaliella bioculata*) 为例,该藻种在两吸收峰处的折射率虚部分别约为 0.01 和 0.008<sup>[24]</sup>,图 7 为基于

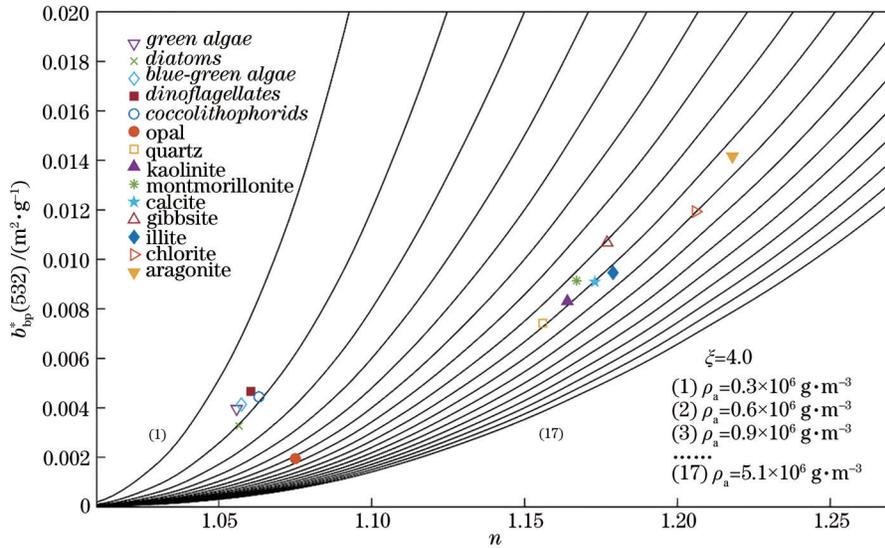


图 6  $\xi$  为 4.0 时, 表观密度  $\rho_a$  对  $b_{bp}^*(532)$  与颗粒物相对折射率实部  $n$  的理论关系的影响。图中标注的散点表示不同的藻类和无机矿物颗粒在其对应的  $n$  和  $\rho_a$  处的  $b_{bp}^*(532)$  理论值

Fig. 6 Theoretical relationship between  $b_{bp}^*(532)$  and the real part of the relative refractive index  $n$  of particles for various apparent density  $\rho_a$  when  $\xi$  is 4.0. The scattered points marked in the figure represent the  $b_{bp}^*(532)$  theoretical values of different algae and inorganic mineral particles at their corresponding  $n$  and  $\rho_a$

表 6 不同相对折射率虚部  $n'$  的  $b_{bp}^*(532)$  值及其变化率(与无吸收时相比,以硅藻为例)

Table 6  $b_{bp}^*(532)$  value at different imaginary parts of relative refractive index  $n'$  and its changing rate compared with the case without absorption, taking *Diatoms* as example

$\xi$	$b_{bp}^*(532) / (10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$ (Changing rate / %)	
	$n'=0.001$	$n'=0.005$
3.6	0.64 (-15.76)	0.55 (-28.11)
3.8	1.43 (-7.79)	1.31 (-15.38)
4.0	3.15 (-3.63)	3.01 (-7.99)
4.2	6.60 (-1.72)	6.44 (-4.18)
4.4	13.03 (-0.88)	12.84 (-2.27)

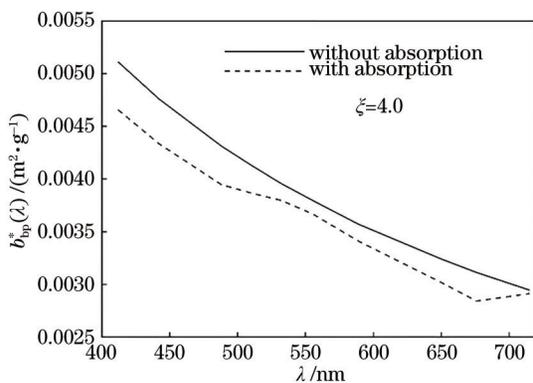


图 7 基于相对折射率虚部  $n'$  模拟的杜氏藻  $b_{bp}^*$  光谱

Fig. 7  $b_{bp}^*$  spectra of *Dunaliella bioculata* simulated under different  $n'$  value

