

渤海近岸水体悬浮颗粒物对后向散射特性的影响研究

姜玲玲^{1*}, 段家辉¹, 王林², 陈艳拢², 高思雯¹, 郭翔宇¹

1. 大连海事大学环境科学与工程学院, 辽宁 大连 116026

2. 国家海洋环境监测中心, 辽宁 大连 116023

摘要 进行海洋水体悬浮颗粒物的空间分布及粒径构成对后向散射特性变化影响, 研究对于加深水体散射性质的认识、提高水色遥感反演参数的精度及海洋环境监测等具有重要意义。结合渤海海域2017年6月、9月的现场数据, 获得了夏季、秋季各站位总悬浮颗粒物浓度(SPM)、颗粒粒径以及后向散射系数等参数并进行研究。结果表明, 后向散射系数 b_{bp} 在可见光波段随波长的增加而减小; 同时, 夏季和秋季, 大多数站位 $b_{bp}(550)$ 的变化趋势与SPM的变化趋势基本一致; 在进行两者之间的相关性研究时发现, 相关系数 R^2 并不高, 仅为0.24。该研究还建立了平均粒径(D_A)、中值粒径(D_{50})与 b_{bp} 的关系, 得出 D_A 与 b_{bp} 呈线性关系, 受季节及水体颗粒构成的影响, 夏季, 水体颗粒物以小颗粒为主, 两者之间的相关性高于秋季, 两个季节的 R^2 分别为0.7和0.3; 同时得出当水体以小颗粒为主时, b_{bp} 随 D_A 增大而增大, 以大颗粒为主的时, b_{bp} 随 D_A 增大而减小。 D_{50} 与 b_{bp} 的关系则不同, 两者之间呈现非常好的幂指数关系, 在同一季节里, b_{bp} 均随着 D_{50} 的增大而减小, 即水体中颗粒物粒径越小, 其后向散射系数越大, 夏季和秋季两者之间的相关系数分别为0.66和0.5; 并且发现如果不分季节差异, 现场水体颗粒物的粒径构成对 b_{bp} 的影响很难确定。

关键词 近岸水体; 总悬浮物浓度; 颗粒粒径; 后向散射特性

中图分类号: P76 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2021)01-0156-08

引言

悬浮颗粒物在很大程度上控制着海水固有光学特性的变化, 并在水色变化中起着十分重要的作用。浓度、粒径, 是描述悬浮颗粒物的重要物理参数^[1]。研究悬浮颗粒物的浓度和粒径对水体固有光学量的影响可为水体悬浮颗粒物的遥感反演提供重要的指导依据, 也可为我国海洋环境监测做出重要的贡献。国内外学者就颗粒物的光学特性已经做了相关研究。主要针对以下几个方面: 一是研究悬浮颗粒物的散射特性与后向散射特性。如顾艳镇等分析了近岸水体悬浮颗粒物的散射系数与后向散射系数之间的关系^[2]; 刘炜等通过在黄东海的实验数据的分析, 研究了我国黄东海悬浮颗粒物后向散射特性^[3]; 另一方面, 学者们也关注了悬浮颗粒物浓度对水体固有光学量的影响。如Slawomir等做了悬浮颗粒物浓度与后向散射系数之间的关系研究, 得到了它们之间的线性关系^[4]; 宋庆君等和孙德勇等分别建立了黄东海近岸水体与巢湖水体的悬浮颗粒物浓度与后向散射系数之间的关系并建

立模型^[5-6]。此外, 悬浮颗粒物组分与颗粒密度对水体固有光学量的影响也是近些年学者们关注的焦点。如Boss等研究了水体颗粒物后向散射比的变化, 并以此参数来区分颗粒物组分^[1]; Astoreca等在北海南部海域进行了后向散射特性与颗粒成分和浓度的相关性研究^[7]; Neukermans等研究了后向散射系数与悬浮颗粒物颗粒密度的关系^[8]; Flory等发现悬浮颗粒物的类型影响水体后向散射效率^[9]; 周雯等通过模拟计算得出粒径分布的变化很大程度影响散射系数及后向散射系数^[10]; Wang等就渤海和黄海粒子的光束衰减和后向散射特性与颗粒粒径特征的关系展开了研究^[11]。然而, 在不同季节, 水体颗粒物的粒径构成不同, 颗粒的粒径大小、粒径分布也有所不同, 因此悬浮颗粒物对后向散射的影响特征也大不相同。本工作将结合渤海海域夏季和秋季的现场数据, 研究不同季节悬浮颗粒物粒径组成及颗粒物浓度共同对后向散射特性的影响特征, 建立相关关系模型, 从而为更准确地利用遥感手段获取水体颗粒物信息奠定良好的理论基础。

收稿日期: 2019-12-03, 修订日期: 2020-04-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(42076186, 41506197), 国家重点研发计划项目(2019YFC1407904)资助

作者简介: 姜玲玲, 女, 1980年生, 大连海事大学环境科学与工程学院副教授

* 通讯作者 e-mail: jiangll@dlnu.edu.cn

1 实验部分

1.1 研究区域及观测站位

选取渤海海域秦皇岛附近的区域。研究数据采集于 2017 年 6 月和 9 月, 共两个航次 43 个站位的采样数据, 每个断面从河口开始布置, 由于海洋受陆源输入影响较大, 从近岸由近到远呈现梯度变化, 故采样站点呈直线排布, 具体夏秋季航次站位分布图[如图 1(a,b)所示]。

