

大亚湾水体后向散射比率的光谱变化

周雯¹, 曹文熙¹, 杨跃忠¹, 王桂芬¹, 赵俊^{1,2}, 孙兆华^{1,2}, 许占堂^{1,2}

(1. 中国科学院南海海洋研究所热带海洋动力学重点实验室, 广东 广州 510301; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 采用 2007 年 5 月大亚湾浮标定点航次采集的生物-光学数据, 分析了大亚湾水体后向散射比率的光谱变化及其影响因素。分析结果表明, 660nm 处后向散射比率变化范围在 0.0040—0.0245 之间, 均值为 0.0082 ± 0.0032 , 实测后向散射比率光谱波段间的相对变化不超过 15%; 颗粒后向散射比率随着叶绿素 a 浓度增加呈减小的趋势, 高叶绿素浓度显著对应较低的后向散射比率; 粒径是影响大亚湾水体后向散射比率的重要因素之一, 随着水体中 Junge 粒级斜率的增大, 颗粒后向散射比率显著增大; 折射率的变化也对后向散射比率产生一定影响, 类似的水体粒径分布情况下, 浮游植物与非藻类物质相对贡献的变化将导致折射率的明显变化, 并将主导水体后向散射比率的变化。

关键词: 后向散射比率; 光谱变化; 颗粒粒径分布; 颗粒折射率

中图分类号: P733.3 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2010)02-0039-07

Spectral variability of particulate backscattering ratio in the Daya Bay

ZHOU Wen¹, CAO Wen-xi¹, YANG Yue-zhong¹, WANG Gui-fen¹, ZHAO Jun^{1,2}, SUN Zhao-hua^{1,2}, XU Zhan-tang^{1,2}

(1. LED, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China; 2. Graduate Univ. of Chinese Academy of Sciences, Beijing 10039, China)

Abstract: Variability of particulate backscattering ratio and its interpretation were examined using in-situ measurements performed during May 2007 in the Daya Bay. The results indicated that the particulate backscattering ratio values range between 0.004 and 0.0245, with a mean value of 0.0082 ± 0.0032 . There was some spectral dependence of the particulate backscattering ratio, and less than 15% variability between wavelengths was estimated. A global decreasing of particulate backscattering ratio with increasing chlorophyll concentration was visible, and the low backscattering ratios were observed in water with high chlorophyll concentration. Particle-size distribution slope was the main factor controlling the variability of particles backscattering ratio: The particle backscattering ratio increased with particle-size distribution slope. Average particle refractive index was another influencing factor. With similar particle-size distribution, the amount of non-pigment material relative to phytoplankton that was characterized by the variability of refractive index had a strong effect on particulate backscattering ratio.

Key words: backscattering ratio; spectral variability; particle-size distribution; refractive index

颗粒后向散射比率 \bar{b}_{bp} , 即水体中颗粒群产生的后向散射与总散射的比值, 是海洋光学、海洋水色遥感科学研究及应用的基础。后向散射比率估算的颗粒散射相函数是水体辐射传输方程的关键输入参量之一^[1], 可直接影响到水下光辐射传输及光场分布; 颗粒后向散射比率也是水色遥感反演半分析算

法中的关键参量之一, 这类算法通常采用假设恒定的后散射比率光谱和散射系数的乘积来参数化水体的后向散射系数^[2-3]; 此外, 后向散射比率的变化包含了水体颗粒的组分及粒级信息, 如 Ulloa 等^[4]基于 Mie 理论分析提出后向散射比率取决于颗粒群中大粒径和小粒子的相对比例; Twardowski 等^[5]基于后

收稿日期: 2009-05-06; 修订日期: 2009-11-09。孙淑杰编辑

基金项目: 中国科学院重要方向性项目(KZCX2-YW-215); 国家自然科学基金项目(40906022; 40606011; 40906021; U09333005)

作者简介: 周雯(1982—), 女, 湖南省邵阳市人, 助理研究员, 主要从事海洋光学技术的研究。wenzhou@scsio.ac.cn

向散射比率和粒径分布建立了折射率估算模型。因此, 水体后向散射比率研究得到越来越多的关注。

早期基于 Mie 理论的模拟分析结果, Ulloa 等^[4]认为后向散射比率的光谱较为平缓; MacDonald 等^[6]通过实测数据发现, California 湾水体的颗粒后向散射比率波长间变化不到 10%; Chami 等^[7]采用固定平台获取的实测数据, 也发现黑海水体在 443nm、490nm 和 555nm 波段的后向散射比率变化不到 4%, 但是部分数据也表明后向散射比率光谱的显著变化; McKee 等^[8]在研究 Irish 和 Celtic 海域水体时观测到 470nm 和 676nm 波段处后向散射比率的显著变化; Whitmire 等^[9]基于 5 个航次数据的分析, 发现各航次的后向散射比率光谱形状存在一定差异, 但后向散射比率光谱变化性并不明显。