Ahn<sup>[24]</sup>中给出的 *Dunaliella bioculata* 的相对折射率虚部光谱模拟出的  $b_{bp}^*(\lambda)$  光谱,  $\xi$  为 4 时, 从无吸收到有

吸收,  $b_{bp}^*(442)$  从  $4.76 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$  减小为  $4.34 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ,  $b_{bp}^*(676)$  从  $3.11 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$  减小为  $2.84 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ , 而且可以发现颗粒物吸收在波谱上的差异一定程度上导致了  $b_{bp}^*(\lambda)$  光谱的起伏。

### 3.2 实测数据分析

#### 3.2.1 统计与相关性分析

2003 年 9 月获取的黄东海颗粒物后向散射系数  $b_{bp}(532)$  的变化范围为  $0.0019 \sim 0.8866 \text{ m}^{-1}$  (表 1),  $C_{SPM}$  和  $C_{PIM}$  的变化为 2~3 个量级, 平均值分别为  $(8.91 \pm 17.56) \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$  和  $(7.66 \pm 16.56) \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。统计结果发现, 大多数站位的  $C_{SPM}$  和  $C_{PIM}$  均集中在  $0.4 \sim 5.0 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 均占比 75%, 约有 86% 的站点  $C_{POM}$  低于  $1.8 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 只有少数近岸站点水体具有较大的浑浊程度。有机颗粒物浓度占比 ( $C_{POM}/C_{SPM}$ ) 的变化范围为  $0.048 \sim 0.842$ , 表明该研究区水体有机颗粒与无机颗粒含量在空间构成上存在较大的变化。 $b_{bp}(532)$  与  $C_{SPM}$ 、 $C_{PIM}$ 、 $C_{POM}$  均表现为显著的正相关(表 7), 由此可见, 颗粒物质量浓度的变化直接影响后向散射系数的大小。

质量比后向散射系数在空间上存在一定的变异性, 研究区  $b_{bp}^*(532)$  在  $0.0022 \sim 0.0175 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$  之间变化, 平均值为  $(5.43 \pm 2.89) \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ , 该数值位于 Martinez-Vicente 等<sup>[35]</sup> 得出的  $b_{bp}^*(532) = (3.4 \pm 0.8) \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$  和 Loisel 等<sup>[36]</sup> 得出的  $b_{bp}^*(532) = (6.5 \pm 2.5) \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$  之间。 $b_{bp}^*(532)$  的变异系数(CV 为 53%) 低于后向散射系数  $b_{bp}(532)$  (CV 为 220%), 与姜玲玲等<sup>[37]</sup> 的研究结果相一致, 这表明通过标准化, 较大程度地削弱了  $b_{bp}$  对  $C_{SPM}$  的依赖。由  $b_{bp}^*(532)$  光谱(图 2) 可以发现有些站点没有呈现出严格的乘幂衰减趋势, 且这些站点主要位于近岸水域, 体现出近岸浑浊

表 7 实测数据相关性分析 ( $P < 0.05$ )

Table 7 Correlation analysis of *in situ* measured data ( $P < 0.05$ )

Parameter	$C_{SPM}$	$C_{PIM}$	$C_{POM}$	$C_{POM}/C_{SPM}$	$b_{bp}(532)$	$b_{bp}^*(532)$	$\eta$
$C_{SPM}$	1.00						
$C_{PIM}$	1.00	1.00					
$C_{POM}$	0.93	0.92	1.00				
$C_{POM}/C_{SPM}$	-0.62	-0.62	-0.58	1.00			
$b_{bp}(532)$	0.96	0.96	0.87	-0.61	1.00		
$b_{bp}^*(532)$	0.43	0.43	0.37	-0.62	0.58	1.00	
$\eta$	-0.51	-0.50	-0.61	0.75	-0.48	-0.54	1.00

