

长江口外水体散射特性初步研究

朱建华 韩 冰 叶虎平 杨安安

(国家海洋技术中心, 天津 300112)

摘要 采用 2012 年 4 月长江口外围区域实验获取的固有光学特性数据, 分析了该区域水体中粒子的散射特性的水平和垂直变化及其影响因素。对 12 个站位的分析结果表明, 该区域水体粒子散射和后向散射均非常强烈, 表层、5、10、20、30 m 水层 488 nm 的后向散射系数和后向散射比平均值分别为 0.0617、0.0683、0.0642、0.0606、0.1294 m^{-1} 和 1.77%、1.92%、1.94%、1.98%、2.15%。各水层水体的颗粒物折射率平均值为 1.14, 除个别站位外, 折射率介于 1.1~1.2 之间, 表明该水域粒子以无机矿物质颗粒物为主, 尽管颗粒物吸收光谱在 676 nm 的吸收峰表征了色素颗粒物的影响较为显著。研究结果表明, 受长江泥沙输入和底质再悬浮等影响, 实验区域水体散射和后向散射强烈, 存在明显的层化效应, 水中粒子以无机矿物质颗粒物为主。

关键词 海洋光学; 散射特性; 长江口; 折射率; 粒子谱分布

中图分类号 P733.3

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201434.s101001

Preliminary Study on the Seawater Scattering Properties in the Outside Estuary of the Yangtze River

Zhu Jianhua Han Bing Ye Huping Yang An'an

(National Ocean Technology Center, Tianjin 300112, China)

Abstract Variability of particulate scattering properties and its possible influencing factors are studied using the *in-situ* inherent optical properties (IOPs) data obtained during april 2012 in the outside estuary of the Yangtze River. Twelve stations are monitored, and the result shows that the average of particulate backscattering coefficients and backscatter ratios at 488 nm at the surface, 5, 10, 20, 30 m depth are 0.0617, 0.0683, 0.0642, 0.0606, 0.1294 m^{-1} and 1.77%, 1.92%, 1.94%, 1.98%, 2.15%, respectively. The average of particle refractive index at the five layers is 1.14. Except one or two stations, it varies between 1.1 and 1.2. These show the domination of the inorganic mineral particles in this area, although the absorption peak around 676 nm implies a significant concentration of pigment particles in the water. In conclusion, subject to the abundant input of fresh water from the Yangtze River and the re-suspension of bottom particles, particulate scattering and backscattering dominate the IOPs and their variabilities. Also, non-organic mineral particles are the dominant constituents in seawater. Moreover, the variation of particulate scattering shows strong correlation with the depth.

Key words oceanic optics; scattering properties; Yangtze River estuary; refractive index; particle size distribution

OCIS codes 010.4450; 120.5820; 160.4760

1 引 言

河口区域是联系大陆与海洋之间物质和能量交换的重要场所, 是直接影响人类活动的重要区域, 从河口输入的悬浮颗粒物对全球生物与化学物质的循环及碳氮等生命物质的循环有着重要的意义。对河

口区域水体地球生物化学参数进行长期观测是监测和预防河口区域污染、赤潮和水质等变化的必要手段。光学遥感是实现长期连续监测的有效手段之一。光学遥感监测的前提是建立准确的生物光学算法反演水体环境参数, 且需对已建立的算法精度和

收稿日期: 2013-10-20; 收到修改稿日期: 2014-01-11

基金项目: 国家海洋公益性行业科研专项(201005030, 2010418030)

作者简介: 朱建华(1977—), 男, 高级工程师, 主要从事海洋遥感定标检验与遥感应用技术方面的研究。

E-mail: besmile@263.net

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

适用性进行评价。而河口区域的水体光学特性(表观光学特性和固有光学特性)非常复杂且时空变化非常剧烈,尤其是在受陆源输入影响显著的河口区域,因此,开展河口区域水体光学特性(尤其是散射特性)研究是了解水体光学机理、开发区域性生物光学算法、利用光学遥感手段监测水体环境变化的重要前提和基础。

悬浮颗粒物通过河流的陆源输入、底质再悬浮和海岸侵蚀等过程进入海洋。悬浮颗粒物(尤其是矿物质颗粒物)通常具有很高的折射率,在水体光学散射特性中扮演重要的角色。Woźniak 等^[1]对海水中的悬浮矿物颗粒物对遥感反射比的影响进行了理论模拟和分析。Doxaran 等^[2]对法国的 Gironde 河口、Loire 河口和英国的 Tamar 河口区域的水体固有光学特性进行了测量和分析,并建立了固有光学特性和表观光学特性之间的模型,指出需从粒子成分和尺度分布角度分析河口区域光学特性的剧烈变化。Bagheri 等^[3]对美国的 Hudson/Raritan 河口的光学特性进行了分析。Snyder 等^[4]对美国的三处近岸水体的粒子散射特性进行了测量和分析,对光谱特性及其与水体成分的关系进行了分析,并指出粒子散射特性主要取决于粒径介于 $1\sim 10\ \mu\text{m}$ 之间的粒子。Babin 等^[5]对欧洲近岸水体的粒子散射特性进行了测量和分析,并对散射特性的变化进行了理论分析。在河口以悬浮物为主要组分的水体中,水体后向散射系数对于水体光学性质起着决定性的作用^[6]。

