doi:10.3969/j.issn.1003-2029.2020.03.001

北部湾后向散射系数的时空分布与变化分析

王浩宏[1],刘大召[1,2*]

(1. 广东海洋大学 电子与信息工程学院,广东 湛江 524088;2. 南海资源大数据中心 南方海洋科学与工程广东省实验室(湛江),广东 湛江 524002)

摘 要:后向散射系数是固有光学量中散射系数的重要组成部分,在海洋水色遥感反演中具有重要的作用。本文对比分析了北部湾 2017 年冬季和 2018 年夏季 41 个站位点所测得的数据,得到后向散射系数的空间分布以及后向散射系数与悬浮泥沙之间的关系,主要获得如下结论:(1)后向散射系数光谱曲线呈现平缓减少趋势,各个波段的后向散射系数的光谱模型呈乘幂形式;(2)北部湾后向散射系数空间分布特征受潮汐洋流的控制,表现为近岸高值、离岸低值的特征,与黄海、东海等海域后向散射系数空间分布相类似,而且冬季高值区域分布比夏季大;(3)后向散射系数与悬浮泥沙质量浓度相关性较好,其判定系数 R^2=0.69,可建立与悬浮泥沙质量浓度的关系模型。

关键词:北部湾;后向散射系数;时空分布;悬浮泥沙质量浓度

中图分类号:P731.15 **文献标志码**:A **文章编号**:1003-2029(2020)03-0001-07

我国海洋产业发展正处于有史以来的最佳时期,为我国建设强大的海洋国家奠定了坚实的基础。在我国,北部湾具备很大的发展潜力,有优质的良港和丰富的资源[1]。同时,由于独特的地理位置,北部湾成为中国华南地区乃至大西南航运货物的重要出海航道,具有产生巨大经济效益的潜力[2]。此外,广西大量入海径流为北部湾提供丰富的营养成分,推动其成为我国重要的水产养殖基地和优质渔场之一[3]。进入 21 世纪后,在国家战略指导下,北部湾区域迅速发展,但伴随而来的,其海洋生态环境方面所承受的挑战日益增大[4]。

在水色遥感反演中,后向散射系数起着非常关键的作用。后向散射系数的测量与剖析是光学测量与分析的要素,它的大小与水中各成分的浓度有关,可以直接反映水体成分的变化,通过对后向散射系数的研究可揭示水体的光学特征。此外,根据颗粒物与散射的经典基础理论之一的 Mie 散射理论,水体中悬浮颗粒物包括浮游植物和泥沙类等对海水中后向散射性质有较大的影响[5]。因此,探讨悬浮颗粒物中各成分与后向散射特性之间的关系能够更好地分析海水光学性质。研究水体的后向散射特性在海洋光学研究遥感监测和水色成分的海洋生物地球化学领域具备重要的价值和意义。纵观全球,在现场获取后向散射系数方法越发先进的前提下,国内外有很多学者对后向散射系数进行了研究和讨论,包括:浮游植物的后向散射特性模型[6];悬浮颗粒物对海洋水体后向散射系数特性影响[7];黄海、东海后向散射系数统计模型[8];湛江湾后向散射系数在空间上的分布[9]等。国内学者关于太湖[10-11]与鄱阳湖[12]后向散射系数的研究也比较多。

本文利用 2017 年冬季和 2018 年夏季出海调查北部湾海域获取的数据,分析对比冬、夏两季的变化和差异,探讨北部湾海域的后向散射系数的时空分布随季节的变化规律,剖析悬浮泥沙质量浓度和叶绿素质量浓度两者分别与后向散射系数之间的相关性,探讨他们之间的关系的强弱,为进一步深入探讨北部湾海域水体的固有光学特性提供基础研究。

收稿日期:2019-10-24

基金项目:南方海洋科学与工程广东省实验室(湛江)资助项目(ZJW-2019-08);大学生创新创业训练计划资助项目(CXXL2019275)