水体  $b_{bp}^*$  光谱特征的复杂性,本研究认为光谱的这种变化与粒径分布以及颗粒物的吸收性质等有关。研究区光谱斜率  $\eta$  的变化范围为 0.53~2.46,平均值为 1.29,研究发现  $\eta$  随  $C_{SPM}$  的增大呈现出先减小后趋于稳定的

特点,可采用分段函数来描述,如图 8(a)所示;而  $\eta$  随  $C_{POM}/C_{SPM}$  的增大呈线性增大,如图 8(b)所示。总体上看,在有机颗粒物占主导的水域,  $b_{bp}^*(\lambda)$  随波长的衰减更明显。

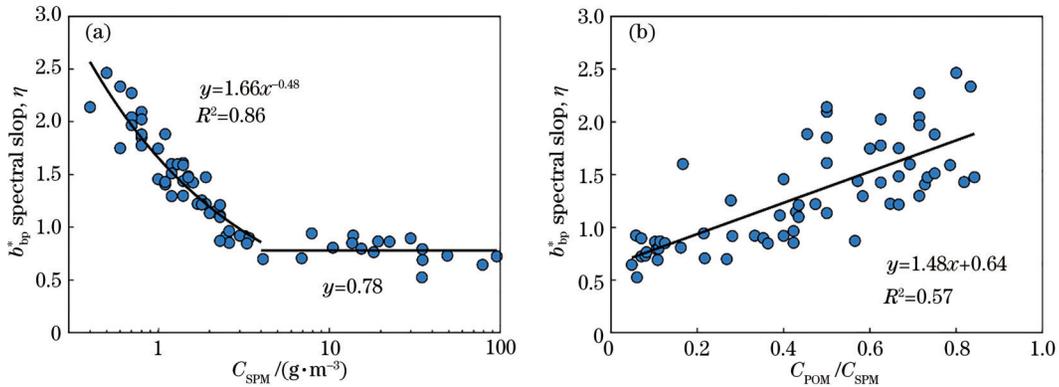


图 8  $b_{bp}^*$  光谱斜率  $\eta$  与颗粒物特征参数的关系。(a)  $\eta$  与悬浮颗粒物浓度  $C_{SPM}$ ; (b)  $\eta$  与有机颗粒物质量浓度占比  $C_{POM}/C_{SPM}$

Fig. 8 Relationship between  $b_{bp}^*$  spectral slope  $\eta$  and characteristic parameters of particles. (a)  $\eta$  versus suspended particle concentration  $C_{SPM}$ ; (b)  $\eta$  versus the proportion of organic particles mass concentration  $C_{POM}/C_{SPM}$

### 3.2.2 颗粒物组成对 $b_{bp}^*$ 量值的影响分析

$b_{bp}(532)$  与  $C_{SPM}$  的关系可用乘幂模型来刻画:  $b_{bp}(532) = 3.9 \times 10^{-3} C_{SPM}^{1.2}$ ,  $R^2 = 0.91$ ,模型的斜率接近于 1,表明后向散射系数与  $C_{SPM}$  的关系接近于线性模型。研究发现,相比于有机颗粒物占主导 ( $C_{POM}/C_{SPM} > 0.7$ ),无机颗粒物占主导时 ( $C_{POM}/C_{SPM} < 0.2$ ) 的乘幂模型斜率更大(图 9),该结论与 Reynolds 等<sup>[12]</sup> 的研究结果相一致。相比于其他生物量参数,  $b_{bp}^*$  与  $C_{POM}/C_{SPM}$  的相关性更强(表 7),二者显著的负相关表明有机颗粒物质量浓度占比的增大会引起  $b_{bp}^*$  的减小,该结论证实了模拟得到的纯无机颗粒的  $b_{bp}^*$  量值大于纯有机颗粒的可靠性。