水体的散射特性主要包括海水及水中粒子的散射系数、后向散射系数、后向散射比以及与散射相关的折射率、粒子尺度谱分布等。水体散射特性的研究是水色遥感机理研究和应用的重要基础,是揭示区域性海洋水色形成机理以及开发区域性水色生物光学应用算法必不可少的环节。李铜基等^[7]对黄/东海水体的后向散射系数进行了研究,得到了遥感反射比与 $412\ \text{nm}$ 后向散射系数的经验关系。宋庆君等^[8]对黄/东海的水体散射特性进行了研究,得到了后向散射系数与散射系数的幂函数关系。韩冰等^[9]对蓬莱近岸区域的水体散射特性的研究认为,蓬莱近海水体以矿物质颗粒物为主。周雯等^[10]利用 Mie 理论模型对海水中颗粒的吸收和散射特性进行了模拟计算和分析。马荣华等^[11]对太湖水体的后向散射概率进行了研究,表明太湖水体的颗粒

物后向散射概率可表示为波长的函数。

水体的后向散射特性取决于影响水体光学性质的主要成分的粒径大小、组织、形状、结构、折射率以及粒子的尺度分布等参数。对海水中粒子的折射率起决定性作用的是水体各成分的类型与浓度^[12]。通过测量光束透射率或后向散射可获得粒子浓度的信息。Shifrin 等^[13-14]利用粒子后向散射获取了粒子尺度分布。Volz 等^[15-17]对粒子光束衰减系数和粒子尺度分布形状之间的关系进行了理论研究, Kitchen 等^[18-19]用实测数据进行了验证。Voss^[20]对不同地方的粒子衰减光谱的分析表明其光谱斜率是不变的。Boss 等^[19]对光束衰减系数的斜率与粒子尺度分布斜率的关系进行了研究,发现二者存在简单的线性关系适用于多数自然海洋水体。

目前,海水中悬浮颗粒物的散射特性的研究相对较少。本文利用长江口外区域的光学实验数据对该区域的水体散射特性进行了研究,并对影响散射特性变化的因素进行了初步分析。

2 实验数据与计算方法

2.1 实验数据

本文研究是基于 2012 年 4 月 21 日至 29 日期间长江口外区域(见图 1)实验获取的现场测量数据。实验测量站位 30 个(含连续观测站 1 个),实验仪器包括九波段光束衰减与吸收仪(AC9-Plus)、三波段体散射测量仪(ECO-VSF3)和六波段后向散射仪(HS6)等。所有实验仪器均采用剖面测量方式,从表层开始布放,最大测量深度超过测点水深的 $2/3$ 。然而,考虑到部分站位水浅且水体极其浑浊易造成数据饱和等原因,仅使用了长江口外围质量最好的 12 个站位的数据(图 1 中红色方形站位)。

AC9-Plus 采集的吸收系数和衰减系数均经过温盐校正和散射校正处理。散射系数是通过衰减系数和吸收系数相减计算得出。后向散射系数通过后向散射仪(HS6)测量并经过 Sigma 校正获得^[21]。粒子尺度分布由激光粒度仪(LISST-100X)测量获得。由于激光粒度仪采用激光衍射理论测量多角度前向散射来获取水中粒子尺度分布,该方法不受粒子成分(即折射率)的影响,从而成为测量粒子尺度广泛使用的仪器。

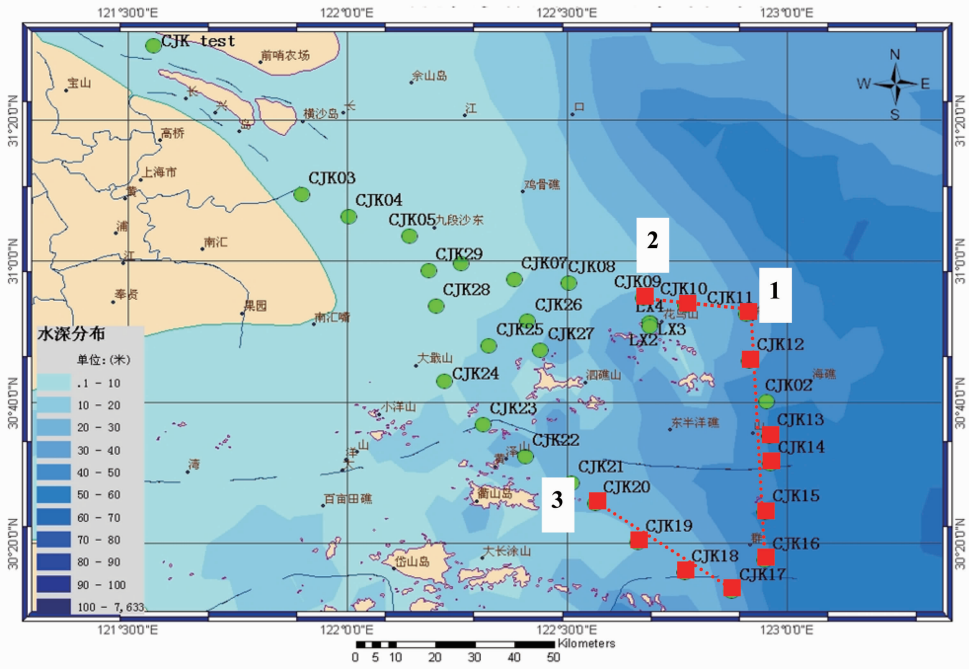


图1 实验站位分布图(红色方形站点为本文分析实际用到的站点,三条红色虚线分别表示1号、2号和3号断面)

Fig.1 Map of experimental stations (red rectangles represent those stations used in hereafter, while the dashed red lines stand for transect 1, 2 and 3)