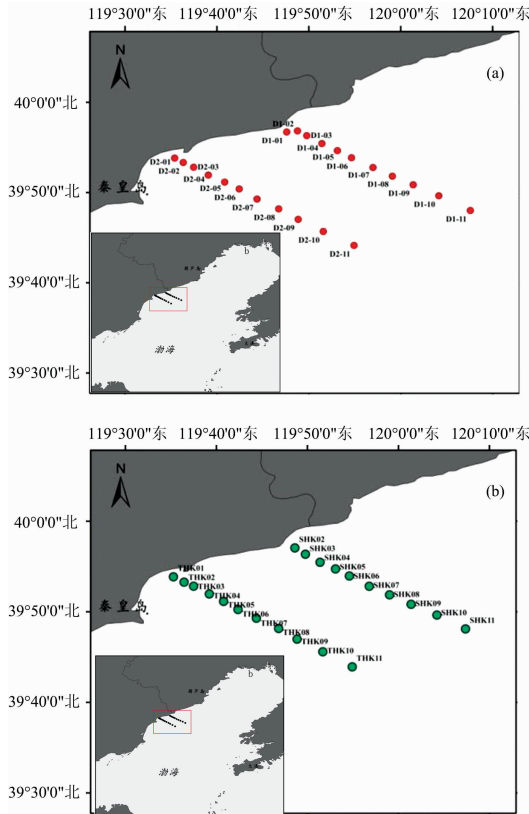


图 1 测量站位分布图

(a): 夏季; (b): 秋季

Fig. 1 Locations of the sampling station

(a): Summer; (b): Autumn

1.2 数据测量与处理

(1) 颗粒物散射系数

水体光吸收-衰减系数测量仪 AC-S 测量水体的光谱吸收系数 absorption coefficient(a)和光束衰减系数 beam attenuation coefficient(c), 再对吸收系数 a 和衰减系数 c 进行温盐校正、散射校正和纯水校正, 从而可以计算出水体的总散射系数 scattering coefficient(b)

$$b = c - a \quad (1)$$

悬浮颗粒物的散射系数 particulate scattering coefficient (b_p)为总散射系数减去纯水的散射系数 water scattering coefficient(b_w)

$$b_p = b - b_w \quad (2)$$

(2) 后向散射系数

六通道后向散射测量仪(HS-6)测量得到水体后向散射系数 backscattering coefficient(b_b)。HS-6 是通过测量 140° 的体散射函数计算得到水体的后向散射系数 water backscattering coefficient(b_{bw}), 其测量的波长分别为 420, 442, 488, 550, 620 和 700 nm 六个波段。校正后的测量值减去纯水的后向散射系数即为悬浮颗粒物的后向散射系数 particulate backscattering coefficient(b_{bp})

$$b_{bp} = b_b - b_{bw} \quad (3)$$

(3) 悬浮颗粒物粒径

悬浮颗粒物粒径的测量是由激光粒度仪 LISST-100X (type B)测得悬浮颗粒物在 32 个粒径下的体积浓度 volume concentration of the particles in size bin i (VC_i) ($i=1\sim 32$), 粒径 diameter(D)范围为 $1.25\sim 250 \mu\text{m}$ 。各粒径范围粒子截面面积浓度 cross-sectional area concentration of the particles in size bin i (AC_i)由式(4)计算得出

$$AC_i = \frac{3}{2D} VC_i \quad (4)$$

则总粒子截面面积浓度 total cross-sectional area concentration(AC)为

$$AC = \sum_{i=1}^{32} AC_i \quad (5)$$

悬浮颗粒物的平均粒径 mean diameter weighted by area (D_A)

$$D_A = \frac{\sum_{i=1}^{32} AC_i D_i}{AC} \quad (6)$$

LISST-100 中每组数据有 32 个不同粒径值的体积浓度, 水体悬浮物总体积浓度 total volume concentration(VC)为不同粒径体积浓度之和

$$VC = \sum_{i=1}^{32} VC_i \quad (7)$$

从最小粒径值对应的体积浓度开始对 32 个数据进行累加计算, 在累加和等于 0.5 倍 VC 时停止计算, 此时的粒径值即为中值粒径 median particle size(D_{50})。

(4) 总悬浮颗粒物浓度

总悬浮颗粒物浓度 suspended particle matter(SPM)的测量采用称重法, 将玻璃纤维滤膜过滤水样后, 首先在 60°C 条件下烘干 24 h 除去水分, 称量后减去空白膜重量得到总悬浮颗粒物的重量, 除以过滤体积后即得 SPM。 b_{bp} 与 SPM 的比值就是比后向散射系数 mass-specific backscattering coefficient(b_{bp}^*)

$$b_{bp}^* = \frac{b_{bp}}{SPM} \quad (8)$$

2 结果与讨论

2.1 光谱变化分析

通过此前的研究分析, 在深度较小时($\leq 10 \text{ m}$)后向散射系数随深度增加变化不大^[12]。各光学参量本研究主要选取表层水体(0~3 m)的测量数据进行分析。如表 1 所示, 实测颗粒物后向散射系数 b_{bp} (420), b_{bp} (442), b_{bp} (488), b_{bp}