在现场水体测量时,颗粒物的折射率不容易准确获取,但颗粒物组分构成可以很好地指示折射率和表观密度的变化情况。随  $C_{POM}/C_{SPM}$  的增大,混合颗粒群的相对折射率实部和表观密度逐渐减小。基于黄东海典型藻类和无机矿物颗粒物的组成情况,模拟结果表明,当  $\xi$  一定时,  $b_{bp}^*$  随  $C_{POM}/C_{SPM}$  的增大呈线性减小(图 10)。表 8 为模拟的  $b_{bp}^*(532)$  与  $C_{POM}/C_{SPM}$  的关系模型 ( $b_{bp}^*(532) = c_1 C_{POM}/C_{SPM} + c_2$ ),研究发现随着  $\xi$  的

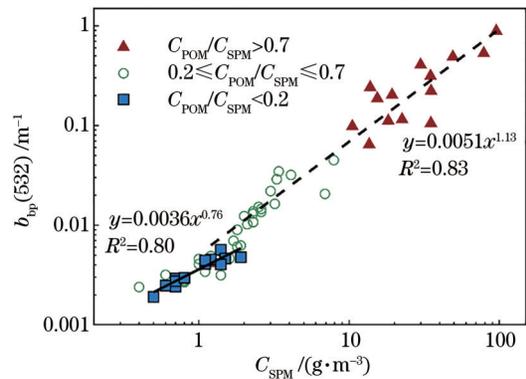


图 9  $b_{bp}(532)$  与  $C_{SPM}$  在对数坐标系内的关系

Fig. 9 Relationship between  $b_{bp}(532)$  and  $C_{SPM}$  in the logarithmic coordinate system

增大,  $b_{bp}^*$  与  $C_{POM}/C_{SPM}$  线性模型的斜率的绝对值逐渐增大,表明小颗粒数量占比越大,颗粒物组成对  $b_{bp}^*$  的影响越显著。

与模拟结果相一致,实测数据中,无机颗粒物占主导 ( $C_{POM}/C_{SPM} < 0.2$ ) 时的  $b_{bp}^*(532)$  (平均值为  $8.46 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ) 约为有机颗粒占主导 ( $C_{POM}/C_{SPM} > 0.7$ ) 时

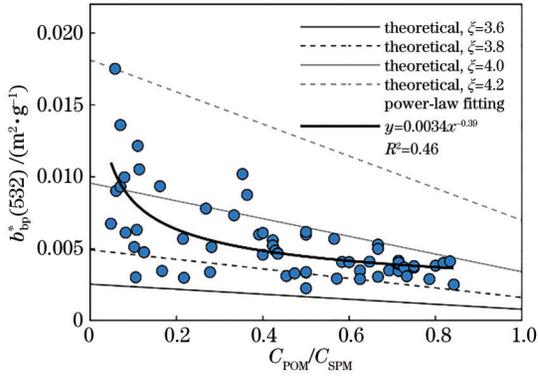


图 10  $b_{bp}^*(532)$  与  $C_{POM}/C_{SPM}$  的关系模型。图中的虚线和细实线表示不同的  $\xi$  时混合颗粒物的  $b_{bp}^*(532)$  模拟结果, 圆形散点表示现场采样点, 粗实线表示现场数据的乘幂函数拟合结果

Fig. 10 Relational model between the measured  $b_{bp}^*(532)$  and  $C_{POM}/C_{SPM}$ . The dashed line and thin solid line in the figure represent the simulation results with different values of particle size distribution slopes  $\xi$ , the circular scatter points represent *in situ* sampling points, and the bold solid line represents the power-law fitting results for *in situ* data

$b_{bp}^*(532)$  (平均值为  $3.63 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ) 的 2.3 倍, 且与 Neukermans 等<sup>[5]</sup> 的研究结果相近。乘幂函数可较好地拟合实测  $b_{bp}^*$  与  $C_{POM}/C_{SPM}$  之间的关系, 具体可表示为

$$b_{bp}^*(532) = 3.4 \times 10^{-3} \times \left( \frac{C_{POM}}{C_{SPM}} \right)^{-0.39} \quad (11)$$