2.2 计算方法

后向散射比 $B_p = b_b/b$ (b 和 b_b 分别为散射和后向散射系数) 描述了光子发生散射时, 散射角 $\psi \geq 90^\circ$ 时的比例。在考虑多次散射时, 所有的辐射量是基于所有散射角度范围的相函数, 即相同的 B_p 值、不同的散射相函数形状会使相关辐亮度分布不同。根据 Mie 理论分析, 对于非吸收性、折射率不变且具有幂函数粒子尺度分布的粒子时, 粒子的衰减光谱遵循如下规律:

$$c_p(\lambda) = A\lambda^{-\gamma}, \quad (1)$$

式中 c_p 为粒子衰减系数, γ 为衰减系数斜率, A 为振幅。

通常粒子尺度分布的函数 (PSD) 可用 Junge (双曲线) 模型近似, 即

$$n(x) = N\left(\frac{x}{x_0}\right)^{-\xi}, \quad (2)$$

式中 $n(x)$ 为颗粒直径在 $x \sim x+dx$ 间的数量, N 为颗粒数量为 x_0 的参考直径, ξ 为尺度分布斜率, 通常在 2.5 ~ 5 之间^[19, 22], ξ 越大说明粒子的平均尺度越小。

粒子尺度分布斜率 ξ 与颗粒物衰减系数系数光谱斜率 γ 之间存在如下关系:

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

颗粒物的尺度分布和折射率 n_p 都会影响海洋颗粒物散射的角度分布。通过颗粒后向散射因子

B_p 和粒子尺度分布斜率 ξ 计算 n_p 的方法如下:

$$n_p(B_p, \xi) = 1 + B_p^{0.5377+0.4867(\xi-3)^2} [1.4676 + 2.2950(\xi-3)^2 + 2.3113(\xi-3)^4], \quad (4)$$

该式的限定条件是 $2.5 \leq \xi \leq 4.5$, $0 \leq B_p \leq 0.3$ 。这种分析方法仅依赖于 AC9 和 HS6/ECO-VSF3 测量的固有光学特性数据, 对散射特性的深入分析非常实用。

3 水体散射特性参数分布特征

3.1 基本结果

实验区域水体中粒子后向散射系数随波长增加而降低, 呈 e 指数衰减 (图 2), 其中, 表层、5、10、20、30 m 水层 488 nm 粒子后向散射系数的最小值分别为 0.0043、0.0043、0.0048、0.0119、0.0888 m^{-1} , 而最大值分别为 0.8211、1.2877、0.6686、0.1539、0.1598 m^{-1} , 最大值与最小值之比分别为 192.7、302.6、138.3、12.9、1.8, 如表 1 所示。数据表明该区域粒子后向散射系数的水平变化非常剧烈, 尤其是表层到 10 m 深度之间。同样, 表 2 给出了相同站位的散射系数的统计数据, 不同水层的散射系数与后向散射系数的平均值比值分别为 28.0、20.4、38.3、47.8、47.4。而不同水层散射系数的最大值与最小值之比分别为 68.0、82.6、49.4、11.8、1.6, 其水平变化较后向散射系数缓和, 如表 1 所示。

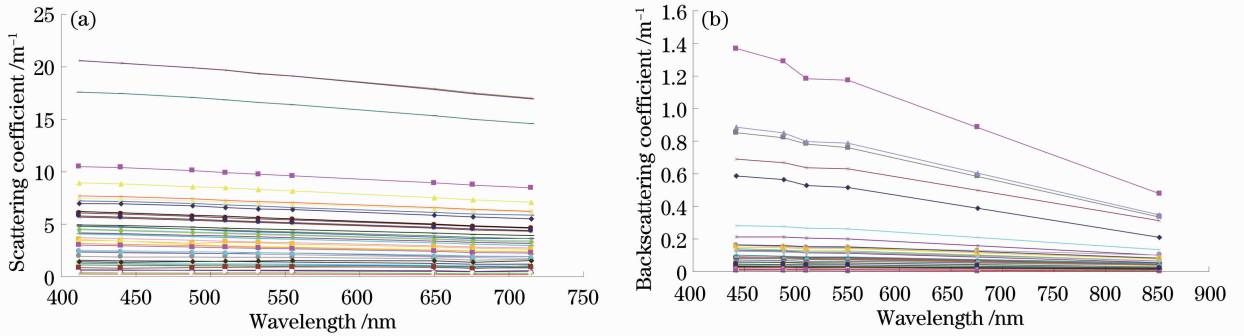


图 2 不同站位、不同水层的(a)散射系数光谱和(b)后向散射系数光谱

Fig. 2 (a) Scattering and (b) backscattering coefficient spectra at different depths of different stations

表 1 488 nm 后向散射系数和散射系数统计

Table 1 Statistics of backscattering and scattering coefficients at the wavelength of 488 nm

		Min /m ⁻¹	Max /m ⁻¹	Average /m ⁻¹	Max/Min
Backscattering coefficient	Surface	0.0043	0.8211	0.1591	192.7
	-5 m	0.0043	1.2877	0.2221	302.6
	-10 m	0.0048	0.6686	0.1146	138.3
	-20 m	0.0119	0.1539	0.0623	12.9
	-30 m	0.0888	0.1598	0.1319	1.8
Scattering coefficient	Surface	0.2930	19.9256	4.4496	68.0
	-5 m	0.2412	19.9127	4.5280	82.6
	-10 m	0.3459	17.0854	4.3900	49.4
	-20 m	0.6155	7.2352	2.9751	11.8
	-30 m	4.7375	7.4312	6.2553	1.6