(550), $b_{bp}(620)$ 和 $b_{bp}(700)$ 的变化范围分别为 0.012 ~ 0.072, 0.012 ~ 0.075, 0.013 ~ 0.070, 0.011 ~ 0.063, 0.010 ~ 0.058 以及 0.009 ~ 0.051。在 420 和 442 nm 处 b_{bp} 的平均值最大, 均为 0.029; 在 700 nm 处 b_{bp} 的平均值最小, 为 0.019。同时, 620 nm 处的变化幅度最大, coefficient of variation(CV)值为 42.39%, 最小的变化幅度则出现在 420 nm 处, CV 值为 40.68%。比后向散射系数 $b_{bp}^*(420)$, $b_{bp}^*(442)$, $b_{bp}^*(488)$, $b_{bp}^*(550)$, $b_{bp}^*(620)$ 和 $b_{bp}^*(700)$ 的变化范围分别为 0.001 8 ~ 0.007 1, 0.001 8 ~ 0.007 1, 0.001 7 ~ 0.007 1, 0.001 5 ~ 0.006 2, 0.001 3 ~ 0.005 5 以及 0.001 1 ~ 0.004 6; 其平均值最大值也均出现在 420 和 442 nm 处, 为 0.003 8; 在 700 nm 处仍为最小, 为 0.002 5。 $b_{bp}^*(\lambda)$ 的变化幅度最大出现在 488 nm 处, CV 值为 36.63%, 最小的变化幅度出现在短波 420 nm 处, CV 值为 35.54%。可见, 比后向散射系数 b_{bp}^* 的变化幅度明显小于后向散射系数 b_{bp} 。与苏校平等在黄渤海测量的结果一致^[13]。

表 1 光学参量统计结果

Table 1 Statistics of optical parameters

参量	最大值	最小值	平均值	标准差	CV/%
$b_{bp}(420)/m^{-1}$	0.071 9	0.011 7	0.029 0	0.011 8	40.68
$b_{bp}(442)/m^{-1}$	0.075 1	0.012 1	0.029 0	0.012 1	41.84
$b_{bp}(488)/m^{-1}$	0.070 2	0.012 5	0.027 9	0.011 4	41.09
$b_{bp}(550)/m^{-1}$	0.062 8	0.011 2	0.024 5	0.010 2	41.51
$b_{bp}(620)/m^{-1}$	0.058 1	0.009 9	0.022 0	0.009 3	42.39
$b_{bp}(700)/m^{-1}$	0.051 4	0.008 9	0.019 2	0.008 1	42.09
$b_{bp}^*(420)/(m^2 \cdot g^{-1})$	0.007 1	0.001 8	0.003 8	0.001 3	35.54
$b_{bp}^*(442)/(m^2 \cdot g^{-1})$	0.007 1	0.001 8	0.003 8	0.001 4	35.93
$b_{bp}^*(488)/(m^2 \cdot g^{-1})$	0.007 1	0.001 7	0.003 6	0.001 3	36.63
$b_{bp}^*(550)/(m^2 \cdot g^{-1})$	0.006 2	0.001 5	0.003 2	0.001 2	36.47
$b_{bp}^*(620)/(m^2 \cdot g^{-1})$	0.005 5	0.001 3	0.002 9	0.001 0	36.32
$b_{bp}^*(700)/(m^2 \cdot g^{-1})$	0.004 6	0.001 1	0.002 5	0.000 9	35.97

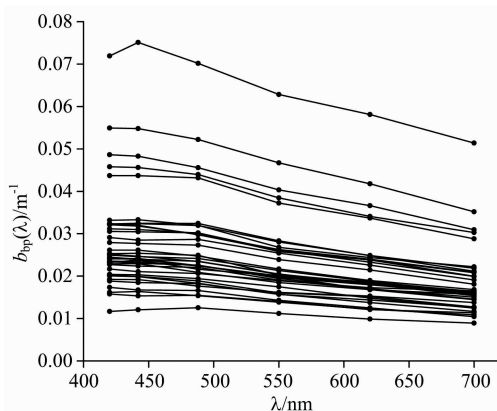


图 2 各站位颗粒物后向散射系数光谱图

Fig. 2 Observed particle backscattering coefficients spectral

本研究获取了后向散射系数的光谱图(如图 2 所示)。后向散射系数 b_{bp} 光谱整体随着波长的增加呈现递减趋势, 在低值区, 其衰减程度较小; 随着后向散射系数值的增大, 衰

减程度也呈增大趋势。同时受叶绿素和水体颗粒物构成的影响, 颗粒物后向散射的光谱形状在短波处也略有不同, 与王林等在三种典型赤潮藻的散射特性研究的结果类似^[14]。

比后向散射系数 b_{bp}^* 光谱形状也随着波长的增加整体呈现递减趋势。在低值区, 其衰减程度较小, 随着后向散射系数的增大, 其衰减程度也逐渐增大。本研究获得了 b_{bp}^* 的平均值的变化趋势图(如图 3 所示), b_{bp}^* 也呈递减趋势, 与 Sławomir B 等得到的结果变化趋势基本相同, 但本研究的数值整体偏小, 变化幅度偏小^[4]。