根据模拟与实测结果的对比 (图 10), 可以推测出研究区水体的粒径分布斜率  $\xi$  值为 3.6~4.2, 对于有机占主导的远岸水体, 即  $C_{POM}/C_{SPM}$  较大时, PSD 斜率  $\xi$  位于 3.9 附近, 且质量比后向散射值较为稳定。然而, 当无机颗粒占比大时,  $b_{bp}^*(532)$  存在较高值和较低值, 实测数据点较为分散。由于总体样本点

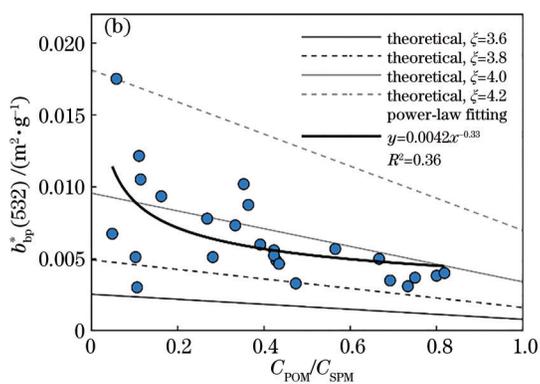
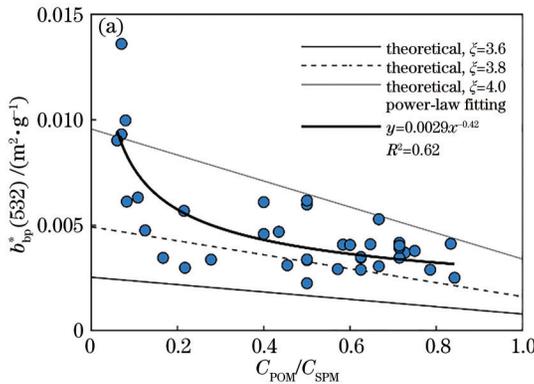


图 11 A 组数据和 B 组数据的  $b_{bp}^*(532)$  与  $C_{POM}/C_{SPM}$  的关系模型。(a) Group A; (b) group B

Fig. 11 Relational model between the measured  $b_{bp}^*(532)$  and  $C_{POM}/C_{SPM}$  for the group A and group B. (a) Group A; (b) group B

## 4 结 论

悬浮颗粒物质量比后向散射系数  $b_{bp}^*$  与颗粒群粒

表 8 以不同的  $\xi$  模拟得到的混合颗粒物的  $b_{bp}^*(532)$  与  $C_{POM}/C_{SPM}$  的线性拟合关系模型 ( $b_{bp}^*(532) = c_1 C_{POM}/C_{SPM} + c_2$ ) 的系数

Table 8 Coefficients of the linear fitting relationship ( $b_{bp}^*(532) = c_1 C_{POM}/C_{SPM} + c_2$ ) between  $C_{POM}/C_{SPM}$  ratio and  $b_{bp}^*(532)$  of the mixed particles simulated by assuming different  $\xi$

$\xi$	$c_1$	$c_2$
3.6	-0.0017	0.0025
3.8	-0.0033	0.0049
4.0	-0.0062	0.0096
4.2	-0.0113	0.0182
4.4	-0.0198	0.0333

包括黄海和东海部分海域, 故将样本点分为 2 组, 即主要位于黄海水域的 A 组和主要位于东海长江入海口附近水域的 B 组 (图 1)。研究发现, A 组水体的质量比后向散射系数随  $C_{POM}/C_{SPM}$  的增大表现出较为稳定的乘幂函数关系, 即先迅速减小而后趋于稳定, 如图 11(a) 所示, 拟合模型为  $b_{bp}^*(532) = 2.9 \times 10^{-3} \times \left( \frac{C_{POM}}{C_{SPM}} \right)^{-0.42}$  ( $R^2 = 0.62$ )。但是 B 组数据由于受到入海口处陆源输入的影响, 以及颗粒物聚集效应引起的颗粒群在粒径范围与分布上的变化, 使得数据点呈现出比较高的离散度, 如图 11(b) 所示, 这也是总体样本点在近岸水域变异性较大的原因。关于这些影响, 通过模拟发现颗粒群中粒径下限  $D_{min}$  的增大会引起  $b_{bp}^*$  的减小, 而上限  $D_{max}$  减小会引起  $b_{bp}^*$  的增大, 同时颗粒聚集所引起的质量比后向散射的变化较为复杂, 与粒径本身的大小以及相对应的后向散射效率  $Q_{bb}$  的变化有关, 如 5 个  $D = 0.02 \mu\text{m}$  的小颗粒相聚合会导致该颗粒群的  $b_{bp}^*$  增大, 而 5 个  $D = 2.00 \mu\text{m}$  的较大颗粒相聚合会导致  $b_{bp}^*$  的减小。