作者简介:王浩宏(1999-),男,学士,主要从事海洋水色遥感应用研究。E-mail:whhaa99@163.com

通讯作者:刘大召(1972-),男,博士,副教授,主要从事海洋水色遥感应用研究。E-mail:llddz@163.com

1 研究范围与时间

针对北部湾海域的自然地理环境特征，海上调查总共设有 41 个站位点(图 1)，分为 7 个断面。由图 1 可知，靠近广西壮族自治区防城港市和北海市海域的断面设有 5 个站位点，靠近海南岛北部海域的断面设有 3 个站位点，而在这 2 个断面之间的其余 5 个断面分别设有 6 至 7 个站位点。站位点的设置主要考虑能够尽量地对北部湾海域实现网状式的海上调查，增加可信度。出海调查时间上分别为 2017 年冬季和 2018 年夏季出海航次，为深入研究北部湾后向散射系数的空间分布提供了详实的数据。

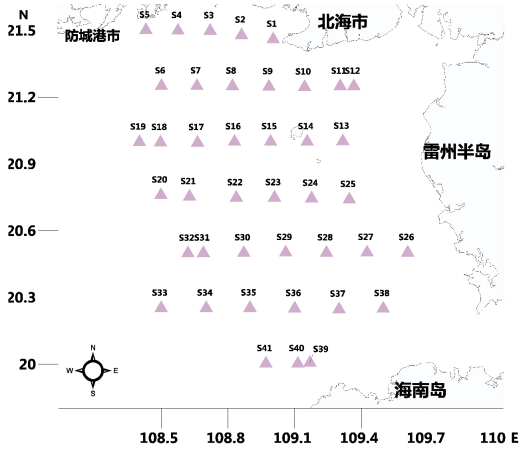


图 1 研究区域与站位设置

2 数据的测量与获取

常见的后向散射系数测量方法有直接获取法和间接获取法。直接获取法是使用后向散射系数测量仪器进行测量。随着研究人员对后向散射特性的深入研究的以及现代化测量技术的发展，技术趋于成熟，测量后向散射系数的仪器也越来越多，目前，主要通过后向散射系数测量仪对水体后向散射系数进行现场测量[13]；间接获取法是利用比较容易测量的吸收系数和水面光谱的水体散射相函数计算得出的，可反演水体中悬浮颗粒物后向散射系数[14]。

本次研究在船舶现场对海水的后向散射系数进行了测量，在实验室内进行悬浮泥沙浓度、叶绿素浓度等数据的测量与处理[9]。后向散射系数的测量采用 HOBI Labs 公司的 hydroscat-6p 仪器。本仪器具备完好的嵌入式的控制单元，数据存储单元以及可再充电电池，具有体积小、使用方便等特点。hydroscat-6p 包含 6 个独立的通道（每个通道的中心波长分别为 420 nm，442 nm，470 nm，510 nm，590 nm 和 700 nm）。此外，各个通道都有各自的光源和光接收装置。而对于每个通道波段的光源来说，都能产生独特的光并射入水中，同时，被水体散射的部分光就会被光接收装置所接收[15]。

为防止海表不确定要素对研究结果的影响，这次研究所采用的后向散射数据取仪器在下水至到达该站位点的最大深度所测得的数据，再去除掉深度小于 0.5 m 的数值，然后取其均值代表海洋表层水体的后向散射系数。

3 结果与分析

3.1 后向散射系数的统计值

表 1 和表 2 分别为北部湾夏季和冬季的后向散射系数的统计值，可较为明显地看出，每个通道之间都有很强的相关性。

在夏季时，参考通道波长 470 nm 和其余剩下通道波长 420 nm，442 nm，510 nm，590 nm 和 700 nm 之间相关系数分别为：0.973 0，0.981 0，0.966 0，0.904 5 和 0.848 6。相关系数最小值为 0.848 6，

表 1 夏季后向散射系数的统计值

统计值	bb420	bb442	bb470	bb510	bb590	bb700
平均值	0.065 210	0.065 071	0.065 831	0.062 964	0.058 092	0.054 011
最大值	0.244 307	0.247 670	0.251 066	0.249 068	0.233 704	0.222 105
最小值	0.008 420	0.008 798	0.009 146	0.006 905	0.004 473	0.001 017

表 2 冬季后向散射系数的统计值

统计值	bb420	bb442	bb470	bb510	bb590	bb700
平均值	0.059 377	0.059 686	0.059 966	0.056 363	0.053 242	0.050 058
最大值	0.187 137	0.190 623	0.193 622	0.183 887	0.179 277	0.174 710
最小值	0.007 989	0.007 828	0.007 371	0.006 427	0.006 052	0.002 099

