

黄渤海悬浮颗粒物密度的空间分布及其对固有光学特性的影响*

Spatial Distribution of Suspended Particle Density in the Yellow Sea and Bohai Sea and Its Effect on Inherent Optical Properties

苏校平, 孙德勇**, 丘仲锋, 王胜强, 路颖, 吴晨颖, 叶之翩, 岳小媛

SU Xiaoping, SUN Deyong, QIU Zhongfeng, WANG Shengqiang, LU Ying, WU Chenying, YE Zhipian, YUE Xiaoyuan

(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】研究悬浮颗粒物密度在黄渤海的空间分布特征及其对水体固有光学特性的影响。【方法】利用2014年11月以及2015年8月现场实测数据, 计算得到黄渤海悬浮颗粒物密度, 绘制出黄渤海悬浮颗粒物密度的空间分布图。将研究区域悬浮颗粒物密度与固有光学特性进行拟合分析。【结果】两个航次悬浮颗粒物密度的空间分布比较复杂, 但整体趋势显示中层密度要小于表层和底层。在表层、中层和底层的密度分布图中, 黄河口附近均有密度小值区域, 山东半岛附近有密度大值区域, 随着深度增加该大值区域有南移趋势。悬浮颗粒物密度与比固有光学特性 c_p^* 、 b_p^* 、 b_{bp}^* 拟合所得到的 P 值绝大部分小于 0.05, 与固有光学特性 c_p 、 b_p 、 b_{bp} 拟合得到的 P 值全部大于 0.05, 而与 Q_{ce} 、 Q_{be} 、 Q_{bbe} 拟合得到的 P 值多数大于 0.05。【结论】悬浮颗粒物密度对比固有光学特性变化影响较大, 尤其对 c_p^* 影响达到 51%; 对 Q_{ce} 、 Q_{be} 、 Q_{bbe} 的变化影响一般; 对 c_p 、 b_p 、 b_{bp} 变化影响较小。
关键词: 悬浮颗粒物密度 固有光学特性 时空分布 黄渤海

中图分类号: P73 文献标识码: A 文章编号: 1005-9164(2016)06-0538-10

Abstract:【Objective】To study the spatial distribution characteristic of suspended particle density in the Yellow Sea and Bohai Sea and its impact on the inherent optical properties (IOPs) of the water bodies.【Methods】The in situ data in November 2014 and August 2015 were collected to get the suspended particle density and draw the map of spatial distribution. Fitting analysis

was conducted between the data of suspended particle density and those of inherent optical properties.【Results】In the surface, middle and bottom layers, the suspended particle density in the areas around the Yellow River Estuary was relatively low, while that around the Shandong Peninsula was relatively high. And the areas with high suspended particle density tended to move southwardly with the depth increasing. The P value of the fitting between the suspended particle density and the mass-specific inherent

收稿日期: 2016-08-04

作者简介: 苏校平(1993-), 女, 硕士研究生, 主要从事海洋水色遥感研究。

* 国家自然科学基金项目(41276186, 41576172, 41506200), 江苏省自然科学基金项目(BK20151526, BK20150914), 江苏省高校自然科学基金项目(15KJB170015), “全球变化与海气相互作用”专项(GASI03030101), 江苏省“青蓝工程”优秀青年骨干教师项目和南京信息工程大学大学生实践创新训练计划项目(201510300073, 201610300035, 201610300064)资助。

** 通信作者: 孙德勇(1984-)男, 副教授, 主要从事水光学、水环境遥感等方面的研究, E-mail: sundeyong1984@163.com。

optical properties was less than 0.05, but the other IOPs were more than 0.05. **【Conclusion】** The effect of the suspended particle density is greater than 51% of the variability on the mass-specific beam attenuation coefficient, and is small on the other IOPs.

Key words: suspended particle density, inherent optical properties, spatial distribution, the Yellow Sea and Bohai Sea

0 引言

【研究意义】水色受悬浮颗粒物的影响最为显著,这是我国近海水体光学特性的普遍特点之一^[1-2],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,因此它在沿海水域中起着十分重要的作用^[3]。除此之外,悬浮颗粒物还影响水体的光场变化,进而影响海洋的初级生产力^[4]。悬浮颗粒物密度,是描述悬浮颗粒物的一个重要物理参数。了解悬浮颗粒密度的空间分布特征,对悬浮颗粒动力学过程、海洋环境控制因素以及海洋水色遥感机理与应用的深入理解具有重要意义。在悬浮颗粒物含量较高的黄渤海海域,悬浮颗粒物密度对水体生物和化学过程都起着极其重要的作用,其分布以及对固有光学特性的影响机制研究也对海洋水色遥感研究具有重要意义^[5]。

【前人研究进展】国外学者在悬浮颗粒物与固有光学特性的关系上已经做了大量工作。Neukermans等^[6]开展了在光学性质复杂的海域中悬浮颗粒物密度对衰减系数和后向散射系数的影响研究,得到了悬浮颗粒物密度与固有光学特性的理论公式,并将悬浮颗粒物密度与平均粒径结合研究,得到了比衰减系数变化几乎全部受这两个量影响的结论;Boss等^[7]研究证实了悬浮颗粒物浓度与固有光学特性之间的密切关系;Babin等^[4]对于近岸和大洋水体悬浮颗粒物浓度与光散射特性的关系进行了研究探讨。Bowers等^[8]证明矿物质占多数的陆架浅海中散射系数的变化主要受密度影响。同时,国内学者已经开展了关于悬浮颗粒物浓度以及水体固有光学特性的研究。刘炜等^[1]利用2003年4月黄东海实验数据对中国黄东海海区的悬浮颗粒物的散射特性进行了研究;李铜基等^[2]对中国近海水体的后向散射系数进行了相关研究;虞兰兰等^[9]基于2006年6月以及2007年1月实测数据,对中国黄、东海的悬浮颗粒物浓度及其分布进行了研究;孙德勇等^[10]主要针对内陆二类水体固有光学特性及其季节性差异进行了研究。**【本研究切入点】**前人多以实验室测量和理论运算为主研究悬浮颗粒物对固有光学特性的影响,而对于现场测量数据的应用以及悬浮颗粒物密度对固有光学特性的影响研究比较少。**【拟解决的关键问题】**利用现场测量仪

器实测黄渤海水体固有光学特性(包括衰减系数、散射系数、后向散射系数、比衰减系数、比散射系数、比后向散射系数、衰减效率、散射效率和后向散射效率),以及悬浮颗粒物浓度,同时结合其他相关参量间接计算悬浮颗粒物的密度,得到其空间分布特征并分析悬浮颗粒物密度对固有光学特性的影响。