颗粒的减少会使  $b_{bp}^*$  增大;  $\xi$  的变化意味着颗粒群中小颗粒的数量占比的变化, 随着  $\xi$  的增大,  $b_{bp}^*$  呈乘幂函数形式增大。无机矿物颗粒具有较大的相对折射率实部和表观密度, 相比于表观密度(负相关), 相对折射率实部(正相关)对  $b_{bp}^*$  的影响更大, 从而无机矿物颗粒的  $b_{bp}^*$  大于藻类颗粒, 且大约为 2 倍的关系。同时, 颗粒物的吸收不仅会导致  $b_{bp}^*$  在量值上的减小, 而且会引起  $b_{bp}^*$  光谱的起伏。质量比后向散射可以反映水体颗粒物的组成情况, 无机颗粒浓度占比较高的近岸水体的  $b_{bp}^*$  光谱斜率较远岸小,  $b_{bp}^*$  量值随  $C_{POM}/C_{SPM}$  的增大呈乘幂形式减小。基于模拟结果, 研究发现远岸水体的粒径分布斜率值在 3.9 附近, 而对于无机颗粒占主导的近岸水体, 实测  $b_{bp}^*$  数据点较为分散, 其主要原因在于长江入海口处水体受到陆源输入以及颗粒聚集效应的影响, 从而导致悬浮颗粒物的粒径分布复杂多变。此外, 由于 Mie 理论模拟基于颗粒为球形均质的假设, 因此, 未来可引入实测粒径分布信息和表达颗粒形状与结构的模型来更为深入地研究颗粒物特征参数对质量比后向散射的影响机制。