目前, 遥感反演算法及水体辐射传输模拟等一般还采用恒定的后向散射比率, 但后向散射比率在不同海区间存在的差异性为这类算法带入很大的误差。本文以 2007 年 5 月大亚湾浮标航次定点测量的后向散射比率数据作为基础, 初步分析大亚湾水体后向散射比率的变化量级及光谱形状, 为该海区光场模拟及反演算法的建立提供研究基础, 同时也将进一步分析该海湾后向散射比率变化的影响因素。

1 实验数据和方法

本文试验数据取自 2007 年 5 月 2—19 日大亚湾浮标航次的测量数据, 试验站位定点在 114°32.29'E 和 22°35.02'N 附近, 如图 1 所示, 试验期间, 每日于 10:00、12:00 和 15:00 定点进行现场光学测量及试验采样, 测量水深固定为 0.7m 及水下 2.7m 两层。本航次获取后向散射比率光谱数据共 160 组, 相匹配的叶绿素 a 浓度数据共 105 组。

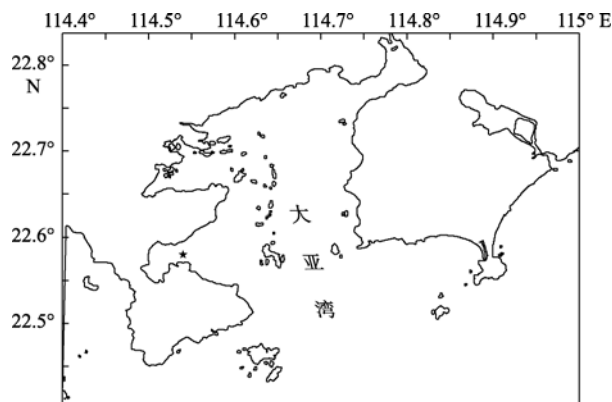


图 1 大亚湾浮标锚定站点(图中五星符号)示意图

Fig. 1 Location of the optical buoy moored station in the Daya Bay

现场水体的吸收和衰减采用 WetLabs 公司的 acs 进行测量, 仪器在航次开始和结束时均在实验室进行了纯水标定, 自带的软件采用 CTD 同步记录的温盐数据对测量结果进行了温盐校正, 散射校正采用了假定近红外单波长 756.1nm 吸收值为零的方法进行扣除^[10], 校正后、已扣除纯水贡献的吸收光谱 $a_{t-w}(\lambda)$ 和衰减光谱 $c_{t-w}(\lambda)$ 分别在 400—700nm 波段进行 1nm 插值, 两者之差得到了水体颗粒物的散射光谱 $b_p(\lambda)$ 。

水体的后向散射系数 $b_p(\lambda)$ 的测量采用了 WetLabs 公司的 BB9 后向散射测量仪, 测量的波段包括: 400、440、488、510、532、595、600、676、715nm。由于仪器出厂定标偏差导致 400 和 440nm 两波段数据错误(与仪器研发者 Moore C 教授的私下交流), 因此在接下来的分析中将仅仅采用 488—715nm 间的 7 个波段的后向散射数据。仪器现场测量的衰减校正采用了同步测量的 acs 记录数据, 测量结果扣除纯海水的贡献, 即获取水体颗粒的后向散射系数 $b_{bp}(\lambda)$ 。

颗粒物的后向散射系数 $b_{bp}(\lambda)$ 与散射系数 $b_p(\lambda)$ 的比值即为水体颗粒物的后向散射比率 $\bar{b}_{bp}(\lambda) = b_{bp} : b_p$ 。

叶绿素 a 的浓度采用荧光法进行测量, 测量仪器为 Turner-Design 10 型荧光光度计, 有关测量方法详见文献[11]。

水体中颗粒物的 Junge 分布斜率 ξ 采用衰减光谱斜率 γ 根据 Boss 等^[12]给出的经验关系进行估算, 即:

$$\xi = \gamma + 3 - 0.5 \exp(-6\gamma) \quad (1)$$

颗粒物的平均折射率 $n(\bar{b}_{bp}, \gamma)$, 采用 Twardowski 等^[15]基于 Mie 理论模拟建立的估算模型:

$$n(\bar{b}_{bp}, \gamma) = 1 + \bar{b}_{bp}^{0.5377+0.4867\gamma^2} [1.4676 + 2.2950\gamma^2 + 2.3113\gamma^4] \quad (2)$$