平均值为 0.942 7。同理可得冬季的相关系数分别为:0.973 2,0.983 2,0.944 0,0.907 8 和 0.870 0。相关系数的最小值为 0.870 0,平均值为 0.935 6。相对来说,夏季时的后向散射系数平均值和最大值均比冬季时要高。

3.2　后向散射系数的光谱曲线

图 2 和图 3 分别为北部湾 6 个波段通道,在夏季和冬季时的后向散射系数光谱曲线图。可以明显地看出,夏季后向散射系数的最大值比冬季大,总体而言,大多数站位点的后向散射系数值都相对较低,均小于 0.15 m^{-1},数值大部分集中在 0.1 m^{-1} 左右和 0.05 m^{-1} 以下,只有少数站位点的数值在 0.15 m^{-1} 以上。图中光谱线条较为平缓,但整体上后向散射系数随着波长的增加呈减少趋势,其中,明显以第 3 通道处(中心波长为 470 nm)为最大峰值。而经过查找站位点记录确认图 2 和图 3 中后向散射系数值高于 0.15 m^{-1} 的曲线均为距离岸边较近的站位点。冬夏季对比来看,夏季的后向散射系数最高值比冬季大且都为同一站位点,冬季数值集中在 0.1 m^{-1} 的站位点比夏季多。

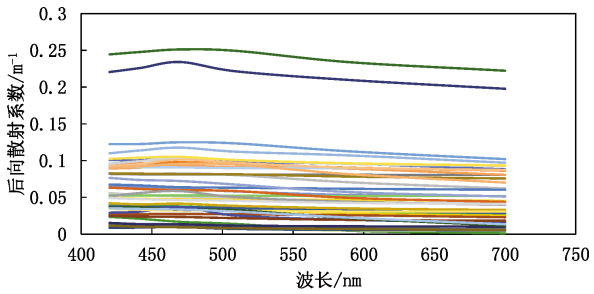


图 2　北部湾海域夏季表层水体后向散射系数光谱曲线

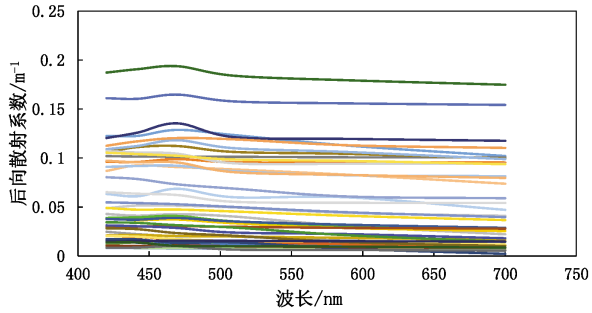


图 3　北部湾海域冬季表层水体后向散射系数光谱曲线

北部湾大范围存在明显的全日潮和不正规全日潮[16],其中在北部以全日潮为主,在东部为不正规全日潮[17]。不管在涨潮或者落潮的时候,海底浅滩泥沙都会被掀起,这直接引致水体中悬浮泥沙含量的急剧增大,悬浮颗粒物浓度会在短时间内有一定幅度的上升。由于北部湾海洋潮汐洋流动力明显,潮余流等水体扰动引发海水中悬浮颗粒物的成分发生剧烈的变化[16]。同时,海水中的悬浮颗粒物对光线的折射也相应地变得极其不稳定,从而造成后向散射系数比较大[18]。因此,靠近岸边的区域其站位点所测得的后向散射系数数值较远离岸边的区域高。

3.3　后向散射系数光谱模型

国内外许多学者模拟了不同地方悬浮颗粒物后向散射系数的光谱特性并建立不同的光谱模型,研究结果一致证实悬浮颗粒物后向散射系数的光谱模型满足如下指数关系[19-23],如式(1)所示:

$$\frac{b_b(\lambda)}{b_b(\lambda_0)}=\left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right)^n \tag{1}$$

式中:λ_0 是参考波长,$b_b(\lambda)$是所需要通过计算获取的波长的后向散射系数,$b_b(\lambda_0)$是参考通道波长的后向散射系数,n 是波长指数。