1 材料与方法

1.1 观测站位

研究区域为黄海和渤海,研究数据集由2014年11月和2015年8月两个航次的测量数据组成。航次站位分布分别如图1所示。

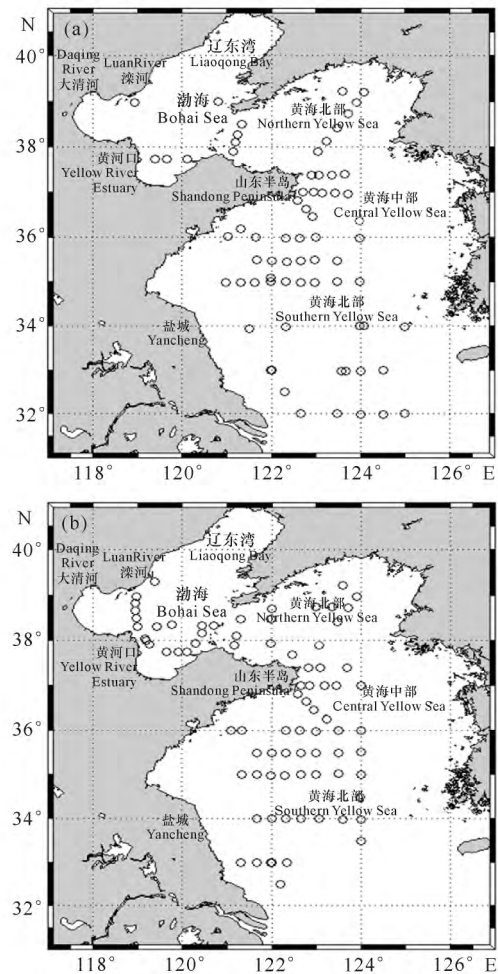


图1 航次调查站位(a:2014年11月航次;b:2015年8月航次)

Fig. 1 Locations of the sampling station(a:In November 2014 voyage;b:In August 2015 voyage)

1.2 数据测量及处理

总体积浓度 VC 、粒子数浓度 NC 均由 LISST-100 X (Type C) 现场激光粒度仪测量得到, LISST-100 X (Type C) 根据激光的衍射原理, 运用 Mie 散射理论, 可区分 32 个呈对数分布的粒级并可以给出每个粒级的体积浓度 $[VC]_i (i=1\sim 32)$ 。仪器得到的数据为不同粒径粒子的体积浓度, 将前 32 列数据求和得到悬浮颗粒物总体积浓度 VC 。将悬浮颗粒物近似看做球体, 则单位体积内所含的粒子个数由下式得:

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

其中, $V(D)$ 为 32 个不同粒级粒子各自的体积浓度, D 为对应的每个粒级粒径大小。

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

ΔD 为每个粒级的尺寸范围, $N(D)$ 为每单位尺寸、单位体积浓度所含的粒子个数 (粒子数 $\cdot \text{m}^{-3} \cdot \mu\text{m}^{-1}$)。具体原理及处理步骤可见仪器说明^[11]。

粒子光束衰减系数 c_p 和散射系数 b_p 均由 AC-S 水体光吸收-衰减系数测量仪测得。实际操作中需要对 AC-S 测得的衰减系数和吸收系数的原始数据进行温度、盐度和散射校正, 最终得到的水体散射系数 b_{nw} 是校正后的水体衰减系数 c_{nw} 与吸收系数 a_{nw} 的差, 即

$$b_{nw} = c_{nw} - a_{nw}, \quad (3)$$

设纯水的散射系数为 b_w , 则悬浮颗粒物的散射系数 b_p 为

$$b_p = b_{nw} - b_w. \quad (4)$$

后向散射系数 b_{bp} 的测量仪器为六通道后向散射仪(HS6)。HS6 在 412~852 nm 之间有 6 个波段配置, 通过测量出 140° 处的体散射函数 $U(\theta)$ 然后计算得到后向散射系数^[12]。HS6 使用时的数据校正主要为 sigma 校正。假设后向散射系数为 b_{bp} , 没有校正过的是 b_{pu} , 校正系数为 e , 则校正方法如下:

$$b_{bp} = e \cdot b_{pu}. \quad (5)$$

TSM 是运用 LISST-100 X (Type C) 结合 GF/F 滤膜测定得到。通过 Neukermans 等^[6]的研究, 得出 ρ_a 与 TSM 和 VC 的关系见式(6):

$$\rho_a = \frac{\text{TSM}}{\text{VC}}. \quad (6)$$

c_p 和 b_p 各自对应的比光束衰减系数 c_p^* 和比散射系数 b_p^* 分别由式(7)(8)得出:

$$c_p^* = \frac{c_p}{\text{TSM}}, \quad (7)$$

$$b_p^* = \frac{b_p}{\text{TSM}}. \quad (8)$$

b_{bp} 对应的比后向散射系数 b_{bp}^* 由式(9)得出:

$$b_{bp}^* = \frac{b_{bp}}{\text{TSM}}. \quad (9)$$

平均衰减效率 Q_{ce} 是由式(10)(11)推导而来, 其中, AC 为总粒子截面积浓度, 是由 LISST-100 X (Type C) 粒度仪测出 32 个粒级的截面积浓度后求和得到的总的截面积浓度。

$$Q_{ce} = \frac{c_p}{AC}, \quad (10)$$

$$AC = \frac{3}{2D}VC, \quad (11)$$

其中, 粒径 D 由 LISST-100 X (Type C) 粒度仪测得。由式(10)(11)推导出式(12)(文献[12])。

$$Q_{ce} = \frac{2Dc_p}{3VC}. \quad (12)$$

同理, 由式(10)(13)推导出式(14), 计算得到平均散射效率 Q_{be} :