2 结果和讨论

2.1 颗粒后向散射比率的光谱变化

颗粒物散射 b_p 与后向散射 b_{bp} 间呈现出高分散性的关系, 660nm 处 b_p 和 b_{bp} 间进行线性回归, 决定系数 r^2 仅达到 0.41, 如图 2 所示。颗粒物散射 b_p 和后向散射 b_{bp} 的均值和偏差分别为 $1.46 \pm 0.62 \text{ m}^{-1}$ 和 $0.0109 \pm 0.004 \text{ m}^{-1}$ 。后向散射比率 $\bar{b}_{bp}(\lambda) = b_{bp} : b_p$ 在 660nm 的变化范围在 0.0040 和 0.0245 之间, 均值为 0.0082 ± 0.0032 。该比率的变化范围与文献测定的范围基本吻

合。如 Twardowski 等^[5]在 California 湾测量的 \bar{b}_{bp} 变化范围在 0.002—0.3 之间; Boss 等^[13]给出 Mid-Atlantic Bight 的 \bar{b}_{bp} 变化范围为 0.005—0.035; Chang 等^[14]给出 Santa Barbara 海峡的 \bar{b}_{bp} 范围为 0.002—0.075;

Loisel 等^[15]给出 English 海峡和北海水域的 \bar{b}_{bp} 覆盖了 0.0024—0.0417 的范围; Whitmire 等^[9]综合分析了多个航次不同水域的 9154 组数据, 给出的 \bar{b}_{bp} 变化范围 0.005—0.06 与其它测量结果也基本吻合。

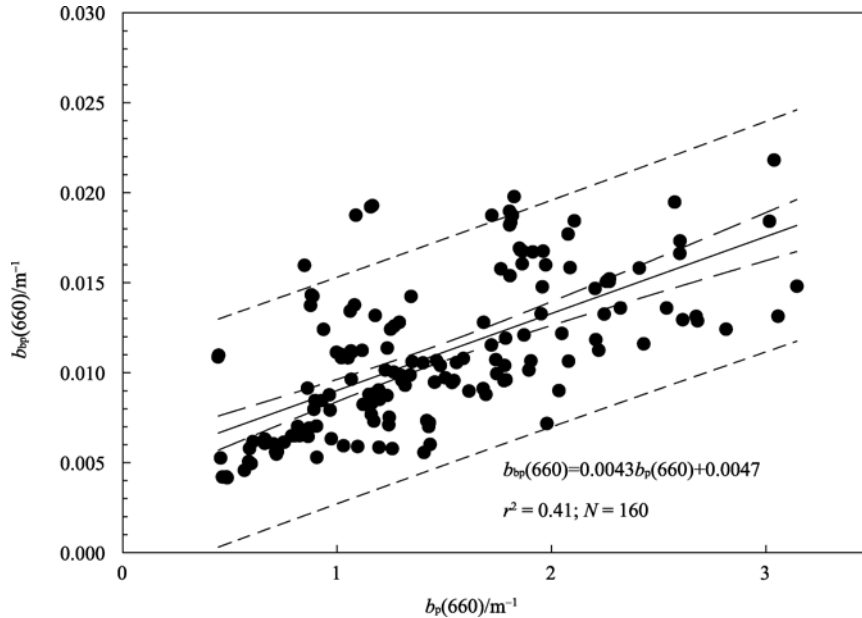


图 2 后向散射 $b_{bp}(660)$ 和散射 $b_p(660)$ 间的散点图

实线代表线性回归, 长划线定义了 95% 的置信区间, 短划线界定了预测间隔

Fig. 2 Scatter plot of backscattering coefficient $b_{bp}(660)$ versus scattering coefficient $b_p(660)$ for the whole data set. The solid black line is the corresponding linear regression, the long dashed line delimits the 95% confidence interval, and the short dashed line delimits the prediction interval

图 3 给出了 660nm 处 \bar{b}_{bp} 与其他 6 个波段对应值的线性回归图。如图所示, 各波段间线性回归的斜率存在显著的变化, 约从 0.7 变化至 1.2, 可见后向散射比率光谱并非近似恒定值, 而是存在一定的变化。但是, 各波段进行线性回归的决定系数很高, 均大于 0.9, 由此表明浮标站位附近的水体 \bar{b}_{bp} 各波段间存在明显的相关关系。