表 2 表明,实验区域表层水体的单次散射反照率($\omega_0 = b/c$)和吸收散射比(a/b , a 为吸收系数)的平均值分别为 0.93 和 0.084,水体光学特性以粒子散射特性为主;后向散射比平均值为 2.1%,表明后向散射非常强烈;粒子折射率介于 1.07~1.27 之间,平均值为 1.14,表明水中颗粒物以无机矿物质颗粒物为主。

3.2 散射系数与其他参数关系

水体 488 nm 后向散射系数与散射系数之间存在显著相关性[见图 3(a)]。散射系数增大时,后向散射系数亦增大。二者存在非线性关系。可以看

出,后向散射系数递增的幅度随着散射系数的增大,越来越大。这可以从后向散射比与散射系数的关系[见图 3(b)]中得到验证。

表 2 水体表层其他粒子散射参数特性统计

Table 2 Statistics of other parameters at the surface related to scattering

	Min	Max	Average
Single scattering albedo	0.80	0.96	0.93
Absorption/scattering	0.039	0.249	0.084
Backscatter ratio /%	0.9	4.3	2.1
Refractive index	1.07	1.27	1.14

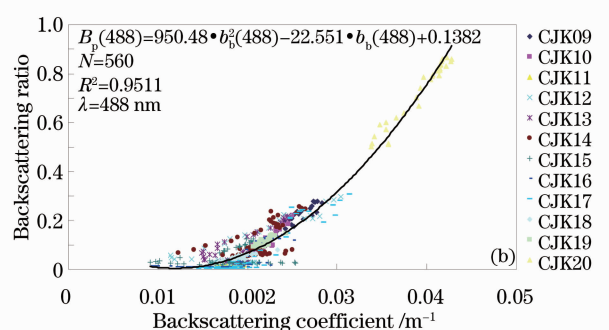
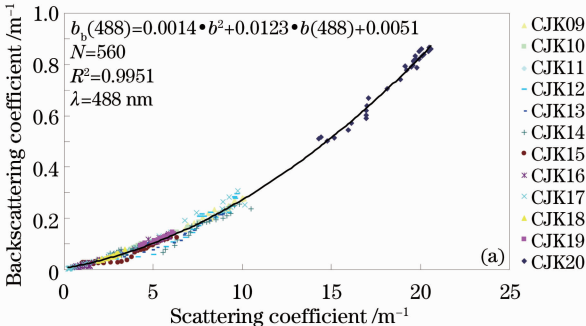


图 3 488 nm 后向散射系数、后向散射比与散射系数的关系

Fig. 3 Relations between backscattering coefficient, backscatter ratio and scattering coefficient at the wavelength of 488 nm

$$b_b = 0.0014 \cdot b^2 + 0.0123 \cdot b + 0.051, \quad R^2 = 0.9951, \quad N = 560, \quad \lambda = 488 \text{ nm}, \quad (5)$$

$$B_p = 950.48 \cdot b_b^2 - 22.551 \cdot b_b + 0.1382, \quad R^2 = 0.9511, \quad N = 560, \quad \lambda = 488 \text{ nm}. \quad (6)$$

3.3 水平分布特征

实验区域的水体中粒子 488 nm 后向散射系数以位于西南角的 CJK20 站数值最大,在东北部(CJK11 和 CJK12 站位)和东南部(CJK16 和 CJK17 站位)出现极小值(见图 4)。后向散射系数沿着由西向东略偏北的主轴(白色虚线)呈现扇形递减的趋

势,沿主轴方向变化最缓慢,主轴两侧变化加剧,且离主轴越远,变化越剧烈。表层、5 m 和 10 m 层的变化趋势基本相同。1 号断面的后向散射系数由中间向两侧递减,2 号断面由西北向东南递减,而 3 号断面由西南向东北递减。然而,由于缺少更密集的测量数据,主轴两侧的详细分布特征有待进一步研究。