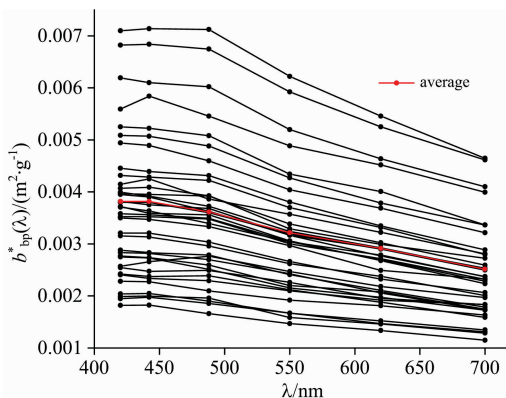


图 3 各站位颗粒物比后向散射系数光谱图

Fig. 3 The mass-specific backscattering coefficients spectral

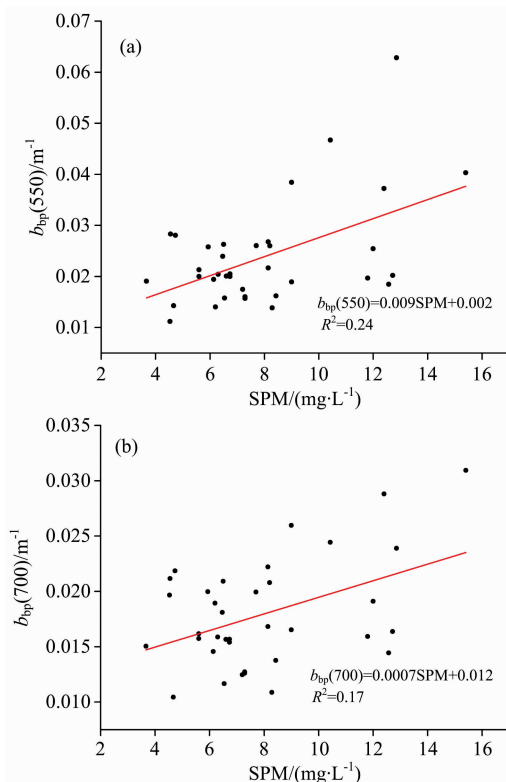


图 4 后向散射系数 b_{bp} 与总悬浮物浓度 SPM 关系图

(a): 550 nm; (b): 700 nm

Fig. 4 The SPM versus the backscattering coefficients

(a): 550 nm; (b): 700 nm

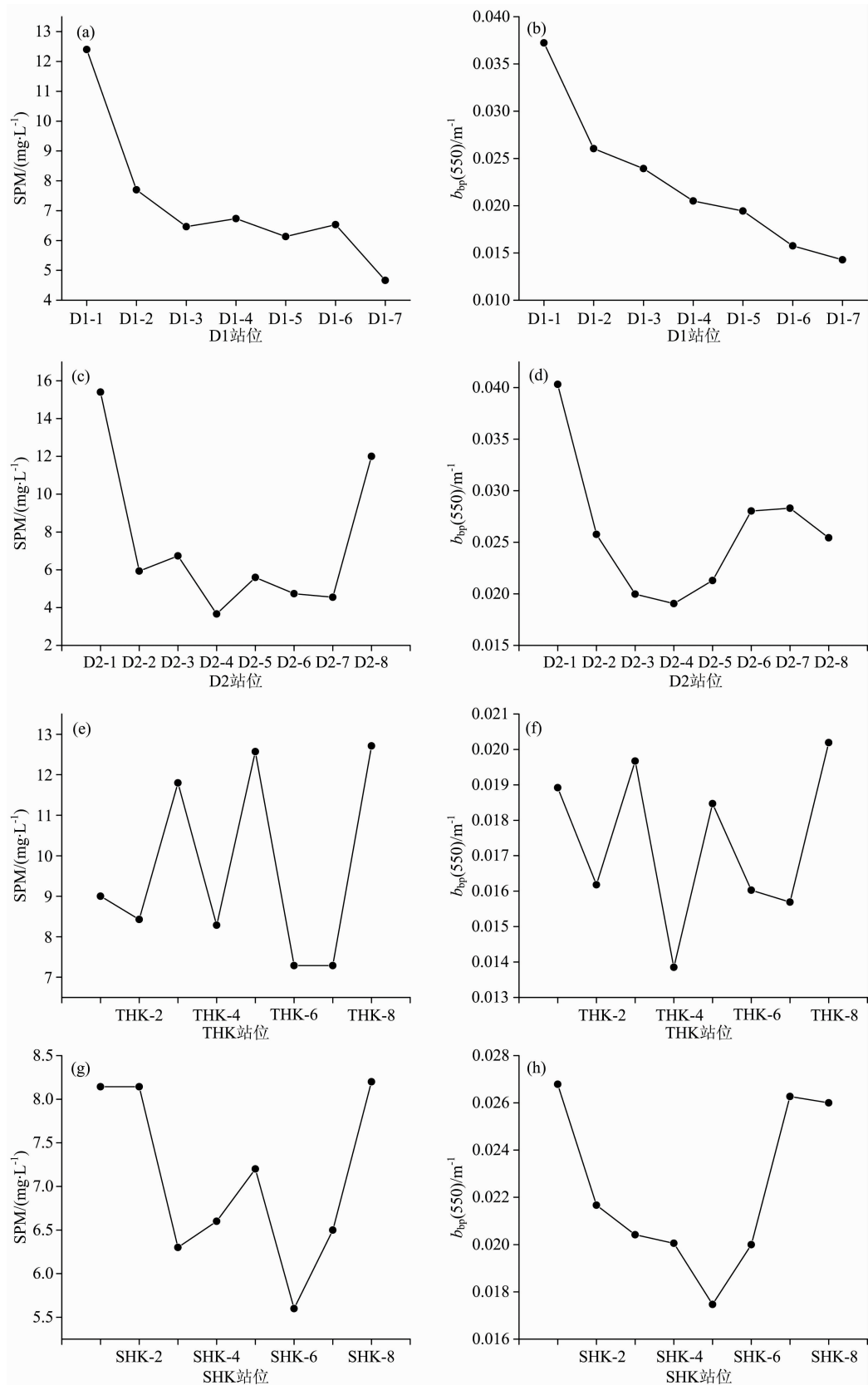


图 5 各站点总悬浮颗粒物浓度 SPM 和后向散射系数变化趋势图

Fig. 5 The varieties of the SPM and particle the backscattering coefficients of each station