光谱后向散射比率 \bar{b}_{bp} 的幅值变化范围很大, 相同波段对应值的变化可达一个量级, 图 4 给出了大亚湾水体的后向散射比率光谱 $\bar{b}_{bp}(\lambda)$ 的平均值及标准偏差。实测的后向散射比率平均光谱存在一定变化, 532nm 和 675nm 的 \bar{b}_{bp} 会稍稍高于其他各波段对应值, 590nm 和 660nm 的 \bar{b}_{bp} 相对比较偏低, 整个后向散射比率光谱波段间的最大相对变化约为 15%。该水域的光谱变化稍高于以往文献给出的 4% 和 10% 的光谱变化结果^[7,8], 但是进一步考虑到仪器间测量定标^[13]及由单个角度估算后向散射系数的方法^[9]可能带入误差约 10%—20%, 大亚湾水体的后向散射比率 \bar{b}_{bp} 是否存在光谱变化有待进一步

分析。

2.2 颗粒后向散射比率与叶绿素浓度间的关系

图 5 给出了颗粒后向散射比率 \bar{b}_{bp} 与叶绿素浓度间的关系图, 并与文献给出的经验模型^[5,9,16]或半分析模型^[3,4,17]进行了比对。如图所示, 大亚湾水体的后向散射比率 \bar{b}_{bp} 与叶绿素浓度之间的关系与文献模型基本吻合, 在高叶绿素浓度 2.5—4mg·m⁻³ 范围内, 颗粒的 \bar{b}_{bp} 变化较小, 约在 0.06—0.09 之间, 这一变化范围与 Mie 理论估算的浮游植物 \bar{b}_{bp} 的变化范围 0.5%—1% 非常吻合^[4], 由此也进一步说明了水体中浮游植物的主导贡献; 在较低叶绿素浓度区间, 颗粒的后向散射比率呈现出很大的分散性, 约从 0.004 变化至 0.25。这种显著的分散性在近岸或大洋水体都有发现, 部分文献将这种高分散性归因于水体中颗粒组分变化对 \bar{b}_{bp} 的影响^[5,9]。在叶绿素浓度较低的情况时, 与浮游植物颗粒的 \bar{b}_{bp} 贡献相比, 非色素颗粒及碎屑的 \bar{b}_{bp} 贡献可能更为显著, 非色素颗粒及碎屑的变化将主导了水体的后向散射比率的变化。