$$Q_{be} = \frac{b_p}{AC}, \quad (13)$$

$$Q_{be} = \frac{2Db_p}{3VC}. \quad (14)$$

由式(10)和式(15)推导出式(16), 计算得到平均后向散射效率 Q_{bbe}

$$Q_{bbe} = \frac{b_{bp}}{AC}, \quad (15)$$

$$Q_{bbe} = \frac{2Db_{bp}}{3VC}. \quad (16)$$

2 结果与分析

2.1 实测数据处理

如表 1 所示, 2014 年 11 月实测数据经初步处理后, 各参量的变异系数整体偏高且相差较大, 最大的是 b_p^* , 达到 391.9%; 最小的是 c_p , 约 15%。其中, TSM、 ρ_a 、VC 3 个浓度量中, 变化幅度最大的是 TSM, 变异系数达到 161.3%; 最小的是 ρ_a , 只有 69.82%。整体来说比固有光学特性的变化幅度大于其他参量。同样, 由表 2 中 2015 年 8 月航次数据统计结果可见, TSM、 ρ_a 、VC 3 个量中, 仍是 TSM 变异系数最大, 达到 102.1%。 c_p 、 b_p 、 b_{bp} 变异系数差距很大, 变化幅度最大的 b_p 达到了 285.3%, 而变化幅度最小的 c_p 的仅为 17.4%。与 2014 年 11 月航次不同的是, 3 个比固有光学特性中, c_p^* 的变异系数最小, 为 79.49%。 Q_{ce} 、 Q_{be} 和 Q_{bbe} 中变异系数最小的是 Q_{ce} , 约为 42%, 最大的是 Q_{bbe} , 达到了 127.1%。整体上该航次 c_p 、 b_p 、 b_{bp} 的变化幅度比较大。两个航次的结果趋势上大致相同, 但整体上 2015 年 8 月航次的变化幅度小于 2014 年 11 月航次。

表 1 2014 年 11 月航次光学参量统计结果

Table 1 Statistical parameters of data collected in the Yellow Sea and Bohai Sea in November 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(%)
TSM(mg/L)	0.044	47.68	5.899	9.514	161.3
ρ_a (kg/L)	0.006	0.875	0.222	0.155	69.82
VC ($\mu\text{L/L}$)	3.31	151.2	25.52	32.28	126.5
c_p (m^{-1})	12.15	20.81	16.31	2.446	15.00
b_p (m^{-1})	0.095	18.07	2.221	3.741	168.4
b_{bp} (m^{-1})	0.001	0.663	0.057	0.116	203.5
c_p^* (m^2/g)	0.402	428.1	19.26	53.03	275.3
b_p^* (m^2/g)	0.006	141.5	4.904	19.22	391.9
b_{bp}^* (m^2/g)	4E-04	0.136	0.009	0.017	188.9
Q_{ce}	1.503	131.5	47.85	38.89	81.27
Q_{be}	0.014	94.90	8.115	15.65	192.9
Q_{bbe}	0.002	0.052	0.025	0.015	60.00

表 2 2015 年 8 月航次光学参量统计结果

Table 2 Statistical parameters of data collected in the Yellow Sea and Bohai Sea in August 2015

参量 Parameters	最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均值 Mean	标准差 SD	变异系数 CV(%)
TSM(mg/L)	0.773	31.41	5.578	5.692	102.1
ρ_a (kg/L)	0.031	0.951	0.251	0.178	70.88
VC ($\mu\text{L/L}$)	7.469	118.1	25.78	22.6	87.64
c_p (m^{-1})	10.05	26.67	15.11	2.629	17.4
b_p (m^{-1})	0.116	8.331	0.696	1.13	162.3
b_{bp} (m^{-1})	0.001	0.326	0.016	0.045	285.3
c_p^* (m^2/g)	0.555	19.3	5.06	4.022	79.49
b_p^* (m^2/g)	0.032	1.23	0.157	0.171	108.9
b_{bp}^* (m^2/g)	0.001	0.012	0.002	0.002	119.5
Q_{ce}	0.25	1.914	1.067	0.453	42.47
Q_{be}	0.005	0.156	0.037	0.031	83.44
Q_{bbe}	0.001	0.003	0.001	0.001	127.1

图 2 直观分析了两个航次 c_p 、 b_p 、 b_{bp} 数值分布情况。2014 年 11 月航次 c_p 数值分布以 18 左右最多(图 2a);数值上 b_p 比较小, b_{bp} 最小,但二者分布皆比

较均匀(图 2b 和 2c)。2015 年 8 月航次 c_p 数值分布在 15 左右较多,整体分布比较规律,无值处很少(图 2d);该航次 b_p 仍然比较小但大于 b_{bp} ,二者分布比较规律,缺值区域较少(图 2e 和 2f)。

进一步分析两个航次 c_p^* 、 b_p^* 、 b_{bp}^* 的数值分布,结果如图 3 所示:2014 年 11 月航次 c_p^* 以 $12 \text{ m}^2/\text{g}$ 左右为最多,整体分布比较均匀但是极差较大(图 3a); b_p^* 数值上比较小,多数分布在 0.1 左右,整体分布比较规律,缺值很少(图 3b); b_{bp}^* 最小,缺值区域较多(图 3c);2015 年 8 月航次 c_p^* 在 3 附近样本数较多,数值上小于 2014 年 11 月航次的(图 3d); b_p^* 和 b_{bp}^* 分布趋势比较规律,但是在数值上 b_p^* 要较 b_{bp}^* 大(图 3e 和 3f)。

同理,两个航次 Q_{ce} 、 Q_{be} 、 Q_{bbe} 的数值分布如图 4 所示:2014 年 11 月航次 Q_{ce} 分布比较均匀,以小于 10 为主(图 4a);数值上 Q_{be} 较小,1 附近较多且分布比较均匀(图 4b); Q_{bbe} 数值上最小,分布规律而且均匀(图 4c)。2015 年 8 月航次的 Q_{ce} 分布比较均匀,数值以 1.5 左右为主(图 4d); Q_{be} 比较小,多数分布在 0.05 以内,缺值区域较多(图 4e); Q_{bbe} 数值上最小,多数分布在 0.000 16 左右,缺值区域较少,分布较均匀(图 4f)。

为了直观分析比较悬浮颗粒物密度变化,图 5 给出了两个航次密度的频数分布,由图 5 可见,两个航次 ρ_a 整体分布都比较均匀且分布趋势相似,缺值区域较少。两个航次的数值分布区间大致相同,2014 年 11 月航次在 0.2 附近的样本数比较密集,而 2015 年 8 月航次中落在 0.1 左右的样本数较多。