本次研究选择中心波长为 470 nm 的通道作为数据分析时的参考通道,剩余通道的后向散射系数采用式(2)与参考通道的后向散射系数进行线性拟合,然后再利用波长之间的比值与通过线性拟合之后所得出的的系数 A,进行两者之间的幂函数拟合。

$$b_b(\lambda)=A\,b_b(\lambda_0) \tag{2}$$

结果如图 4 和图 5 所示。最后,得到了北部湾夏季和冬季后向散射系数光谱模型,如式(3)和式(4)所示:

$$\frac{b_b(\lambda)}{b_b(\lambda_0)}=\left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right)^{-0.283} \tag{3}$$

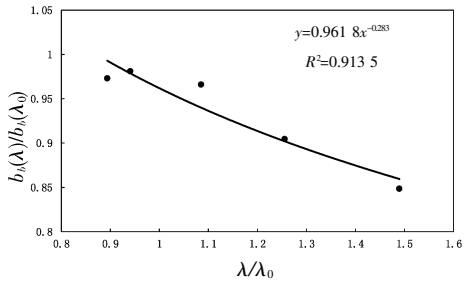


图 4　北部湾海域夏季后向散射系数光谱曲线

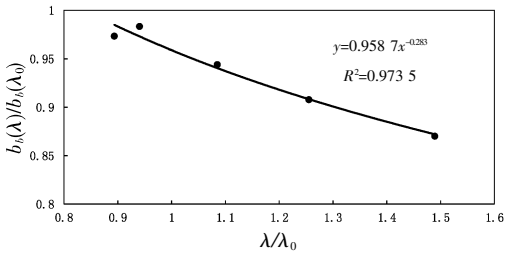


图 5　北部湾海域冬季后向散射系数光谱曲线

$$\frac{b_b(\lambda)}{b_b(\lambda_0)}=\left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right)^{-0.238} \tag{4}$$

北部湾的夏冬两季后向散射系数的波长指数分别为 0.28 和 0.24，和黄、东海的波长指数为 1.54 相比差距较大，而悬浮颗粒物中各成分浓度大小对后向散射系数有着不可忽视的重要影响，北部湾海域的悬浮泥沙浓度分布与黄、东海[24-28]的类似，都表现为近岸高、远岸低，悬浮颗粒物粒子直径随着深度的增大而增大等，但从整体上看，北部湾水体的总悬浮物浓度（TSM）比黄、东海的要低[29-31]，两者的后向散射系数波长指数的差异可能是由于水中悬浮颗粒的组成不同所致[22]。

3.4 后向散射系数的空间分布

图 6 和图 7 分别为北部湾海域夏季和冬季后向散射系数的空间分布，可以看出，高值区域主要出现在沿海海域，防城港市以及海南岛北部海域为上下界限，在中间连接着涠洲岛，其中以北海市与雷州半岛围成的三角形海域的特征最为显著，直到北部湾中部海域，数值才呈现了一定程度的下降，等值线的疏密间接映射了后向散射系数的变化速率。等值线越集中，后向散射系数变化速率越快，反之亦然。