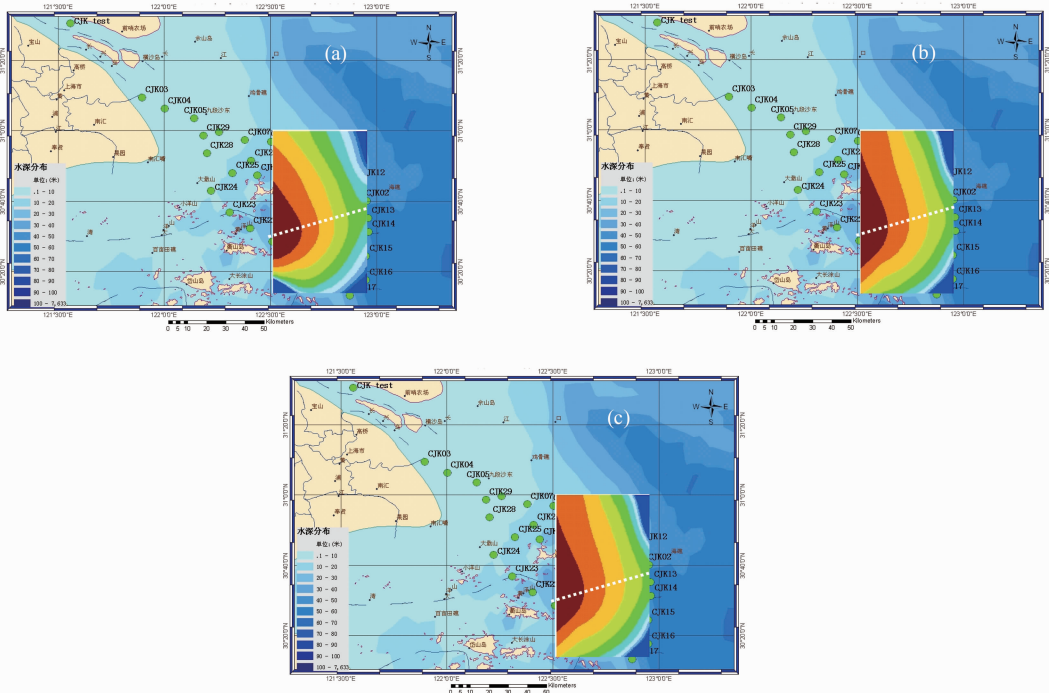


图 4 (a) 水体表层、(b) 5 m 层和 (c) 10 m 层的 488 nm 后向散射系数水平分布

Fig. 4 Horizontal distributions of backscattering coefficient at the wavelength of 488 nm at (a) the surface, (b) 5-m and (c) 10-m below the surface

3.4 垂直分布特征

3.4.1 后向散射系数与散射系数

实验区域的后向散射系数随深度的增加逐渐增大[见图 5(a)~(c)]。在 1 号断面中,后向散射系数在深度 18~28 m 左右出现跃层,数值在 0.06 m^{-1} 左右。以跃层深度为界,上层水体后向散射系数随深度变化比下层水体缓慢。跃层上下 3~4 m 范围内,后向散射系数变化剧烈。在接近海底或 35 m 水深处,后向散射系数最大,数值在 $0.015 \sim 0.3 \text{ m}^{-1}$ 之间。后向散射系数的分布特点可能是由长江口与杭州湾的河口输入与海水充分混合造成的:在表层,河口输入占优势;而在 20 m 以深,海水冲刷海床引起沉积颗粒物的再悬浮占优势。这可以从水体盐度的剖面结构特点得到验证[见图 5(d)],即上层水体盐度低

3%,随深度逐渐增大,底层水体盐度高约为 3.3%。由于散射系数、后向散射比与后向散射系数存在极高的相关性[见(5)式和(6)式],因此,除量值不同外,三个断面的散射系数、后向散射比的垂直分布特征与后向散射系数基本一致。

3.4.2 粒子折射率与后向散射比

图 6(a)给出了各站位表层、5、10、20、30 m 水层的折射率变化,所有水层的粒子折射率平均值约为 1.14。CJK20 站位水体的粒子折射率最大,超过了 1.2;而 CJK17 站位水体除底层(20 m)外,粒子折射率均低于 1.1。这说明这些站位的粒子类型或物质组成发生了显著变化,且随深度变化明显,需要在今后研究中进一步验证。除此之外,粒子折射率介于 1.1~1.2 之间,说明该水域水中粒子以无机矿物质

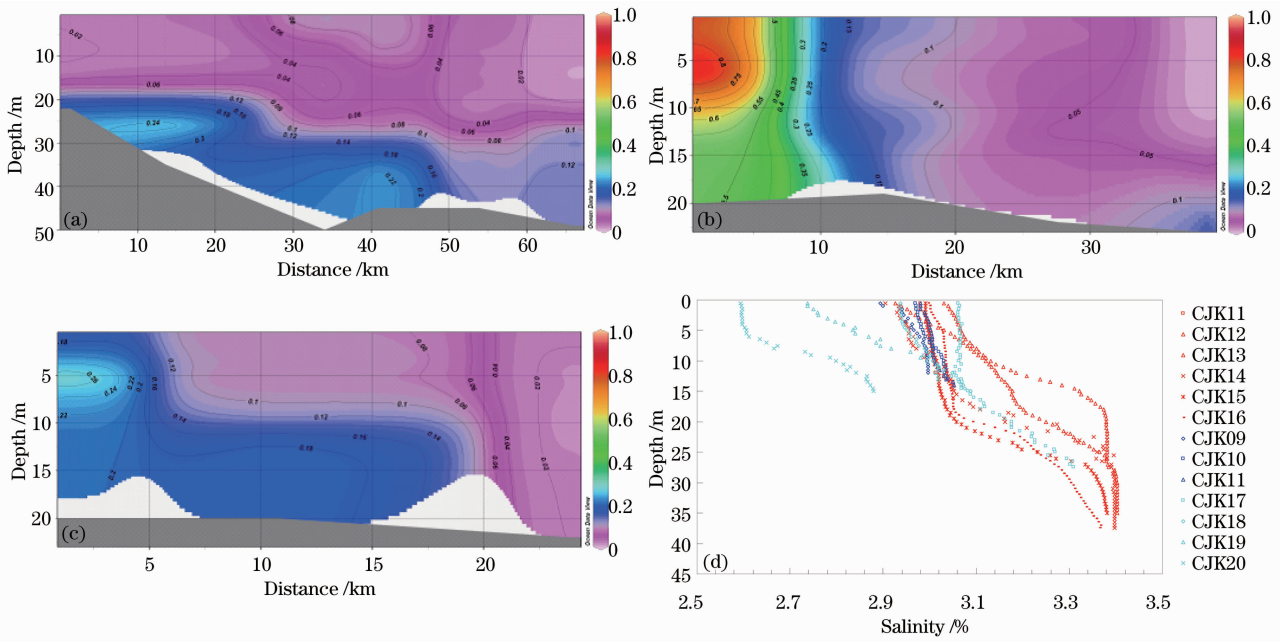


图 5 (a)~(c) 1~3 号断面 488 nm 后向散射系数垂直剖面及(d)海水盐度垂直剖面

Fig. 5 (a)~(c) Vertical distributions of backscattering coefficient of transect 1~3 at the wavelength of 488 nm and (d) corresponding seawater salinity