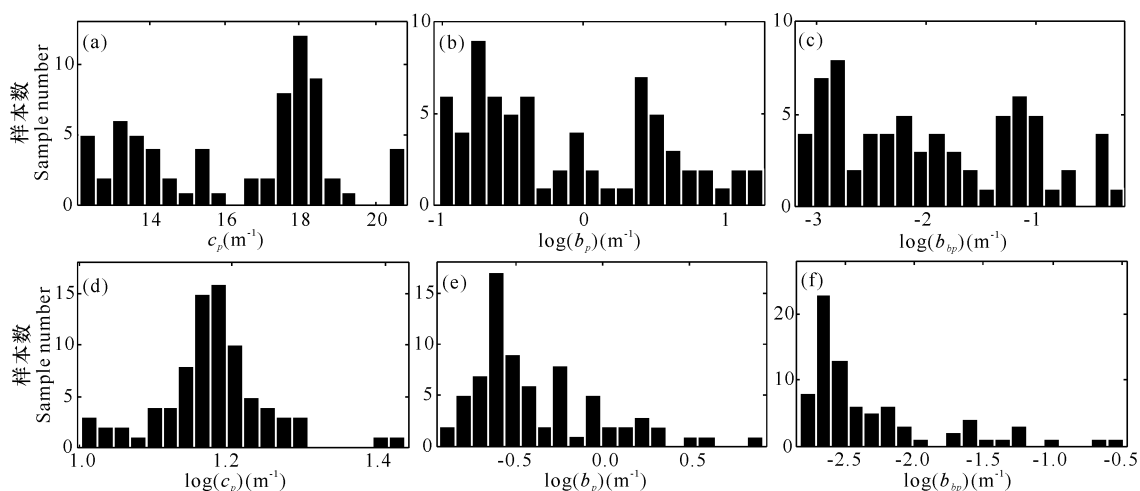


图 2 2014 年 11 月(a~c)和 2015 年 8 月(d~f)航次 c_p 、 b_p 、 b_{bp} 的频数分布

Fig. 2 Frequency distribution of c_p , b_p and b_{bp} in November 2014 (a~c) and August 2015 (d~f)

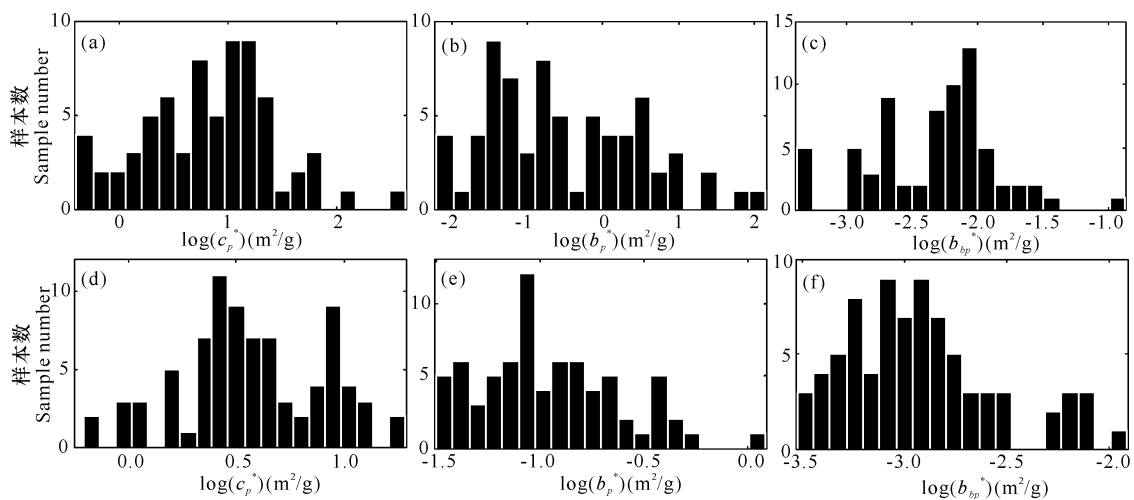


图3 2014年11月(a~c)和2015年8月(d~f)航次 c_p^* 、 b_p^* 、 b_{bp}^* 的频数分布

Fig. 3 Frequency distribution of c_p^* , b_p^* and b_{bp}^* in November 2014 (a~c) and August 2015 (d~f)

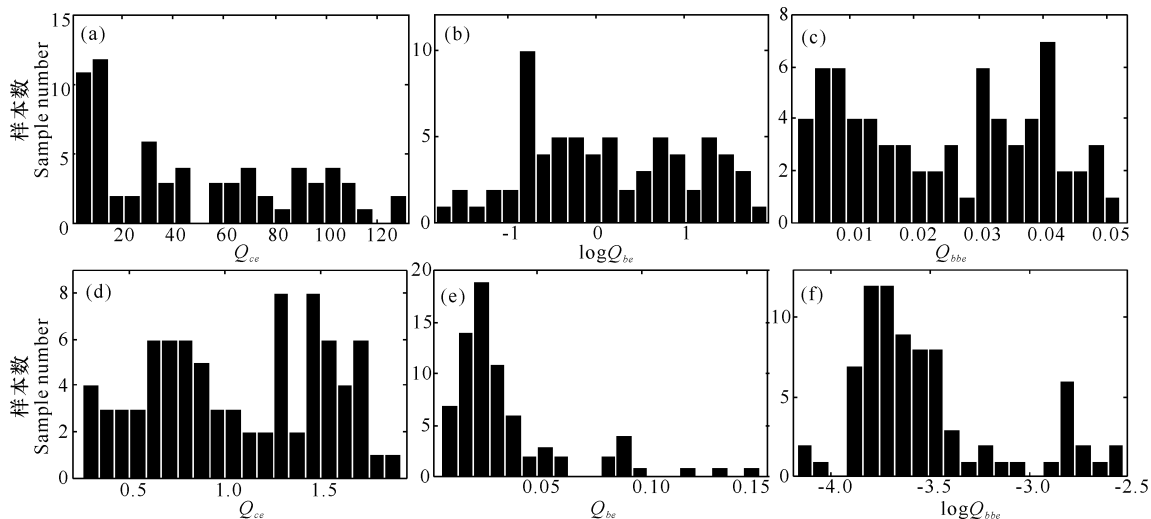


图4 2014年11月(a~c)和2015年8月(d~f)航次 Q_{ce} 、 Q_{be} 、 Q_{bbe} 的频数分布

Fig. 4 Frequency distribution of Q_{ce} , Q_{be} and Q_{bbe} in November 2014 (a~c) and August 2015 (d~f)

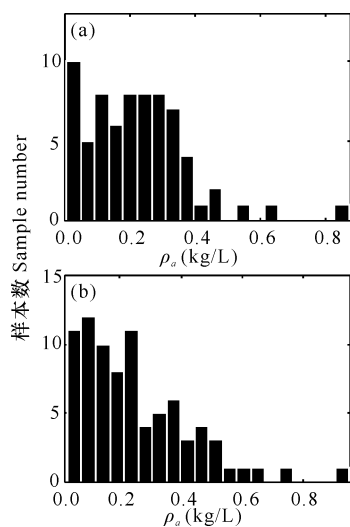


图5 2014年11月(a)和2015年8月(b)航次 ρ_s 的频数分布

Fig. 5 Frequency distribution of ρ_s in November 2014(a) and August 2015(b)