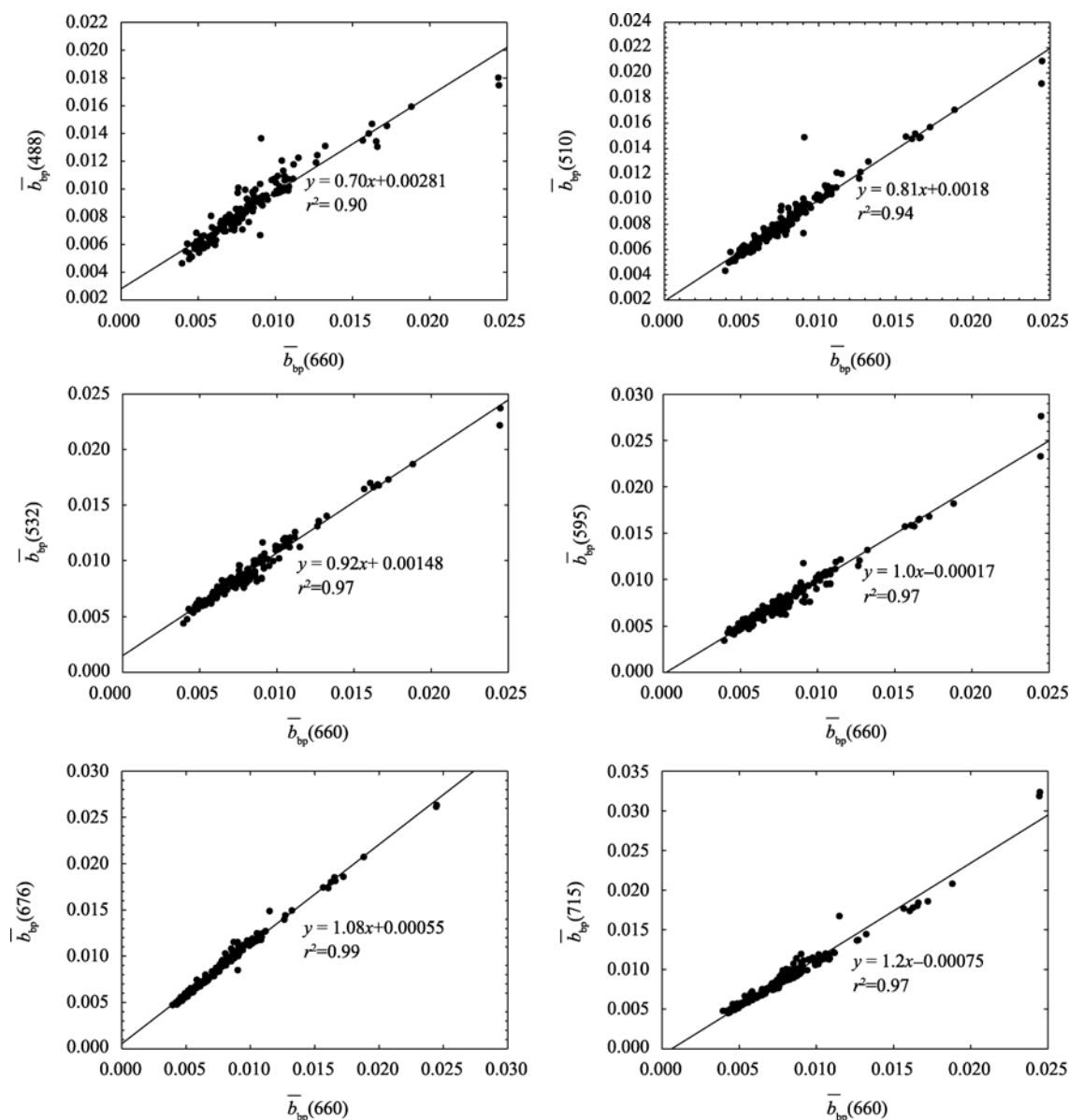


图3 660nm处的后向散射比率 $\bar{b}_{bp}(660)$ 与其他6个波段的后向散射比率间的关系图

Fig. 3 Particle backscattering ratio at 660nm versus particle backscattering ratio at six other wavelengths

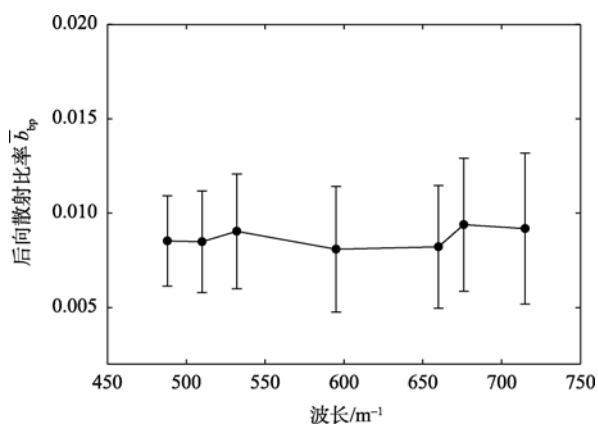


图4 后向散射比率光谱平均值及标准偏差

Fig. 4 Mean particulate backscattering ratio spectrum, along with the standard deviation

2.3 后向散射比率的影响因素分析

由于颗粒后向散射比率是与浓度密切相关的散射及后向散射的比值, 因此颗粒浓度对后向散射比率的影响甚少^[9]; 反之, 后向散射比率将更好地表征颗粒的组分及粒径等信息^[5,13]。

根据颗粒群 Junge 粒径分布及折射率估算模型式(1)和式(2), 图6给出了大亚湾水体的颗粒后向散射比率 \bar{b}_{bp} 、颗粒群的粒径分布斜率 ξ , 以及理论估算的颗粒平均折射率值 $n(\bar{b}_{bp}, \gamma)$ 。

如图, 式(1)估算得到的大亚湾粒径分布斜率 ξ 分布在3.2—4.7之间。但是, 依据总颗粒物吸收和叶绿素间的相关系数达到0.72可推知, 大亚湾水体是浮游植物及其碎屑占主导的吸收性水体。Boss

等^[13]分析指出, 在吸收性颗粒主导的水体中, 粒径分布斜率 ξ 的估算关系式(1)针对 $\xi > 4.0$ 的估算结果将出现一定偏差。因此, 本文将采用 $\xi < 4.1$ 的值进行折