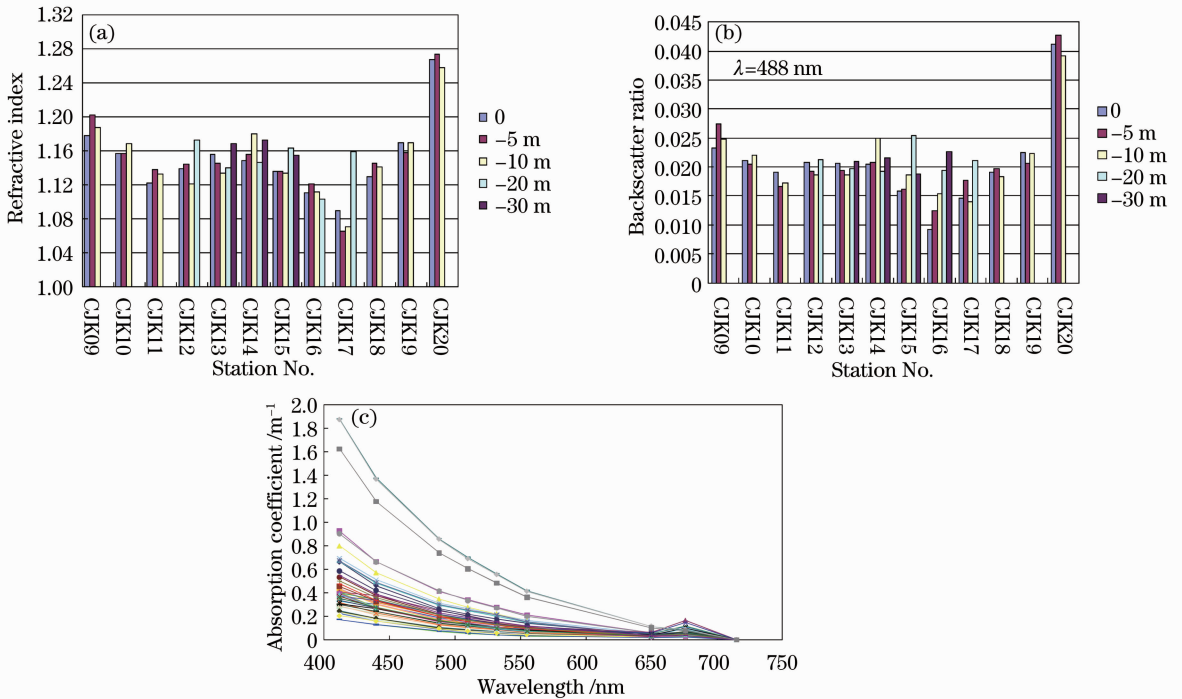


图 6 不同站点(a)粒子折射率、(b)后向散射比柱状图及(c)吸收谱

Fig. 6 Histograms of (a) refractive index and (b) backscatter ratio at different stations and (c) absorption spectra

颗粒物为主。然而,各站点不同水层的水体吸收系数光谱均在 676 nm 处出现吸收峰[见图 6(c)],表明色素颗粒物(浮游植物)是显著存在的。但无机颗粒物的浓度超过了色素颗粒物浓度,使得粒子整体上表现出无机颗粒物的折射特性。

图 6(b)给出了各站点表层、5、10、20、30 m 水层的后向散射比变化,所有水层的后向散射平均值约为 2.1%。CJK20 后向散射比最大,超过了 3%;而 CJK16 站点上层水体后向散射比最小,低于 1.5%,且随深度变化显著。除此之外,后向散射比

介于 1.4%~2.7% 之间。总体来看,后向散射比随深度变化不大。

4 散射特性与粒子特征关系

4.1 散射特性与粒子尺度分布关系

激光粒度仪(LISST-100X)能够测量半径范围在 1.25~250 μm 之间水中悬浮颗粒物粒子尺度分布,其中 CJK20 站位因数据异常未采用。图 7 给出了实验区域各站位表层水体中不同粒径尺度范围内悬浮颗粒物尺度分布。从图中可以看出,该区域表层水体中的悬浮颗粒物尺度分布符合 Junge 谱分布[见(2)式],各站位半径小于 14 μm 的粒子个数占据全部粒子数量的比例均超过了 95%。其中 CJK17 站位水中悬浮物颗粒物的最大半径仅为 10.1 μm 。

在假设粒子为球形粒子的前提下,粒子尺度分布的平均半径(见图 8)可以通过粒子总体积与总个数的比值计算得到,其中表层水体粒子平均半径介

于 1.86~8.51 μm 之间。从图中可以看出,不同站位粒子平均半径随深度的变化各不相同。CJK09、CJK10 和 CJK19 等站位粒子平均半径随深度变化较小,其余站位变化较大。CJK16 站位 20 m 水层的粒子平均直径达到了 35.4 μm 并未在图中给出。同样,CJK20 站位因数据异常也未在图中给出。