2.2 悬浮颗粒物密度的空间分布

对于2014年11月航次,表层在渤海大部和黄海北部以及中部悬浮颗粒物密度比较小,黄河口及山东半岛附近增大,黄海南部密度从中间向两侧降低,两侧出现极低值(图6a);中层悬浮颗粒物密度除渤海和黄海中部有小片高值外,大部分海域密度比表层要低,最大值出现在黄海中部(图6b);底层在渤海东部、大清河附近以及山东半岛南部密度较大,其他海域较小,底层最大值出现在黄海中部,围绕最大值向四周密度降低,至黄海南部最低(图6c)。对于2015年8月航次,表层极大值出现在大清河附近,除了黄河口附近,整个渤海密度都比较大,黄海密度较低,以黄海南部为中心向两侧密度增加(图6d);中层渤海密度明显小于表层,大清河附近海域以及渤海东北海域密度较大,整个中层密度最大值出现在黄海东北部和东南部小片海域,山东半岛附近及黄海中部偏西部

分海域密度较大,其他海域密度均较小(图 6e),由于数据缺失,只能得到底层黄海中部和南部海域密度分布;底层整体趋势为以黄海中部的极大值为中心向四周密度降低,盐城东侧出现极小值(图 6f)。综上可知,两个航次悬浮颗粒物密度的空间分布比较复杂,

但整体趋势显示中层密度要小于表层和底层。在各层密度分布图中,黄河口附近均有密度偏小值区域,山东半岛附近有密度偏大值区域,随着深度增加该大值区域有南移并增大的趋势。

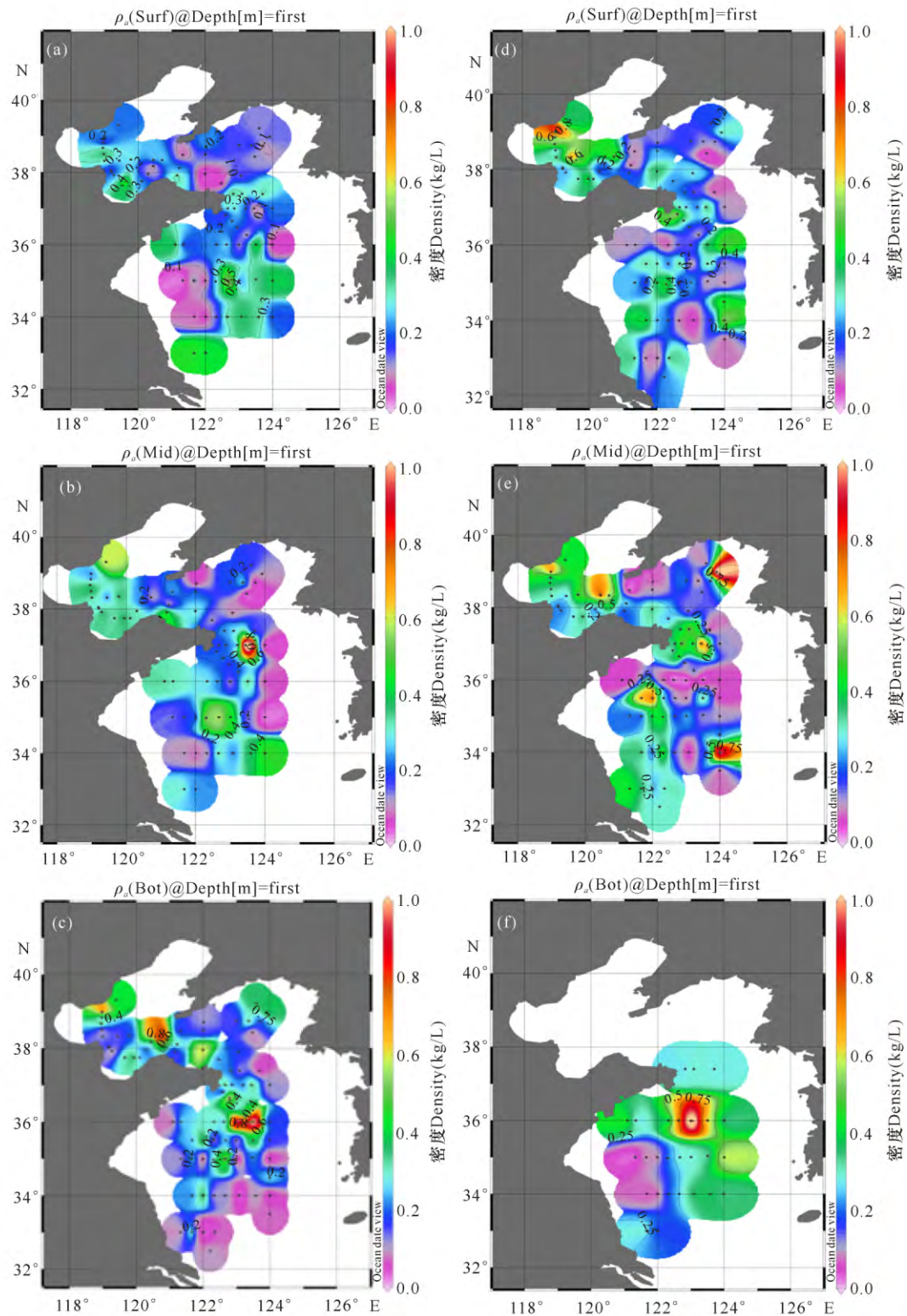


图 6 2014 年 11 月航次(a~c)和 2015 年 8 月航次(d~f)表、中、底 3 个层次密度分布

Fig. 6 Density distribution of surface, middle and bottom in November 2014 (a~c) and August 2015 (d~f)

2.3 密度对固有光学特性影响分析

2.3.1 对 c_p 、 b_p 、 b_{bp} 的影响

分别利用两个航次数据做回归分析,结果如图7所示,各量之间回归方程及决定系数见表3。2014年11月航次有7%的 c_p 受 ρ_a 影响,而2015年8月航次中有1%的 c_p 受 ρ_a 影响,两年的汇总量中,有约2%的 c_p 受 ρ_a 影响(图7a)。2014年11月航次有约6%的 b_p 受 ρ_a 影响,2015年8月航次有约4%的 b_p 受 ρ_a 影响,两年的汇总量中,有约2%的 b_p 受 ρ_a 影响(图7b)。2014年11月航次,有11%的 b_{bp} 受 ρ_a 影响,