射率估算和分析(图 6 中实心圆点表示)。

从图 6 中可以看出, 后向散射比率 \bar{b}_{bp} 在 0.003—0.02 之间, 对应颗粒群粒径分布斜率 ξ 在 3.2—4.1

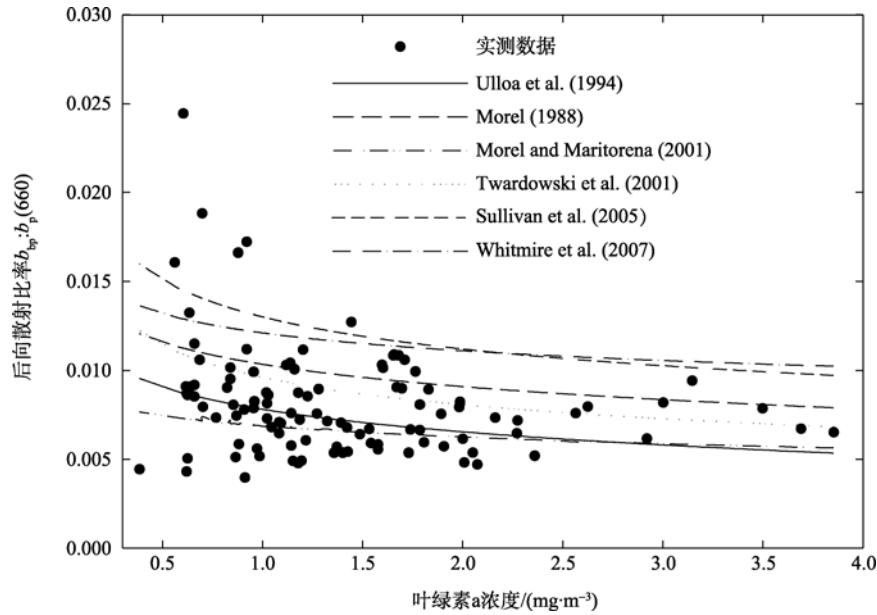


图 5 660nm 处的后向散射比率与叶绿素 a 浓度间的关系

图中的曲线分布代表 Ulloa 等(1994), Morel (1988), More and Maritorena (2001), Twardowski 等(2001), Sullivan 等(2005)和 Whitmire 等(2007)给出的模型关系

Fig. 5 Particle backscattering ratio at 660 nm versus chlorophyll a concentration (Chl. a). The six curves represent the models of Ulloa et al. (1994), Morel (1988), Morel and Marittorena (2001), Twardowski et al. (2001), Sullivan et al. (2006) and Whitmire et al. (2007), respectively

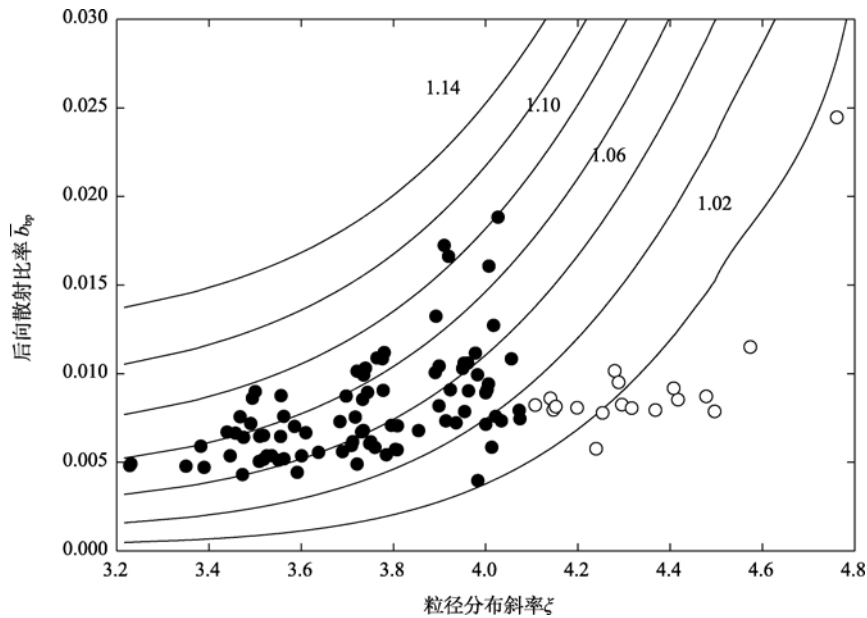


图 6 颗粒物后向散射比率 \bar{b}_{bp} 与粒径分布斜率 ξ 间的关系图

实心圆点分别代表 $\xi < 4.1$ 的可靠数据, 空心圆点代表 $\xi > 4.1$ 估算偏差较大的无效数据; 图中实线代表的水体颗粒的折射率等值线, 该参量采用 Twardowski 等(2001)的模型由 \bar{b}_{bp} 和 ξ 计算所得