2.2 SPM 对 b_{bp} 的影响

通过上述分析,可以看出总悬浮颗粒物浓度对水体后向散射影响较大。孙德勇等利用巢湖的测量数据发现 SPM 和 b_{bp} 呈正相关^[6]; Sławomir B 等也在波罗的海海域得到了相似的结论^[4]; Zhang 等利用黄东海的测量数据得出 SPM 与 b_{bp} 呈线性关系,在 676 nm 处,相关系数高达 0.909^[15]。分别选取 $b_{bp}(550)$, $b_{bp}(700)$ 与 SPM 建立了线性关系(如图 4 所示),可以看出, b_{bp} 整体随 SPM 增大而增大,但分布较为离散,线性拟合的相关系数 R^2 的值较小,仅为 0.24 和 0.17,远小于 Zhang 等^[15]所得到的结果。

研究发现,各波段 b_{bp} 与 SPM、粒径的变化关系差异不大,同时 Lee 等在遥感反演的 multiband quasi-analytical algorithm(QAA)半分析算法中,选取 555 或 550 nm 作为参考波段,能有效减少反演误差,提高反演精度^[16],所以为了更好地探究 SPM 对 b_{bp} 的变化影响,进行了 $b_{bp}(550)$ 和 SPM 共同变化趋势研究(如图 5 所示)。D1 和 D2 是 6 月(夏季)的站位,THK 和 SHK 是 9 月(秋季)的站位。由图 5(a)和(b)可以看出,D1 站位整体随着离岸距离的增大,SPM 逐渐减小,其最大值出现在离岸最近的位置,为 $12.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,最小值出现离岸较远的站位,为 $4.67 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。相应的, $b_{bp}(550)$ 的值变化趋势与其基本一致,离岸由近及远,逐渐减小。D2 站位离岸最近的 SPM 仍然最高,为 $15.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,但是不同于 D1 站位,其他站位 SPM 并不随离岸距离的增大而减小,离岸较远的站位 SPM 值也较大,为 $12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ [如图 5(c)和(d)所示],同样受 SPM 的影响, $b_{bp}(550)$ 的极值出现的站位与 SPM 的基本一致,它们整体变化趋势大致相同,但是各别站位 $b_{bp}(550)$ 与 SPM 的变化趋势则有所差异。不同于夏季,秋季站位的 SPM 随着离岸距离的增大,呈现出较不规则的变化趋势[如图 5(e)和(g)所示],大部分站位 SPM 相对较高,与胡文焯^[17]在西北太平洋上层海水中测量的结果一致。同样,大部分站位 $b_{bp}(550)$ 的变化趋势与 SPM 基本一致,而各别站位略有不同[如图 5(g), (h)所示]。同时还注意到,不同季节,SPM 的浓度相近,但 $b_{bp}(550)$ 的值却存在较大差异,因此悬浮颗粒物颗粒构成、粒径等可能是造成 $b_{bp}(550)$ 与 SPM 变化趋势不同的主要原因。

2.3 粒径对后向散射的影响研究

为了探究海域悬浮颗粒物的粒径大小分布情况,本研究作出了各站位 32 个粒径的体积浓度分布图(如图 6 所示)。秋季站位悬浮颗粒物以大颗粒物为主,粒径大于 $100 \mu\text{m}$ 的颗粒占主导。夏季站位粒径分布较平均,颗粒粒径整体比秋季站位的小。高永强等在长江口及其邻近海域得到的夏季以小颗粒为主^[18],胡文焯等在西北太平洋秋季测得悬浮颗粒物以大颗粒为主^[17],本研究实测结果与其相近。同时,本研究分别建立了夏季和秋季的中值粒径 D_{50} 和平均粒径 D_A 的回归分析[如图 7(a)和(b)所示]。两个季节都表现出 D_A 随 D_{50} 增大而增大,夏季 D_A 与 D_{50} 呈现良好的幂函数差异, R^2 为 0.76,秋季两者之间的关系不如夏季, R^2 仅为 0.33。这主要是因为夏季水体中不同粒径颗粒物的体积浓度变化范围不大,而秋季水体悬浮颗粒物的粒径差异较大,导致 D_A 与 D_{50} 的分布不一致。

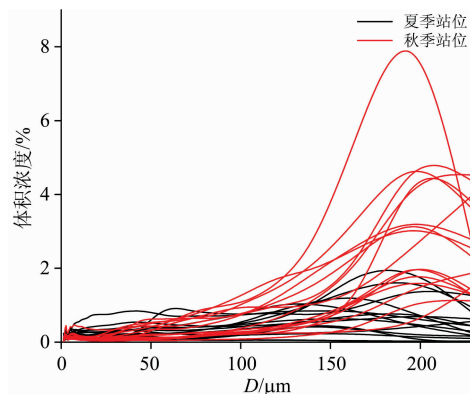


图 6 各站位粒径的体积浓度分布图

Fig. 6 The Volume concentration of different particle size distribution of each station