## 参 考 文 献

- [1] Stramski D, Boss E, Bogucki D, et al. The role of seawater constituents in light backscattering in the ocean[J]. *Progress in Oceanography*, 2004, 61(1): 27-56.
- [2] 沈晓晶, 丘仲锋, 孙德勇, 等. 黄渤海悬浮颗粒物散射特性研究[J]. *广西科学*, 2015, 22(3): 308-314, 321.  
Shen X J, Qiu Z F, Sun D Y, et al. Light scattering properties of suspended particulate matter in Yellow Sea and Bohai Sea[J]. *Guangxi Sciences*, 2015, 22(3): 308-314, 321.
- [3] 朱晶晶, 张靖玮, 毛颖, 等. 基于 Landsat-8 OLI 的长江口青草沙水库悬浮颗粒物时空分布研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(22): 2201001.  
Zhu J J, Zhang J W, Mao Y, et al. Temporal and spatial distribution of suspended particles in qingcaosha reservoir of the Yangtze River Estuary based on Landsat-8 OLI[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(22): 2201001.
- [4] Boss E, Taylor L, Gilbert S, et al. Comparison of inherent optical properties as a surrogate for particulate matter concentration in coastal waters[J]. *Limnology and Oceanography: Methods*, 2009, 7(11): 803-810.
- [5] Neukermans G, Loisel H, Mériaux X, et al. *In situ* variability of mass-specific beam attenuation and backscattering of marine particles with respect to particle size, density, and composition[J]. *Limnology and Oceanography*, 2012, 57(1): 124-144.
- [6] Woźniak S B, Sagan S, Zabłocka M, et al. Light scattering and backscattering by particles suspended in the Baltic Sea in relation to the mass concentration of particles and the proportions of their organic and inorganic fractions[J]. *Journal of Marine Systems*, 2018, 182: 79-96.
- [7] 娄全胜, 张纯超, 邓伟, 等. 基于半分析算法的海岸带和内陆水体悬浮物浓度遥感估算[J]. *光学学报*, 2021, 41(19): 1901003.  
Lou Q S, Zhang C C, Deng W, et al. Remote sensing estimation of suspended solids concentrations in coastal and inland waters based on quasi-analytical algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(19): 1901003.
- [8] Wang S Q, Qiu Z F, Sun D Y, et al. Light beam attenuation and backscattering properties of particles in the Bohai Sea and Yellow Sea with relation to biogeochemical properties[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2016, 121(6): 3955-3969.
- [9] 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(中文版)*, 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.
- [10] Loisel H, Nicolas J M, Sciandra A, et al. Spectral dependency of optical backscattering by marine particles from satellite remote sensing of the global ocean[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2006, 111(C9): C09024.
- [11] 周雯, 曹文熙, 李彩. 海水中矿物质颗粒吸收和散射特性 Mie 理论分析[J]. *热带海洋学报*, 2008, 27(1): 22-26.  
Zhou W, Cao W X, Li C. Modeling absorption and scattering properties of mineral particles suspended in seawater based on Mie theory[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2008, 27(1): 22-26.
- [12] Reynolds R A, Stramski D, Neukermans G. Optical backscattering by particles in arctic seawater and relationships to particle mass concentration, size distribution, and bulk composition[J]. *Limnology and Oceanography*, 2016, 61(5): 1869-1890.
- [13] 彭田. 黄渤海悬浮颗粒物吸收散射效率分布特征及影响因素研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2016.  
Peng T. Distribution features and influencing factors in the absorption and scattering efficiencies of suspended particulate matters in the Yellow Sea and Bohai Sea[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2016.
- [14] Zhang M W, Tang J W, Song Q J, et al. Backscattering ratio variation and its implications for studying particle composition: a case study in Yellow and East China Seas[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2010, 115(C12): C12014.
- [15] Twardowski M S, Boss E, Macdonald J B, et al. A model for estimating bulk refractive index from the optical backscattering ratio and the implications for understanding particle composition in case I and case II waters[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2001, 106(C7): 14129-14142.
- [16] Babin M, Morel A, Fournier-Sicre V, et al. Light scattering properties of marine particles in coastal and open ocean waters as related to the particle mass concentration[J]. *Limnology and Oceanography*, 2003, 48(2): 843-859.
- [17] Woźniak S B, Stramski D. Modeling the optical properties of mineral particles suspended in seawater and