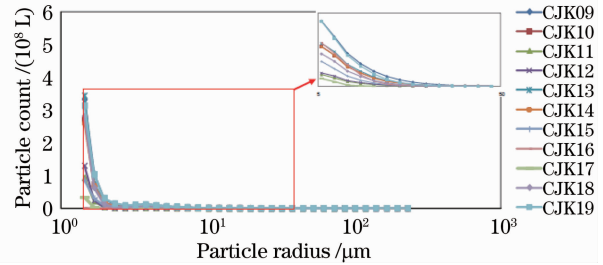


图 7 实验区域水体表层悬浮颗粒物粒子尺度分布(右上角小图给出了 5~50 μm 内的粒子尺度分布)

Fig. 7 Particle size distribution at the surface (the inner rectangle on the top-right enlarge PSD between 5~50 μm)

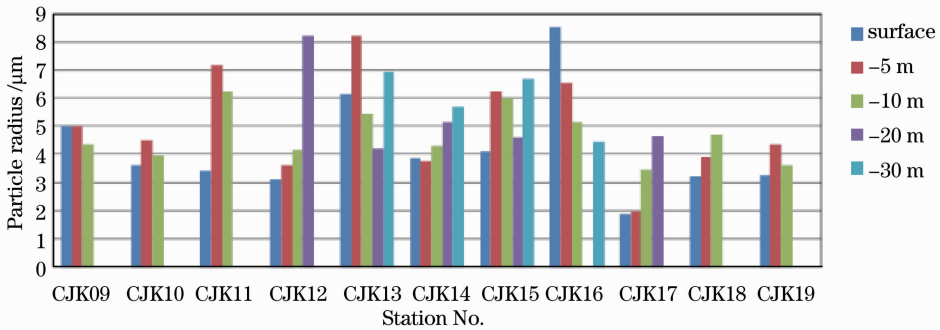


图 8 实验区域各水层不同站位水体中悬浮颗粒物平均半径

Fig. 8 Average particle radii at different layers of all stations

4.2 后向散射系数与粒子浓度关系

随着深度的增加,大部分站位的后向散射系数与水中悬浮颗粒物尺度分布表现出很高的一致性(见图 9),即后向散射系数的大小与颗粒物浓度[见图 9(a)~(h)]有着非常直接的关系,图 9 中颗粒物浓度中粒子半径采用图中的平均半径。在折射率基本不变的情况下,可以看出,后向散射系数大小很大程度上取决于水中颗粒物浓度的变化。从子图 9(i)可以看出,表层水体中平均粒径的粒子浓度与后向散射系数存在线性关系。

5 结论

长江口外围海域受长江径流输入和底质再悬浮的影响显著。水中颗粒物的光学散射特性对研究水

体污染、泥沙输运以及生态环境变化具有重要的作用。利用 12 个站位的实验数据对长江口外围区域的水体中粒子的光学散射特性参数进行了分析,研究结果初步表明:

1) 实验区域光学散射特性强烈,平均单次散射反照率和平均吸收散射比分别达到了 0.93 和 0.084,而且,该区域后向散射特性强烈,后向散射比最高可达 4.3%,其平均值也达到了 2.1%;

2) 实验区域水体中的颗粒物表现为以无机矿物颗粒物为主,平均折射率为 1.14,虽然吸收系数光谱表明叶绿素的影响,但其影响相对较小;

3) 水体颗粒物后向散射特性与浓度的垂直剖面呈现出很高的一致性,在折射率基本不变的情况下,后向散射系数与粒子浓度存在显著相关性。

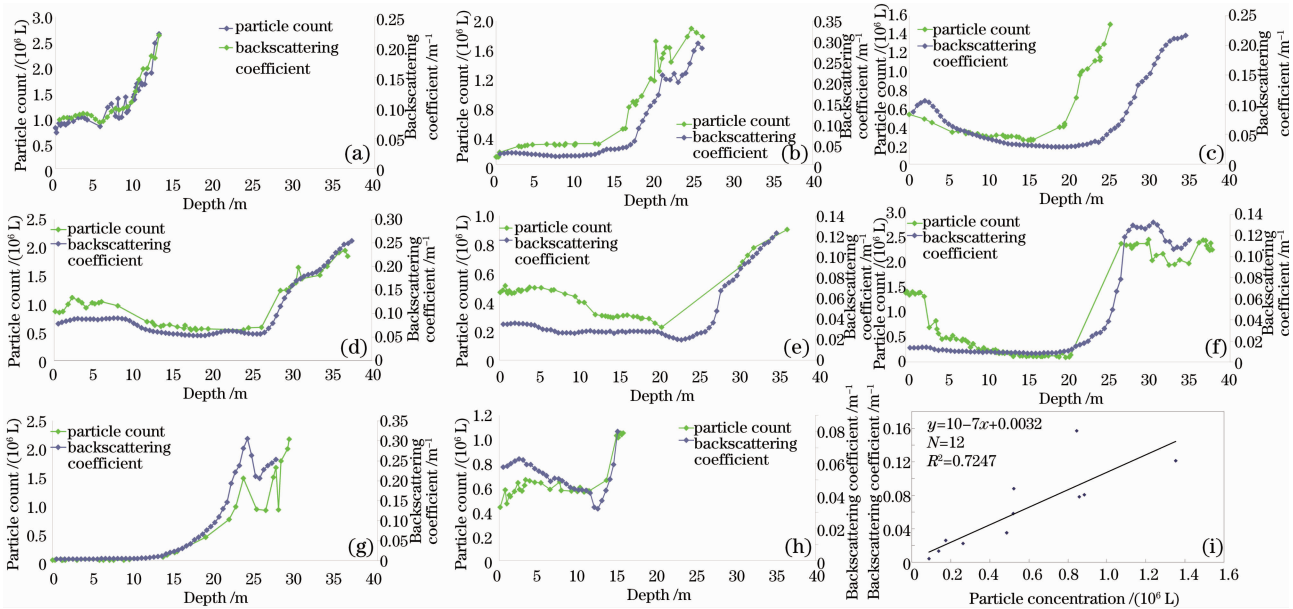


图 9 (a)~(h) 表层水体悬浮颗粒物尺度分布与后向散射系数的相关性; (i) 表层水体 488 nm 粒子后向散射系数与平均粒径下粒子浓度的线性关系

Fig. 9 (a)~(h) Correlation between particle concentration at average radius and backscattering coefficient; (i) linear relationship between backscattering coefficient at 488 nm and particle concentration at the surface