2015年8月航次中有约7%的 b_{bp} 受 ρ_a 影响,两年的汇总量中,有约7%的 b_{bp} 受 ρ_a 影响(图7c)。由此可知,整体上两个航次的悬浮颗粒物密度与 c_p 、 b_p 、 b_{bp} 的相关性都较小。

2.3.2 对 c_p^* 、 b_p^* 、 b_{bp}^* 的影响

密度与比固有光学特性的相关关系回归分析如图8所示,各量之间回归方程及决定系数见表4。2014年11月航次有51%的 c_p^* 变化受 ρ_a 影响,同样2015年8月航次中也有51%,两个航次的汇总量中,

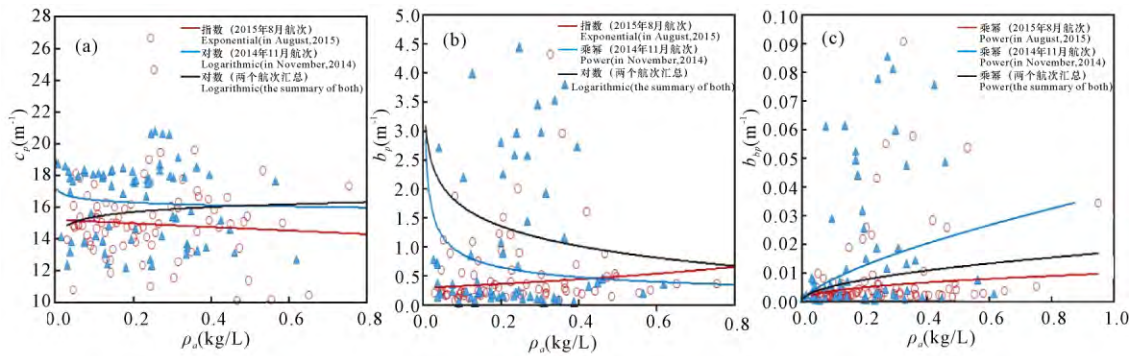


图7 两个航次以及两个航次汇总的 ρ_a 与 c_p 、 b_p 、 b_{bp} 拟合

Fig. 7 Density of two voyages and the summary of two voyages fitted to c_p , b_p and b_{bp}

表3 ρ_a 分别与 c_p 、 b_p 和 b_{bp} 的回归方程及决定系数

Table 3 The regression equation and correlation factor of ρ_a with c_p , b_p and b_{bp} respectively

所在图表 Figure	数据来源 Dataset	方程类型 Equation type	回归方程 Regression	决定系数 R^2 Determination coefficient R^2	P 值 P value
Fig. 7a	2015年8月航次 In August 2015 voyage	指数 Exponential	$y = 15.18e^{-0.07x}$	0.01	0.66 > 0.05
Fig. 7a	2014年11月航次 In November 2014 voyage	对数 Logarithmic	$y = 0.97\ln(x) + 17.93$	0.07	0.12 > 0.05
Fig. 7a	两个航次汇总 In both voyages	对数 Logarithmic	$y = 0.46\ln(x) + 16.42$	0.02	0.13 > 0.05
Fig. 7b	2015年8月航次 In August 2015 voyage	指数 Exponential	$y = 0.34e^{0.91x}$	0.04	0.42 > 0.05
Fig. 7b	2014年11月航次 In November 2014 voyage	乘幂 Power	$y = 0.35x^{-0.41}$	0.06	0.16 > 0.05
Fig. 7b	两个航次汇总 In both voyages	对数 Logarithmic	$y = -0.49\ln(x) + 0.61$	0.02	0.23 > 0.05
Fig. 7c	2015年8月航次 In August 2015 voyage	乘幂 Power	$y = 0.01x^{0.43}$	0.11	0.48 > 0.05
Fig. 7c	2014年11月航次 In November 2014 voyage	乘幂 Power	$y = 0.04x^{0.68}$	0.07	0.11 > 0.05
Fig. 7c	两个航次汇总 In both voyages	乘幂 Power	$y = 0.02x^{0.51}$	0.07	0.19 > 0.05

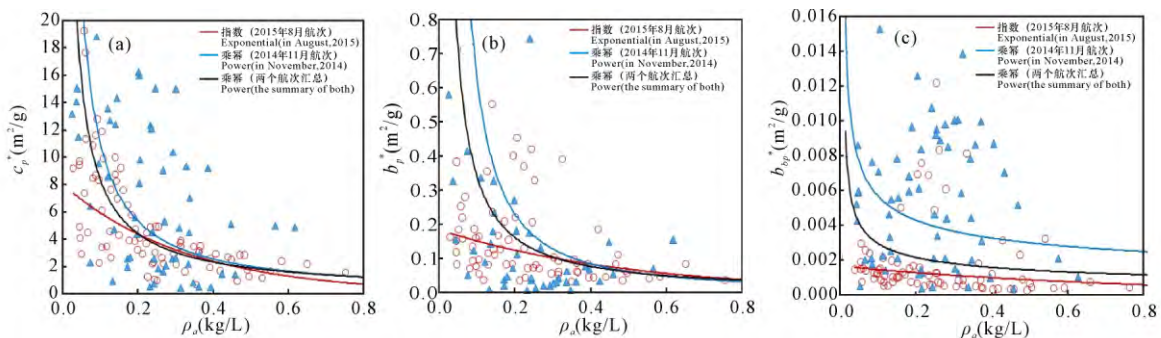


图8 两个航次以及两个航次汇总的 ρ_a 与 c_p^* 、 b_p^* 、 b_{bp}^* 散点图

Fig. 8 Density of two voyages and the summary of two voyages fitted to c_p^* , b_p^* and b_{bp}^*

有50%的 c_p^* 变化受 ρ_a 影响(图8a);2014年11月航次有33%的 b_p^* 变化受 ρ_a 影响,2015年8月航次有21%,两个航次的汇总量中,有26%的 b_p^* 变化受 ρ_a 影响(图8b);2014年11月航次有10%的 b_{bp}^* 变化受 ρ_a 影响,2015年8月航次中有7%,两个航次的汇总量中,有9%的 b_{bp}^* 变化受 ρ_a 影响(图8c)。综上所述, ρ_a 与 c_p^* 的相关性较其他两个量大,整体上 ρ_a 与比固有光学特性的相关关系比较大。