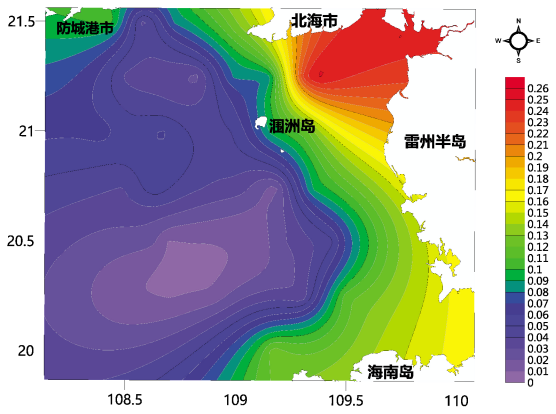


图 6 北部湾海域夏季后向散射系数的空间分布

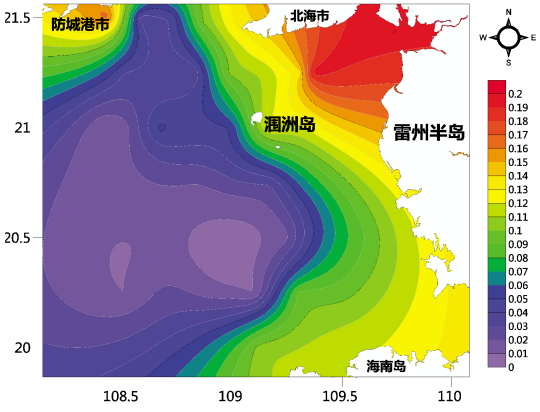


图 7 北部湾海域冬季后向散射系数的空间分布

从整体上看形成了沿着海岸高值分布的后向散射系数分布图。由于经过长期的观察与分析，海洋环流在北部湾海域终年为逆时针方向[32]，在夏季时北部湾虽然受到南和西南风季风的影响，但在密度梯度为主导因素的情况下形成逆时针环流[33]，在冬季时，季风则成为环流方向的主导因素，在东、东北季风的影响下，北部湾也同样呈现出逆时针方向的环流。除此之外，琼州海峡处海流方向全年基本上为由东向西流动[34]，悬浮物质受潮汐影响[35]与海流作用下经琼州海峡扩散到北部湾，并随着环流往北部湾东北部输送[36]，从而形成了高值区域。由于冬季物质通过琼州海峡的速度较夏季快而且物质的扩散范围比夏季大[37]，因此对应图中北部湾冬季后向散射系数大于 0.1 m^{-1} 的范围比夏季的大。北部湾后向散射系数分布特征与浊度和叶绿素[26]分布类似，浊度可以反映悬浮颗粒物浓度变化，浮游植物和泥沙类悬浮物是海水悬浮颗粒物的主要组成部分，而且叶绿素浓度可以反映浮游植物丰度[38]，因此，推测后向散射系数的大小与该区域叶绿素以及悬浮泥沙浓度大小有关。

3.5 后向散射系数与悬浮泥沙浓度和叶绿素浓度的关系

以夏季为例，图 8 和图 9 分别为北部湾夏季后向散射系数与悬浮泥沙质量浓度、叶绿素质量浓度

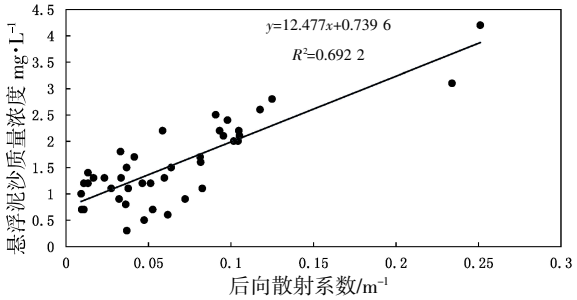


图 8 后向散射系数与悬浮泥沙质量浓度的关系

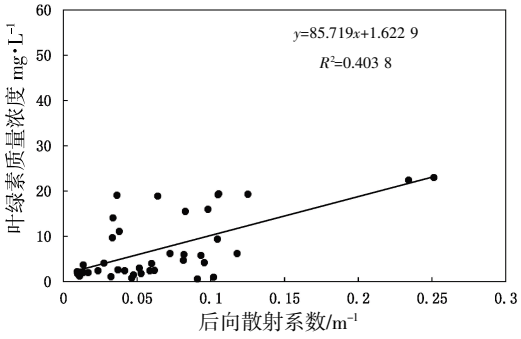


图 9 后向散射系数与叶绿素质量浓度的关系

的关系，可以明显看出后向散射系数与悬浮泥沙质量浓度两者之间的存在较为强的相关性，而且相关系数的平方 R^2=0.69。然而，后向散射系数与叶绿素质量浓度之间则存在较弱的相关性，相关系数的平方 R^2=0.40。研究表明北部湾研究区域水体后向散射系数主要受海水中悬浮泥沙质量浓度的影响，而叶绿素质量浓度对其影响不大，结果与太湖及黄、东海等类似[10-11,39-40]。

4　结 论

本文利用在 2017 年冬季和 2018 年夏季在北部湾海域出海调查所获取的后向散射数据、悬浮泥沙以及叶绿素等数据，研究冬夏两季北部湾海域的后向散射系数的时间与空间分布的变化差异，通过分析后向散射系数的变化，建立了北部湾海域的后向散射系数的光谱模型。结论如下：