Fig. 6 Particulate backscattering ratio \bar{b}_{bp} versus particle-size distribution slope ξ . The black dots represent the reliable data sets for $\xi < 4.1$, and the open circles represent the data sets with large deviations for $\xi > 4.1$. The solid curves represent the refractive index contours as calculated by the model of Twardowski et al. (2001), which uses \bar{b}_{bp} and ξ as input parameters

之间。随着粒径分布斜率 ξ 的增大,后向散射比率 \bar{b}_{bp} 大体呈增加的趋势,两者进行线性拟合满足关系 $\bar{b}_{bp}=0.0073\xi-0.0194$,决定系数 r^2 可达到0.28,Loisel等^[15]在分析颗粒有机碳由浮游植物主导的水体时也得到了类似的关系式。当粒径分布斜率 ξ 增大,水体中小粒径颗粒的比例相应增加,小粒子的后向散射增强将导致了水体后向散射比率的增加,这一变化趋势与Mie理论分析结果相吻合。由此也表明,颗粒群的粒径分布是影响大亚湾水体后向散射比率的重要参量之一。

折射率也是影响大亚湾水体后向散射比率 \bar{b}_{bp} 的因素之一。从总趋势上来看,当水体中颗粒群的粒径分布相近时,折射率的增大将相应地增强水体的后向散射比率 \bar{b}_{bp} 。大亚湾水体的估算折射率在1.02—1.12之间,一般认为,浮游植物由于含水量较高,折射率(相对于水)一般在1.02—1.092之间^[18-21],有机碎屑的折射率范围与浮游植物比较近似^[22],无机矿物质颗粒的折射率(相对于水)比较高一般在1.14—1.26之间^[23-25],大亚湾水体的折射率估算范围与浮游植物及其碎屑主导的水体颗粒群折射率比较近似。

当粒径分布斜率 ξ 小于3.5时,颗粒折射率约在1.06—1.08之间,水体可能由硅藻等较大粒径的浮游植物主导;当粒径分布斜率 ξ 增至4.0附近,水体中颗粒群折射率存在明显变化,并主导了水体颗粒后向散射比率 \bar{b}_{bp} 的变化。这种现象可能归因于,与大型浮游植物相比,水体中微型浮游植物、细菌、有机碎屑等小粒径贡献显著,藻类和非藻类的相对贡献比决定了水体颗粒群的折射率变化,进而影响到后向散射比率 \bar{b}_{bp} 的变化。这一推断与Sullivan等^[16]

基于散射进行水体颗粒划分的结论也基本一致。

3 结论

在大亚湾水域,后向散射比率呈现出很大的变化性,在660nm波长处,后向散射比率 $b_{bp}:b_p$ 变化范围在0.0040—0.0245之间,均值为 0.0082 ± 0.0032 。此变化范围和文献报道的近岸或大洋水域的测量结果保持了很好的吻合性;各波段的后向散射比率间呈现出很好的相关性,实测的后向散射比率光谱波段间相对变化约为15%。

后向散射比率和叶绿素浓度间具有很弱的相关性,但是总的变化趋势与文献结果类似。在高叶绿素浓度区间,由于低后向散射比率的浮游植物占主导,水体的后向散射比率相对较低;在低叶绿素浓度区间,非色素颗粒的显著贡献将使得后向散射比率呈现出明显的分散性。

大亚湾水体中颗粒群的粒径分布变化是影响后向散射比率的重要因素,后向散射比率和Junge粒径分布斜率间出较好的相关性。随着Junge粒径分布斜率的增大,水体中小粒子所占的比例增大,相应的后向散射比率也相应增强,这一现象与Mie理论模拟结果相吻合。

折射率也是影响大亚湾水体后向散射比率的因素之一。在近似的粒径分布斜率下,水体中颗粒折射率越大,对应的后向散射比率越高;当颗粒粒径分布斜率 ξ 小于3.5时,水体可能由硅藻等较大的浮游植物主导;当颗粒粒径分布斜率 ξ 在4.0附近,微型浮游植物、细菌、有机碎屑等小粒径颗粒贡献显著,浮游植物与非藻类物质相对贡献的变化将导致的折射率的明显变化,将主导水体后向散射比率的变化。