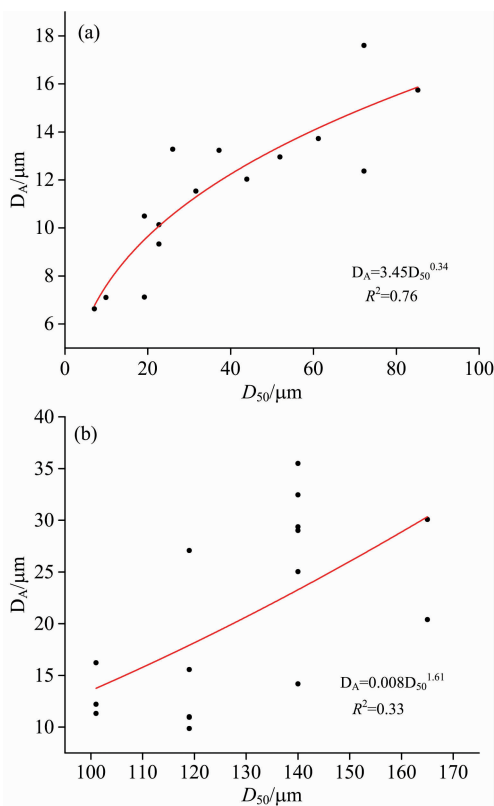


图 7 中值粒径 D_{50} 和平均粒径 D_A 关系图

(a): 夏季; (b): 秋季

Fig. 7 The median particle size D_{50} versus the average particle size D_A

(a): Summer; (b): Autumn

2.3.1 D_A 对 b_{bp} 的影响研究

为了研究 D_A 对 b_{bp} 的影响,针对所有站位建立 D_A 和 b_{bp} 的相关关系,由图 8 发现二者之间的关系并不明显。由于夏季和秋季悬浮颗粒物的粒径构成差异很大,本研究则针对不同季节分别建立 D_A 与 b_{bp} 的关系[如图 9(a)和(b)所示],得出夏季, D_{50} 小于 $100 \mu\text{m}$,悬浮颗粒物以小粒径颗粒为主,

这时 b_{bp} 随 D_A 增大而增大, 两者呈非常好的线性关系, 相关系数 R^2 高达 0.7; 秋季, D_{50} 介于 100 和 200 μm 之间, 悬浮颗粒物以大粒径颗粒为主, b_{bp} 与 D_A 则呈负相关关系, 其随 D_A 的增大而减小, 相关系数 R^2 也相对较低, 为 0.3。Wang 等^[11] 利用黄渤海海域实测数据研究了 D_A 对颗粒物后向散射系数之间的影响, 并没有得出明确的结论, 同时针对粒径构成对水体颗粒物后向散射系数

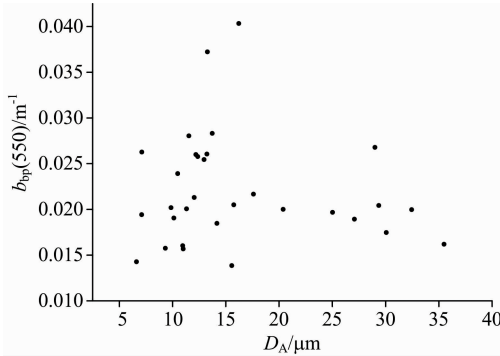


图 8 颗粒物后向散射系数 b_{bp} 和平均粒径 D_A 的相关关系图

Fig. 8 The average particle size D_A versus the backscattering coefficients

的研究较少, 而研究发现水体以小颗粒为主的时, b_{bp} 随 D_A 增大而增大, 以大颗粒为主的时, b_{bp} 随 D_A 增大而减小。这一结论为日后为判断水体颗粒物构成奠定了良好的理论基础。