- their influence on ocean reflectance and chlorophyll estimation from remote sensing algorithms[J]. Applied Optics, 2004, 43(17): 3489-3503.
- [18] Bricaud A, Morel A. Light attenuation and scattering by phytoplanktonic cells: a theoretical modeling[J]. Applied Optics, 1986, 25(4): 571.
- [19] 柯蒂斯·莫布利. 光与水: 自然水体辐射传输[M]. 方圣辉, 译. 武汉: 武汉大学出版社, 2009: 37-39.  
Mobley C D. Light and water: radiative transfer in natural waters[M]. Fang S H, Transl. Wuhan: Wuhan University Press, 2009: 37-39.
- [20] Boss E, Twardowski M S, Herring S. Shape of the particulate beam attenuation spectrum and its inversion to obtain the shape of the particulate size distribution[J]. Applied Optics, 2001, 40(27): 4885-4893.
- [21] 李敏敏. 我国典型近岸水体悬浮颗粒物后向散射特性研究: 以黄东海为例[D]. 天津: 国家海洋技术中心, 2013.  
Li M M. Research on backscattering characteristics of suspended particle matter in typical coastal waters: a case of Yellow Sea and East China Sea[D]. Tianjin: National Ocean Technology Center, 2013.
- [22] 周雯, 曹文熙, 李彩. 浮游植物的吸收和散射特性: 理论模型[J]. 光学技术, 2007, 33(2): 177-180.  
Zhou W, Cao W X, Li C. Light absorption and scattering properties of phytoplankton: a theoretical modeling[J]. Optical Technique, 2007, 33(2): 177-180.
- [23] Bricaud A, Roesler C, Zaneveld J R V. *In situ* methods for measuring the inherent optical properties of ocean waters[J]. Limnology and Oceanography, 1995, 40(2): 393-410.
- [24] Ahn Y H, Bricaud A, Morel A. Light backscattering efficiency and related properties of some phytoplankters [J]. Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers, 1992, 39(11/12): 1835-1855.
- [25] Aas E. Refractive index of phytoplankton derived from its metabolite composition[J]. Journal of Plankton Research, 1996, 18(12): 2223-2249.
- [26] 郭术津, 孙军, 张辉, 等. 2011年秋季北黄海浮游植物群落[J]. 天津科技大学学报, 2013, 28(1): 22-29.  
Guo S J, Sun J, Zhang H, et al. Phytoplankton communities in the northern Yellow Sea in autumn 2011[J]. Journal of Tianjin University of Science & Technology, 2013, 28(1): 22-29.
- [27] 田伟, 孙军. 2009年晚春黄海南部浮游植物群落[J]. 海洋科学, 2011, 35(6): 19-24.  
Tian W, Sun J. Later spring phytoplankton community in southern Yellow Sea in 2009[J]. Marine Sciences, 2011, 35(6): 19-24.
- [28] 张翠霞, 陈婷, 黄晓, 等. 2011年夏季北黄海浮游植物群落[J]. 海洋湖沼通报, 2014(1): 81-93.  
Zhang C X, Chen T, Huang X, et al. Phytoplankton communities in the northern Yellow Sea in summer, 2011 [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2014 (1): 81-93.
- [29] Liu H J, Huang Y J, Zhai W D, et al. Phytoplankton communities and its controlling factors in summer and autumn in the southern Yellow Sea, China[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2015, 34(2): 114-123.
- [30] 魏建伟, 石学法, 辛春英, 等. 南黄海黏土矿物分布特征及其指示意义[J]. 科学通报, 2001, 48(S1): 30-33.  
Wei J W, Shi X F, Xin C Y, et al. Distribution characteristics of clay minerals in the South Yellow Sea and its indicative significance[J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 48(S1): 30-33.
- [31] 宋召军, 张志珣, 余继峰, 等. 南黄海表层沉积物中粘土矿物分布及物源分析[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2008, 27(3): 1-4.  
Song Z J, Zhang Z X, Yu J F, et al. Study on distribution and material sources of clay minerals in surface sediments of the southern Yellow Sea[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2008, 27(3): 1-4.
- [32] 张宪军. 南黄海中西部全新世沉积特征及物源分析[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008.  
Zhang X J. Sedimentary characteristics and sediments origin in the middle-western area of the south Yellow Sea in China since the Holocene[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2008.
- [33] Haynes W M. CRC handbook of chemistry and physics [M]. 97th ed. Boca Raton: CRC Press, 2016.
- [34] 李楠, 孙德勇, 环宇, 等. 黄渤海浮游植物种群比吸收光谱的确定及其应用[J]. 光学学报, 2020, 40(6): 0601004.  
Li N, Sun D Y, Huan Y, et al. Determination and application of specific absorption spectra of phytoplankton species in Yellow Sea and Bohai Sea[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(6): 0601004.
- [35] Martinez-Vicente V, Land P E, Tilstone G H, et al. Particulate scattering and backscattering related to water constituents and seasonal changes in the Western English Channel[J]. Journal of Plankton Research, 2010, 32(5): 603-619.
- [36] Loisel H, Mériaux X, Poteau A, et al. Analyze of the inherent optical properties of French Guiana coastal waters for remote sensing applications[J]. Journal of Coastal Research, 2009, 56(S1): 1532-1536.
- [37] 姜玲玲, 段家辉, 王林, 等. 渤海近岸水体悬浮颗粒物对后向散射特性的影响研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(1): 156-163.  
Jiang L L, Duan J H, Wang L, et al. The influence of suspended particles on backscattering properties in the coastal waters of Bohai Sea[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2021, 41(1): 156-163.