2.3.3 对 Q_{ce} 、 Q_{be} 、 Q_{bbe} 的影响

利用得到的数据做散点图并做回归分析,结果如图9所示,各量之间回归方程及决定系数见表5。2014年11月航次有6%的 Q_{ce} 变化受 ρ_a 影响,而2015年8月航次中只有4%,两年的汇总量中有6%的 Q_{ce} 变化受 ρ_a 影响(图9a);2014年11月航次中有10%的 Q_{be} 变化受 ρ_a 影响,而2015年8月航次有19%,两年的汇总量中有10%的 Q_{be} 变化受 ρ_a 影响(图9b);2014年11月航次有16%的 Q_{bbe} 变化受 ρ_a 影响,而2015年8月航次中有24%,两年的汇总量中有1%的 Q_{bbe} 变化受 ρ_a 影响(图9c)。综上所述, ρ_a 与 Q_{bbe} 的相关性比其他两个量大很多,2014年11

月航次 ρ_a 与 Q_{bbe} 的相关性要比与 Q_{ce} 和 Q_{be} 两个量大,但是仍然不及 ρ_a 与比固有光学量的相关性。

3 讨论

渤海的大清河和滦河附近密度值比较大,原因可能是滦河向渤海注入的大量泥沙产生堆积,使得近岸水深较浅,较浅的海水受风、波浪和流的影响使得水体底层运动比较活跃,易形成再悬浮,造成滦河附近底层密度高于表层。黄河口附近的密度偏小区域可能是由于黄河河口属于弱潮陆相河口,其突出特点有二:一是水少沙多、沙粗、洪枯悬殊、洪峰陡涨陡落,二是潮差相对小、海潮流速也小、海洋动力弱等^[13]。由于较弱的海洋动力以及较粗的泥沙导致再悬浮不活跃,因此该区域悬浮颗粒物密度较小。山东半岛附近随着深度增加有南移趋势的密度大值区域可能是由黄海沿岸流引起的。黄海沿岸流水色浑浊,带有大量悬浮颗粒物而且具有冬强夏弱的特点。本研究采用的两个航次数据均来自秋冬季节,北风占主导地位,向南流动的黄海沿岸流增强,因此呈现上述现象及趋势。

Table 4 The regression equation and correlation factor of ρ_a with c_p^* , b_p^* and b_{bp}^* respectively

所在图表 Figure	数据来源 Dataset	方程类型 Equation type	回归方程 Regression	决定系数 R^2 Determination coefficient R^2	P 值 P value
Fig. 8a	2015年8月航次 In August 2015 voyage	指数 Exponential	$y = 8.08e^{-3.05x}$	0.51	$5.53E-10 < 0.05$
Fig. 8a	2014年11月航次 In November 2014 voyage	乘幂 Power	$y = 0.96x^{-1.07}$	0.51	$0.005 < 0.05$
Fig. 8a	两个航次汇总 In both voyages	乘幂 Power	$y = 0.97x^{-0.94}$	0.50	$0.001 < 0.05$
Fig. 8b	2015年8月航次 In August 2015 voyage	指数 Exponential	$y = 0.18e^{-1.98x}$	0.21	$0.007 < 0.05$
Fig. 8b	2014年11月航次 In November 2014 voyage	乘幂 Power	$y = 0.02x^{-1.46}$	0.33	$0.018 < 0.05$
Fig. 8b	两个航次汇总 In both voyages	乘幂 Power	$y = 0.03x^{-1.08}$	0.26	$0.019 < 0.05$
Fig. 8c	2015年8月航次 In August 2015 voyage	指数 Exponential	$y = 0.01e^{-1.27x}$	0.07	$0.396 > 0.05$
Fig. 8c	2014年11月航次 In November 2014 voyage	乘幂 Power	$y = 0.01x^{-0.38}$	0.10	$0.052 > 0.05$
Fig. 8c	两个航次汇总 In both voyages	乘幂 Power	$y = 0.01x^{-0.42}$	0.09	$0.031 < 0.05$

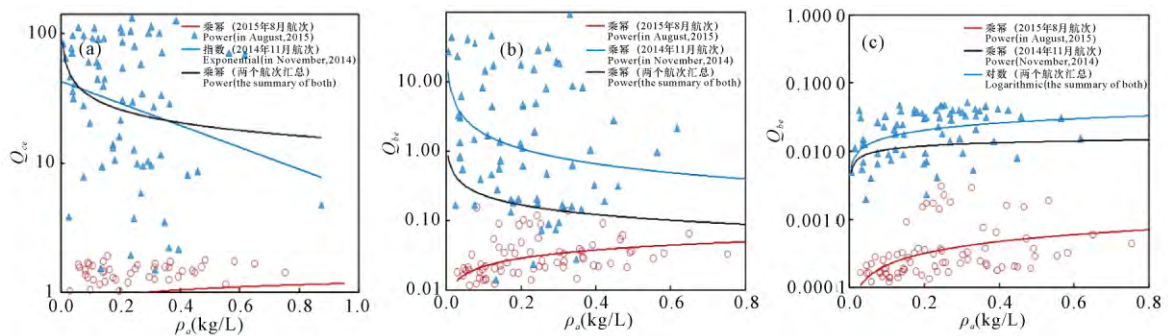


图9 两个航次以及两个航次汇总的 ρ_a 与 Q_{ce} 、 Q_{be} 、 Q_{bbe} 散点图

Fig. 9 Density of two voyages and the summary of two voyages fitted to Q_{ce} , Q_{be} and Q_{bbe}

表 5 ρ_a 分别与 Q_{ce} 、 Q_{be} 及 Q_{bbe} 的回归方程及决定系数

Table 5 The regression equation and correlation factor of ρ_a with Q_{ce} , Q_{be} and Q_{bbe} respectively