参考文献

- [1] MOBLEY C D, SUNDMAN L K, BOSS E. Phase Function Effects on Oceanic Light Fields[J]. Appl Opt, 2002, 41: 1035-1050.
- [2] GORDON H R, BROWN O B, EVANS R H, et al. A semi-analytical radiance model of ocean color[J]. J Geophys Res, 1988, 93: 10909-10924.
- [3] MOREL A, MARITORENA S. Bio-optical properties of oceanic waters: A reappraisal[J]. J Geophys Res, 2001, 106(C4): 7763-7780.
- [4] ULLOA O, SATHYENDRANATH S, PLATT T. Effect of the particle size distribution on the backscattering ratio in seawater[J]. Appl Opt, 1994, 33: 7070-7077.
- [5] 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]. J Geophys Res, 2001, 106(C7): 14129-14142.
- [6] MACDONALD J B, TWARDOWSKI M S, PEGAU W S, et al. Characterization of spectral backscattering in the Gulf of California[J]. In EOS Trans, AGU, 80, Ocean Sci Mett Suppl, 2000.
- [7] CHAMI M, SHYBANOV E B, CHURILOVA T Y, et al. Optical properties of the particles in the Crimea coastal waters (Black Sea) [J]. J Geophys Res, 2005, 110, C11020, doi:

- 10.1029/2005JC003008.
- [8] MCKEE D, CUNNINGHAM A. Evidence for wavelength dependence of the scattering phase function and its implication for modeling radiance transfer in shelf seas[J]. *Appl Opt*, 2005, 44: 126–135.
- [9] WHITMIRE A L, BOSS E, COWLES T J, et al. Spectral variability of the particulate backscattering ratio[J]. *Opt Express*, 2007, 15: 7019–7031.
- [10] Spectral Absorption And Attenuation Meter Ac-S User's Guide. (Revision J). WET Labs, Inc., Philomath, OR. 2009. pp.43
- [11] PARSONS T R, MAITA Y, LALLI C M. A Manual of Chemical and Biological Methods for Seawater Analysis[M]. Oxford: Pergamon Press, 1984.
- [12] 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]. *Appl Opt*, 2001, 40: 4885–4893.
- [13] BOSS E, PEGAU W S, LEE M, et al. The particulate backscattering ratio at LEO-15 and its use to study particle composition and distribution[J]. *J Geophys Res*, 2004, 109, C01014: 1–10.
- [14] CHANG G C, BARNARD A, ZANEVELD R, et al. Bio-optical relationships in the Santa Barbara Channel: Implications for remote sensing[C]//Proceedings of the Ocean Optics XVII Conference. Fremmental, Australia, 2004: 1–12.
- [15] LOISEL H, MERIAUX X, BERTHON J F, et al. Investigation of the optical backscattering to scattering ratio of marine particles in relation to their biogeochemical composition in the eastern English Channel and southern North Sea[J]. *Limnol Oceanogr*, 2007, 52(2): 739–752.
- [16] SULLIVAN J M, TWARDOWSKI M S, DONAGHAY P L, et al. Use of optical scattering to discriminate particle types in coastal waters[J]. *Appl Opt*, 2005, 44: 1667–1680.
- [17] MOREL A. Optical modeling of the upper ocean in relation to its biogenous matter content (case I waters) [J]. *J Geophys Res*, 1988, 93(C9): 10749–10768.
- [18] STRAMSKI D, BRICAUD A, MOREL A. Modeling the light attenuation and scattering by spherical phytoplankton cells: a retrieval of the bulk refractive index[J]. *Appl Opt*, 1988, 27: 3954–3956.
- [19] STRAMSKI D, MOBLEY C D. Effects of microbial particles on oceanic optics: A database of single-particle optical properties[J]. *Limnol Oceanogr*, 1997, 42(3): 538–549.
- [20] AAS E. Refractive index of phytoplankton derived from its metabolic composition[J]. *J Plankton Res*, 1996, 18(12): 2223–2249.
- [21] 周雯, 曹文熙, 李彩. 浮游植物吸收和散射特性: 理论模型[J]. *光学技术*. 2007, 33(2): 177–180.
- [22] VERITY P G, BEATTY T M, WILLIAMS S C. Visualization and quantification of plankton and detritus using digital confocal microscopy[J]. *Aquat Microb Ecol*, 1996, 10: 55–67.
- [23] LIDE D R. Physical and optical properties of minerals[M]. //CRC Handbook Of Chemistry And Physics. 77th ed. CRC Press, 4130–4136.
- [24] 周雯, 曹文熙, 李彩. 海水中矿物质颗粒物吸收和散射特性 Mie 理论分析[J]. *热带海洋学报*. 2008, 27(1): 22–26.
- [25] ZHOU WEN, CAO WENXI. Modeling the Influence of mineral particles and phytoplankton on chlorophyll estimation from ocean color remote sensing[J]. *International Journal of Remote Sensing*. 2008, 29(21): 6237–6248.