（1）后向散射系数冬夏季光谱曲线整体上较为平缓，夏季后向散射系数最大值和平均值都比冬季时要高，冬季时波长指数为 0.24，夏季时波长指数为 0.28。

（2）后向散射系数在高值区域沿岸分布，数值在 0.1 m^{-1} 以上，而对于远离海岸的区域，后向散射系数在 0.1 m^{-1} 以内。高值区域的范围以防城港市、北海市、涠洲岛为边界线，并且向下延伸至海南岛西北部，其中以北海市和雷州半岛沿岸海域最为明显。在冬夏两季的分布上，冬季时后向散射系数平均值维持在 0.05~0.06 m^{-1} 之间，而夏季时则维持在 0.05~0.07 m^{-1} 之间。

（3）悬浮泥沙质量浓度和后向散射系数之间存在较好的相关性，二者的相关系数的平方 R^2=0.69，能够利用后向散射系数建立其与悬浮泥沙质量浓度的遥感模型，进行水色遥感反演等研究。

参考文献：

[1] 刘嘉麒.关于建设北部湾生态环境经济发展区的构想与建议[J].中国科学院院刊,2005,20(4):275-276.

[2] 陈兰,蒋清华,石相阳,等.北部湾近岸海域环境质量状况、环境问题分析以及环境保护建议[J].海洋开发与管理,2016,33(6):28-32.

[3] 徐姗楠,林华剑,戴明,等.广西近岸海域浮游植物群落的生态特征[J].生态学杂志,2014,33(10):2733-2739.

[4] 袁涌铨,吕旭宁,吴在兴,等.北部湾典型海域关键环境因子的时空分布与影响因素[J].海洋与湖沼,2019,50(3):579-589.

[5] 杨玉峰,秦建华,李挺.海水中悬浮物的光散射特性研究[J].电子测量与仪器学报,2018,32(7):145-150.

[6] Vadakkechanat S, Shanmugam P, Ahn Y H. A model for deriving the spectral backscattering properties of particles in inland and marine waters from in situ and remote sensing data[J]. IEEE Transactions on Geoscience, Remote Sensing, 2017, 55(99):1-16.

[7] 姜玲玲,赵冬至,王林,等.水体后向散射特性研究进展[J].遥感技术与应用,2013,28(1):150-156.

[8] 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].海洋技术学报,2004,23(3):10-14.

[9] 刘大召,余果.湛江港水体夏季后向散射特性[J].广东海洋大学学报,2018,38(4):70-76.

[10] 乐成峰,李云梅,查勇,等.太湖水体后向散射特性模拟[J].水科学进展,2009,20(5):707-713.

[11] 阎福礼,王世新,周艺,等.太湖浮游藻类的后向散射分离及其叶绿素 a 浓度反演[J].地球信息科学学报,2014,16(6):989-996.

[12] 翟彦放,邱月,陈方圆,等.基于遥感数据的鄱阳湖水体后向散射系数反演[J].城市勘测,2016(3):71-75.

[13] 陈利博,李铜基,黄妙芬,等.两种水体后向散射系数测量方法的比较研究[J].海洋技术学报,2011,30(1):57-60.

[14] 李俊生,张兵,张霞,等.一种计算水体中悬浮物后向散射系数的方法[J].遥感学报,2008,12(2):193-198.

[15] 顾艳镇,刘玉光,修鹏,等.6 通道后向散射仪[J].气象水文海洋仪器,2008(2):4-7.

[16] 孙洪亮,黄卫民.北部湾潮汐潮流的三维数值模拟[J].海洋学报,2001,23(2):1-8.

[17] 刘爱菊,张延廷.北部湾潮汐数值预报及其分析[J].海洋与湖沼,1997,28(6):640-645.

[18] Maffione R A, Dana D R. Instruments and methods for measuring the backward-scattering coefficient of ocean waters[J]. Applied Optics, 1997, 36(24): 6057-6067.

[19] Kokhanenko G P, Balin Y S, Penner I E, et al. Lidar and in situ measurements of the optical parameters of water surface layers in Lake Baikal[J]. Atmospheric, Oceanic Optics, 2011, 24(5):478-486.

[20] Xu C , Zheng B . Underwater image feature matching based on inhomogeneous illumination[M]. Advanced Technologies in Ad Hoc and Sensor Networks, Springer Berlin Heidelberg, 2014:379-385.