所在图表 Figure	数据来源 Dataset	方程类型 Equation type	回归方程 Regression	决定系数 R^2 Determination coefficient R^2	P 值 P value
Fig. 9a	2015 年 8 月航次 In August 2015 voyage	乘幂 Power	$y = 1.18x^{0.13}$	0.04	0.152 > 0.05
Fig. 9a	2014 年 11 月航次 In November 2014 voyage	指数 Exponential	$y = 42.59e^{-1.94x}$	0.06	0.198 > 0.05
Fig. 9a	两个航次汇总 In both voyages	乘幂 Power	$y = 15.05x^{-0.34}$	0.06	0.116 > 0.05
Fig. 9b	2015 年 8 月航次 In August 2015 voyage	乘幂 Power	$y = 0.55x^{0.41}$	0.19	0.045 < 0.05
Fig. 9b	2014 年 11 月航次 In November 2014 voyage	乘幂 Power	$y = 0.34x^{-0.73}$	0.10	0.219 > 0.05
Fig. 9b	两个航次汇总 In both voyages	乘幂 Power	$y = 0.08x^{-0.47}$	0.10	0.160 > 0.05
Fig. 9c	2015 年 8 月航次 In August 2015 voyage	乘幂 Power	$y = 0.01x^{0.57}$	0.24	0.009 < 0.05
Fig. 9c	2014 年 11 月航次 In November 2014 voyage	乘幂 Power	$y = 0.04x^{0.36}$	0.16	0.003 < 0.05
Fig. 9c	两个航次汇总 In both voyages	对数 Logarithmic	$y = 0.01\ln(x) + 0.02$	0.01	0.383 > 0.05

悬浮颗粒物密度与比固有光学特性拟合所得到的 P 值绝大部分小于 0.05, 拟合效果较好, 其中, 悬浮颗粒物密度与 c_p^* 拟合效果最好, 两个航次 c_p^* 的变化均有约 51% 受悬浮颗粒物密度影响, 对于 b_p^* 则有 20%~30% 受其影响, 而对于 b_{bp}^* 则只有不到 10% 受其影响。Neukermans 等^[6] 曾将悬浮颗粒物密度与粒径结合起来, 对比衰减系数和比后向散射系数变化的影响方面做了研究, 研究结果显示 c_p^* 是受悬浮颗粒物密度和粒径影响最大的量, 约有 77% 的变化受其影响, 而对于 b_p^* 则只有 40%~60%。黄渤海为典型的二类水体, 光学特性复杂, 针对这种情况, 本研究将悬浮颗粒物密度分离出来做研究, 单独研究其对固有光学特性的影响, 在悬浮颗粒物密度对比衰减系数和比后向散射系数变化的影响方面, 本研究结果与 Neukermans 的研究结果趋势相似。除此之外, 本研究还将悬浮颗粒物密度对 c_p 、 b_p 、 b_{bp} 、 c_p^* 、 b_p^* 、 b_{bp}^* 以及 Q_{ce} 、 Q_{be} 、 Q_{bbe} 这 9 个固有光学特性的影响分别进行了研究, 量化其对固有光学特性的影响。

4 结论

本研究结合实测数据计算出黄渤海的悬浮颗粒物密度, 绘制出表层、中层和底层悬浮颗粒物密度的空间分布图并进行了相关分析, 研究了悬浮颗粒物密度对固有光学特性的影响。结果表明: 整体来看, 2014 年 11 月航次和 2015 年 8 月航次中层的悬浮颗粒物密度比上层和底层的小; 在各层分布中, 黄河口附近均有密度小值区域, 山东半岛附近有密度大值区域, 随着深度增加该大值区域有南移趋势。悬浮颗粒物密度对比固有光学特性 c_p^* 、 b_p^* 、 b_{bp}^* 变化影响较大,

尤其对 c_p^* 影响达到 51%; 对 Q_{ce} 、 Q_{be} 、 Q_{bbe} 的变化影响一般, 其中受影响最大的是 Q_{bbe} 达到 24%; 对 c_p 、 b_p 、 b_{bp} 变化影响较小, 其中受影响最大的 b_{bp} 仅有 11%。

在研究黄渤海的悬浮颗粒物密度对固有光学特性的影响时, 本文所研究的散射系数和后向散射系数均选取波段 640 nm 作为参考波长, 并未对其它波段进行研究, 下一步可对不同波长处的影响进行分析, 量化其光谱差异性。同时, 在空间分布上, 本研究仅选取两个航次数据, 接下来可选取长时间序列数据对空间分布进行定性研究。

致谢

感谢中国海洋大学信息科学与工程学院张亭禄老师的支持, 感谢陈树果博士在野外数据观测过程中给予的帮助。

参考文献:

- [1] 刘炜, 李铜基, 朱建华, 等. 黄东海海区总悬浮物散射特性研究[J]. 海洋技术, 2007, 26(2): 42-46.
LIU Y, LI T J, ZHU J H, et al. Study of scattering properties of total suspended matter in the Yellow Sea and East China Sea[J]. Ocean Technology, 2007, 26(2): 42-46.
- [2] 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.
- [3] ASTORECA R, DOXARAN D, RUDDICK K, et al. In-Guangxi Sciences, Vol 23 No 6, December 2016

- fluence of suspended particle concentration, composition and size on the variability of inherent optical properties of the Southern North Sea[J]. *Continental Shelf Research*, 2012, 35: 117-128.
- [4] 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.
- [5] 陈亚慧, 丘仲锋, 孙德勇, 等. 黄渤海悬浮颗粒物粒径的遥感反演研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(9): 50-59.
CHEN Y H, QIU Z F, SUN D Y, et al. Remote sensing of suspended particle size in Yellow Sea and Bohai Sea [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(9): 50-59.
- [6] 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.
- [7] 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*, 2009, 7(11): 803-810.
- [8] BOWERS D G, BRAITHWAITE K M, NIMMOSMITH W A M, et al. Light scattering by particles suspended in the sea; The role of particle size and density[J]. *Continental Shelf Research*, 2009, 29(14): 1748-1755.
- [9] 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.
YU L L, JIANG W S. Seasonal variations in the distributions of suspended fine particulate matter in the Yellow Sea and the East China Sea[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2011, 42(4): 474-481.
- [10] 孙德勇, 李云梅, 王桥, 等. 内陆湖泊水体固有光学特性的典型季节差异[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(5): 1117-1124.
SUN D Y, LI Y M, WANG Q, et al. Differences of inherent optical properties of inland lake water body in typical seasons[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(5): 1117-1124.
- [11] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 海洋监测规范 第4部分: 海水分析: GB 17378.4-2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. The Specification for Marine Monitoring-Part 4: Seawater Analysis: GB 17378.4-2007[S]. Beijing: China Standards Press, 2008.
- [12] BOSS E, PEGAU W S, LEE M, et al. Particulate backscattering ratio at LEO 15 and its use to study particle composition and distribution[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2004, 109(C1): C01014.
- [13] 梁若皓, 樊彦国. 黄河口演变分析研究[J]. *灌溉排水学报*, 2007, 26(S1): 224-225.
LIANG R H, FAN Y G. Analysis on the evolution of Yellow River Estuary [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2007, 26(S1): 224-225.

(责任编辑: 陆 雁)