2.3.2 D_{50} 对 b_{bp} 的影响

本研究进行了 D_{50} 对 b_{bp} 的影响研究(如图 10 所示)。同

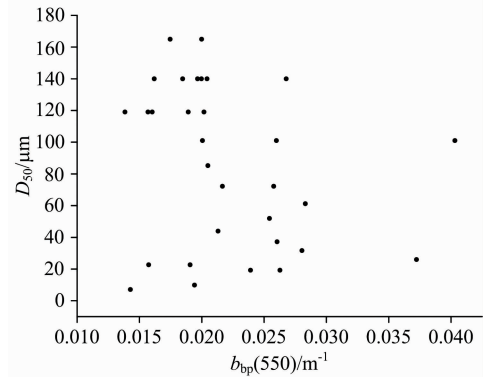


图 10 颗粒物后向散射系数 b_{bp} 和中值粒径 D_{50} 相关关系图

Fig. 10 The medium particle size D_A versus the backscattering coefficients

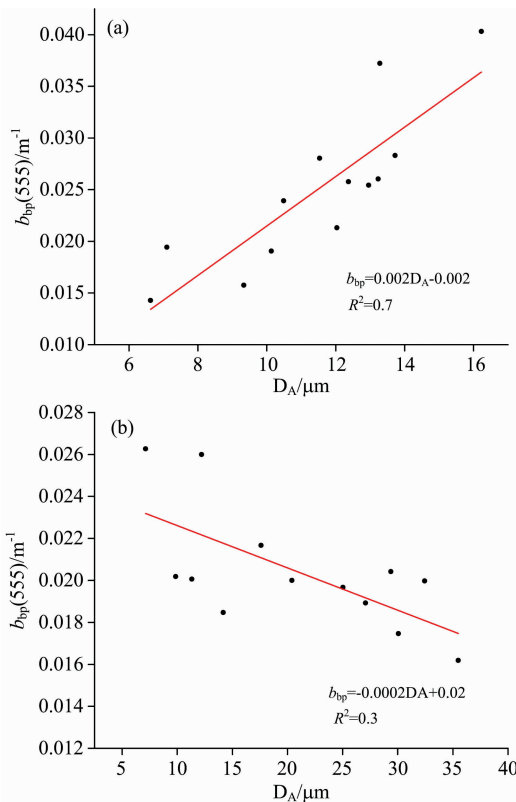


图 9 不同季节颗粒物后向散射系数 b_{bp} 和平均粒径 D_A 的关系图

(a): 夏季; (b): 秋季

Fig. 9 The average particle size D_A versus the backscattering coefficients in different seasons

(a): Summer; (b): Autumn

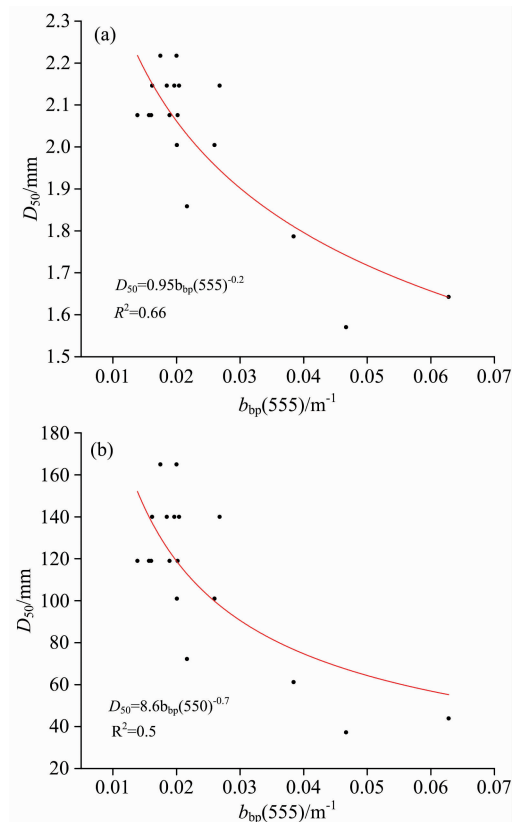


图 11 不同季节颗粒物后向散射系数 b_{bp} 和中值粒径 D_{50} 相关关系图

(a): 夏季; (b): 秋季

Fig. 11 The medium particle size D_A versus the backscattering coefficients in different seasons

(a): Summer; (b): Autumn

样, D_{50} 与 b_{bp} 两者之间无良好的关系。但是当我们针对不同季节建立了 D_{50} 与 b_{bp} 的关系时发现, [如图 11(a) 和 (b) 所示]。夏季, 水体悬浮颗粒物以小颗粒为主时, D_{50} 随 b_{bp} 的增大而减小, D_{50} 与 b_{bp} 之间呈良好的幂函数关系, 相关系数 R^2 为 0.66; 秋季, 水体悬浮颗粒物以大颗粒为主时, 与夏季站位相同, D_{50} 也随 b_{bp} 的增大而减小, D_{50} 与 b_{bp} 之间同样呈比较好的幂函数关系, 相关系数 R^2 为 0.5。可见在同一季节, 水体颗粒物的粒径越小, 其后向散射系数越大, 这与 Mie 理论的结论是一致的, 但是如果不分季节差异, 现场水体颗粒物的粒径构成对 b_{bp} 的影响将很难确定。

3 结 论

结合现场测量数据, 研究了现场水体颗粒物后向散射的变化特征, 及其与水体总悬浮颗粒物浓度、粒径之间的关系, 得出以下结论:

(1) 整体看来, 后向散射系数 b_{bp} 和比后向散射系数 b_{bp}^*

随着波长的增大而减小, b_{bp}^* 的变化幅度小于 b_{bp} ; 同时, 不同季节, 各站位 $b_{bp}(550)$ 的变化趋势与 SPM 的基本一致, 但是个别站位略有不同。两者之间呈线性关系, 但相关系数并不高, R^2 仅为 0.24。因此悬浮颗粒物颗粒构成、粒径等可能是造成 $b_{bp}(550)$ 与 SPM 变化趋势不同的主要原因。

(2) 夏季, 水体以小颗粒为主, b_{bp} 随 D_{λ} 增大而增大, 两者之间呈非常好的线性关系, R^2 为 0.7; 而秋季, 水体则以大颗粒为主, b_{bp} 随 D_{λ} 增大而减小, R^2 仅为 0.3。 D_{50} 与 b_{bp} 的关系则不同, 两者之间呈非常好的幂指数关系, 即水体颗粒物粒径越小, 其后向散射系数越大。但是如果不分季节差异, 现场水体颗粒物的粒径构成对 b_{bp} 的影响将很难确定。

本研究在进行总悬浮颗粒物和粒径构成对颗粒物后向散射的影响分析中, 发现了季节差异, 为了深入理解颗粒物对后向散射特性的影响以及日后有效地提高悬浮颗粒物的遥感反演精度, 还需选取长时间序列数据并结合悬浮颗粒物构成等信息进行深入分析和研究。