[21] Lee Z, Carder K L, Arnone R A. Deriving inherent optical properties from water color: a multiband quasi-analytical algorithm for optically deep waters[J]. Appl Opt, 2002, 41(27):5755-5772.
[22] 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.
[23] 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.
[24] 柏秀芳,龚德俊,等.北部湾悬浮颗粒现场剖面测量与粒度分析[J].海洋科学,2008,32(7):11-14.
[25] 杨克红,初凤友,杨海丽,等.海南岛东西陆架秋季悬浮体分布特征对比[J].海洋地质前沿,2006,22(8):12-15.
[26] 黄以琛,李炎,邵浩,等.北部湾夏冬季海表温度、叶绿素和浊度的分布特征及调控因素[J].厦门大学学报:自然版,2008,47(6):856-863.
[27] 虞兰兰,江文胜.黄、东海悬浮细颗粒物浓度和粒径分布变化研究[J].海洋与湖沼,2011,42(4):474-481.
[28] 尹小青,杨顶田,周立柱.黄、东海边界悬浮物输运量的卫星遥感估算[J].热带海洋学报,2018,37(2):10-16.
[29] 黄以琛.基于 MODIS 的北部湾与台湾海峡浊度季节分布及机制研究[D].厦门:厦门大学,2008.
[30] 李敏敏.我国典型近岸水体悬浮颗粒物后向散射特性研究[D].天津:国家海洋技术中心,2013.
[31] 凡仁福.基于 LISST-100X 观测黄东海悬浮颗粒物时空变化特征分析[D].天津:天津科技大学,2016.
[32] 陈振华.北部湾环流季节变化的数值模拟与动力机制分析[D].青岛:中国海洋大学,2013.
[33] 夏华永,李树华,侍茂崇.北部湾三维风生流及密度流模拟[J].海洋学报(中文版),2001,23(6):11-23.
[34] 柯佩辉.琼州海峡的海流和水交换的初步分析[J].热带海洋学报,1983,2(1):44-48.
[35] 徐振华,雷方辉,娄安刚,等.北部湾潮汐潮流的数值模拟[J].海洋科学,2010,34(2):10-14.
[36] 方雪原.北部湾冬夏季环流及其水交换的数值模拟研究[D].青岛:中国海洋大学,2014.
[37] 杨毅,徐艳东,王发云,等.粤西沿岸流和物质输移模型研究及应用[J].科学技术与工程,2015,15(19):80-85.
[38] Xing Q , Loisel H, Schmitt F G, et al. Fluctuations of satellite-derived chlorophyll concentrations and optical indices at the Southern Yellow Sea[J]. Aquatic Ecosystem Health and Management, 2012,15(2):168-175.
[39] 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.
[40] 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.

Spatio-temporal Distribution and Variation Analysis of Backscattering Coefficient in Beibu Gulf

WANG Hao-hong[1], LIU Da-zhao[1,2]

1. *School of Electronics and Information Engineering, Guang Dong Ocean University, Zhanjiang* 524088, *Guangdong Province, China*;
2. *Marine Resources Big Data Center of South China Sea, Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhanjiang), Zhanjiang* 524002, *Guangdong Province, China*

Abstract: Backscattering coefficient is an important part of intrinsic optical quantity, and plays an important role in ocean color remote sensing inversion. The spatial distribution of backscattering coefficient and the relationship between backscattering coefficient and suspended sediment were obtained by comparing and analyzing the data measured at 41 stations in Beibu Gulf in winter of 2017 and summer of 2018. The main conclusions are as follows: (1) the spectral curve of backscattering coefficient shows a gentle decreasing trend, and the spectral model of backscattering coefficient in each band is in the form of power ; (2) Beibu Gulf The spatial distribution of backscattering coefficient is controlled by tidal current, which is characterized by high value near shore and low value offshore, which is similar to the spatial distribution of backscattering coefficient in Yellow Sea, East China Sea and so on. Besides, the distribution of high value area in winter is larger than that in summer; (3) There is a good correlation coefficient between backscattering coefficient and suspended sediment mass concentration, and its coefficient of determination R^2=0.69, the relationship model between backscattering coefficient and suspended sediment mass concentration can be established.

Key words: Beibu Gulf; backscattering coefficient; spatial and temporal distribution; suspended sediment mass concentration