参 考 文 献

- 1 S B Woźniak, D Stramski. Modeling the optical properties of mineral particles suspended in seawater and their influence on ocean reflectance and chlorophyll estimation from remote sensing algorithms [J]. *Appl Opt*, 43(17): 3489–3503.
- 2 David Doxaran, Nagur Cherukuru, Samantha J Lavender. Apparent and inherent optical properties of turbid estuarine waters: measurements, empirical quantification relationships, and modeling [J]. *Appl Opt*, 2006, 45(10): 2310–2324.
- 3 S Bagheri, C Zetlin, R Dios. Estimation of optical properties of nearshore water [J]. *International J Remote Sensing*, 1999, 20(17): 3393–3397.
- 4 William A Snyder, Robert A Arnone, Curtiss O Davis, *et al.*. Optical scattering and backscattering by organic and inorganic particulates in US coastal waters [J]. *Appl Opt*, 2008, 47(5): 666–677.
- 5 M Babin, A Morel, V Fournier-Sicre, *et al.*. Light scattering properties of marine particles in coastal and open ocean waters as related to the particle mass concentration [J]. *Limnol Oceanogr*, 2003, 48(2): 843–859.
- 6 Cui Tingwei, Zhang Jie, Ma Yi, *et al.*. Backscattering coefficient retrieval model for nearshore area of Bohai Sea [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(11): 2041–2045.
崔廷伟, 张杰, 马毅, 等. 渤海近岸水体后向散射系数反演模型[J]. *光学学报*, 2008, 28(11): 2041–2045.
- 7 Li Tongji, Chen Qinglian, Yang An'an, *et al.*. Study of the spring empirical model of backscattering coefficient in Yellow Sea and East China [J]. *Ocean Technology*, 2004, 23(3): 10–14.
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.
- 8 Song Qingjun, Tang Junwu. The study on the scattering properties in the Huanghai Sea and East China Sea [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2006, 28(4): 56–63.
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.
- 9 Han Bing, Li Tongji, Zhu Jianhua. Preliminary research on

- scattering properties of Penglai offshore seawater [J]. *Ocean Technology*, 2011, 30(4): 74–81.
- 韩冰, 李铜基, 朱建华. 近海海洋水体光散射特性研究——以蓬莱近岸海域为例[J]. *海洋技术*, 2011, 30(4): 74–81.
- 10 Zhou Wen, Cao Wenxi, Li Cai. Modelling absorption and scattering properties of mineral particles suspended in seawater based on Mie theory [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2008, 27(1): 22–26.
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.
- 11 Ma Ronghua, Song Qingjun, Li Guoyan, *et al.*. Estimation of backscattering probability of Lake Taihu waters [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2008, 20(3): 375–379.
马荣华, 宋庆君, 李国砚, 等. 太湖水体的后向散射概率[J]. *湖泊科学*, 2008, 20(3): 375–379.
- 12 C D Mobley. *Light and Water: Radiative Transfer in Natural Waters* [M]. San Diego: Academic Press, 1994.
- 13 K S Shifrin. *Physical Optics of Ocean Water* [M]. New York: Springer, 1988.
- 14 K S Shifrin, G Tonna. Inverse problem related to light scattering in the atmosphere and ocean [J]. *Advances in Geophysics*, 1993, 34: 175–252.
- 15 F Volz. *Die Optik und Meteorologie der Atmosphärischen Trübung* [M]. Berlin: Deutscher Wetterdienstes, 1954. 3–47.
- 16 A Morel. Diffusion de la lumière par les eaux de mer. Résultat expérimentaux et approche théorique [J]. *Optics of the Sea* 61, 1973.
- 17 P Diehl, H Haardt. Measurement of the spectral attenuation to support biological research in a ‘plankton tube’ experiment [J]. *Oceanologica Acta*, 1980, 3(1): 89–96.
- 18 J C Kitchen, J R V Zaneveld, H Pak. Effect of particle size distribution and chlorophyll content on beam attenuation spectra [J]. *Appl Opt*, 1982, 21(21): 3913–3918.
- 19 E Boss, M S Twardowski, S Herring. The shape of the particulate beam attenuation spectrum and its relation to the size distribution of oceanic particles [J]. *Appl Opt*, 2001, 40(27):

- 4885—4893.
- 20 K J Voss. A spectral model of the beam attenuation coefficient in the ocean and coastal areas [J]. *Limnol Oceanogr*, 1992, 37(3): 501—509.
- 21 Robert A Maffione, David R Dana. Instruments and methods for measuring the backward-scattering coefficient of ocean waters [J]. *Appl Opt*, 1997, 36(24): 6057—6067.
- 22 Curtis D Mobley, Lydia K Sundman, Emmanuel Boss. Phase function effects on oceanic light fields [J]. *Appl Opt*, 2002, 41(6): 1035—1050.

栏目编辑：史 敏