References

- [1] Boss E, Pegau W S, Lee M, et al. *Journal of Geophysical Research: Oceans*(1987—2012), 2004, 109(C1): 1.
- [2] GU Yan-zhen, LIU Yu-guang, LIU Ya-hao, et al(顾艳镇, 刘玉光, 刘亚豪, 等). *Journal of Ocean University of China*(中国海洋大学学报), 2007, 37(2): 1.
- [3] LIU Wei, LI Tong-ji, ZHU Jian-hua, et al(刘 炜, 李铜基, 朱建华, 等). *Journal of Ocean Technology*(海洋技术学报), 2007, 26(2): 42.
- [4] Slawomir B W, Slawomir S, Monika Z. *Journal of Marine Systems*, 2017, (17): 30376.
- [5] SONG Qing-jun, TANG Jun-wu(宋庆军, 唐军武). *Acta Oceanologica Science*(海洋学报), 2006, (4): 56.
- [6] SUN De-yong, LI Yun-mei, WANG Qiao, et al(孙德勇, 李云梅, 王 桥, 等). *Environmental Science*(环境科学), 2010, 31(6): 1428.
- [7] Astoreca R, Doxaran, Ruddicket K, et al. *Continental Shelf Research*, 2012, 35: 117.
- [8] Neukermans G, Hubert Loisel H, Mee' Riaux X, et al. *Limnology and Oceanography*, 2012, 57(1): 124.
- [9] Flory E N, Hill P S, Millgant G, et al. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2004, 51(2): 213.
- [10] ZHOU Wen, CAO Wen-xi, LI Cai, et al(周 雯, 曹文熙, 李 彩, 等). *Journal of Tropical Oceanography*(热带海洋学报), 2008, 27(1): 22.
- [11] Wang S Q, Qiu Z F, Sun D Y, et al. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2016, 121(6): 3955.
- [12] LI Min-min, LI Tong-ji, ZHU Jian-hua, et al(李敏敏, 李铜基, 朱建华, 等). *Ocean Technology*(海洋技术), 2013, 32(1): 50.
- [13] SU Jiao-ping, SUN De-yong, QIU Zhong-feng, et al(苏校平, 孙德勇, 邱仲锋, 等). *Guangxi Science*(广西科学), 2016, 23(6): 538.
- [14] WANG Lin, JIANG Ling-ling, YANG Jian-hong, et al(王 林, 姜玲玲, 杨建洪, 等). *Marine Environmental Science*(海洋环境科学), 2014, 33(6): 884.
- [15] Zhang M W, Tang J W, Song Q J, et al. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115(C12014): 1.
- [16] Lee Z P, Carder K L, Arnone R A, et al. *Optical Soc. Amer.*, 2002(41): 5755.
- [17] HU Wen-ye, CHEN Jian, LI Dong-yi, et al(胡文烨, 陈 坚, 李东义, 等). *Journal of Applied Oceanography*(应用海洋学报), 2017, 36(2): 221.
- [18] GAO Yong-qiang, GAO Lei, ZHU Li-xin, et al(高永强, 高 磊, 朱礼鑫, 等). *Haiyang Xuebao*(海洋学报), 2018, 40(3): 62.

The Influence of Suspended Particles on Backscattering Properties in the Coastal Waters of Bohai Sea

JIANG Ling-ling^{1*}, DUAN Jia-hui¹, WANG Lin², CHEN Yan-long², GAO Si-wen¹, GUO Xiang-yu¹

1. College of Environment Science and Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China

2. National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China

Abstract Studying the influence of the spatial and size distribution of suspended particulate matter on its backscattering properties is of great importance for understanding water body scattering properties and improving inversion accuracy, which is greatly helpful for marine environmental monitoring. Based on the field data of Bohai Sea in June and September 2017, the total suspended particulate matter concentration (SPM), particle size, backscattering coefficient as well as other parameters were obtained. The results showed that the backscattering coefficient ($b_{bp}(\lambda)$) decreased with the increase of wavelength in the visible wave bands. In summer and autumn, the changing trend of $b_{bp}(550)$ was consistent with that of SPM at most stations; however, the correlation coefficient R^2 between them was only 0.24. In addition, the relationship between mean particle size (D_A), median particle size (D_{50}) and $b_{bp}(\lambda)$ was established in the study respectively. D_A and $b_{bp}(\lambda)$ had a linear relationship, and their relationship was better in summer than in autumn by the influence of particle composition, R^2 was 0.7 in summer and was only 0.3 in autumn. At the same time, it is concluded that the $b_{bp}(\lambda)$ increased with the increase of D_A when the water body was dominated by small particles, but while the water body was dominated by large particles, $b_{bp}(\lambda)$ decreased with the increase of D_A . D_{50} and $b_{bp}(\lambda)$ showed a different relationship and had a good power exponential relationship, the more small particles in the water, the higher the particle backscattering coefficients value, and the correlation coefficient was 0.66 and 0.5 in summer and autumn, respectively. The influence of particle size distribution on $b_{bp}(\lambda)$ was difficult to be determined if without considering the seasonal difference.

Keywords Coastal water; Total suspended particulate concentration; Particle size; Backscattering properties

(Received Dec. 3, 2019; accepted Apr. 19, 2020)

* Corresponding author