

悬浮颗粒物粒径分布的幂律模型研究——以黄渤海为例

彭田^{1,2}, 丘仲锋^{1,2}, 孙德勇^{1,2}, 王胜强^{1,2}

(1. 南京信息工程大学 海洋科学学院, 江苏 南京 210044; 2. 江苏省海洋环境探测工程技术研究中心 江苏 南京 210044)

摘要: 为了准确地描述悬浮颗粒物粒径的分布特征, 探索高精度的悬浮颗粒物粒径分布模拟, 本文基于2014年11月黄、渤海的现场悬浮颗粒物粒径数据, 研究了幂律模型在黄、渤海的适用性; 同时, 参考粒径作为幂律模型的重要参数, 影响着幂律模型的斜率(颗粒粒径分布斜率)和模拟精度, 因此对不同参考粒径下幂律模型的斜率变化情况以及模型模拟精度也进行了分析。结果显示: 黄、渤海区域颗粒粒径分布斜率在0.46~7.53(均值: 4.09), 其中84.2%的斜率在3.2~4.5范围内; 当参考粒径小于7.33 μm时, 颗粒粒径分布斜率变化大(均值为5.60±1.09), 颗粒粒径分布模拟误差大, 平均相对误差绝对值在20%~85%范围内, 平均相对误差绝对值的平均值为48.2%; 当参考粒径为7.33~19.8 μm时, 颗粒粒径分布斜率为4.08±0.29, 颗粒粒径分布模拟的平均相对误差绝对值在5%~25%范围内, 平均相对误差绝对值的平均值为9.8%; 当参考粒径大于19.8 μm时, 颗粒粒径分布斜率为3.87±0.25, 颗粒粒径分布模拟的平均相对误差绝对值在2%~10%范围内, 平均相对误差绝对值的平均值为6.0%。误差分析表明: 参考粒径取值大于19.8 μm, 幂律模型对颗粒粒径分布的模拟效果较好, 最优参考粒径可选为122.0 μm, 此时模拟误差最小(平均相对误差绝对值的平均值为4.79%±1.78%)。

关键词: 黄渤海; 悬浮颗粒物; 颗粒粒径分布; 幂律模型; 参考粒径; LISST-100

中图分类号: P733.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2016)06-0110-09

doi: 10.11759/hyxx20150728001

悬浮颗粒物是海水的重要物质成分, 是各种营养盐和污染物的重要载体, 对海洋生态环境有重要影响^[1], 同时, 海水中的颗粒物也极大影响着海水的光学特性以及光在水下的辐射传输^[2]。悬浮颗粒物的粒径是表征悬浮颗粒物的重要物理参量, 悬浮颗粒物粒径大小、连同粒子浓度及形状等, 一起影响着光束在海水中的散射传播, 进而对水色遥感、海洋初级生产力等产生显著影响^[3-4], 因而, 悬浮颗粒物粒径分布的研究成为关注的重点。

悬浮颗粒物的粒径分布(Particle size distribution, PSD)被定义为单位体积悬浮液中, 悬浮颗粒物的粒径在 D 到 $D+\Delta D$ 范围内的平均粒子个数 $N'(D)$ (个/($m^3 \cdot \mu m$))^[3, 5-7], 描述的是悬浮颗粒物粒径与粒子数浓度之间的关系。目前已有诸多数学模型用来描述海洋系统中的悬浮颗粒物粒径分布, 主要包括: 幂律模型^[6-7], 高斯分布、对数正态分布^[8-9]和伽玛函数^[10]等。这些模型中, 幂律模型(也被称为Junge分布)^[3, 5-7]由于其较好的适用性, 被广泛用于研究海洋悬浮颗粒物分布, 幂律模型可表示为^[3]:

$$N'(D) = N'(D_0) \left(\frac{D}{D_0}\right)^{-j} \quad (1)$$

其中, D_0 为参考粒径(μm), $N'(D_0)$ 表示 D_0 处的 $N'(D)$, j 为无量纲参数, 表示 $\log N'$ 随 $\log D$ 线性变化的幂律

收稿日期: 2015-07-28; 修回日期: 2015-11-19

基金项目: 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; 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD); 国家海洋公益性行业专项项目(201005030)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41276186, No.41576172, No.41506200; Provincial Natural Science Foundation of Jiangsu in China, No. BK20151526, No.BK20150914; Natural Science Foundation of the Jiangsu Higher Education Institutions of China, No.15KJB170015; National Programme on Global Change and Air-sea Interaction, No.GASI03030101; Qing Lan Project; Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions (PAPD); Public Science and Technology Research Funds Projects of Ocean, No.201005030]

作者简介: 彭田(1990-), 男, 四川南充人, 硕士, 从事海洋水色遥感研究, 电话: 13912928119, E-mail: wspp156@126.com; 丘仲锋, 通信作者, 教授, 从事海洋光学与水色遥感等方面研究, E-mail: zhong-feng.qiu@nuist.edu.cn

模型斜率,即颗粒粒径分布斜率(也称为 Junge 指数);颗粒粒径分布斜率 j 表示了大颗粒和小颗粒的相对浓度,通常情况, j 值越大,小颗粒所占比重越大, j 值越小,则大颗粒所占比重越大^[11]。

针对悬浮颗粒物粒径分布的模拟,国外学者已展开了诸多研究。Kostadinov 等^[12]利用海洋水色卫星数据反演的悬浮颗粒物粒径分布斜率(参考粒径取值 $2\ \mu\text{m}$),估算了全球海洋中不同大小浮游植物的分布情况。Buonassissi 等^[13]利用幂律模型模拟了大洋和河口表层水体中悬浮颗粒物的粒径分布,发现将 $1\ \mu\text{m}$ 作为参考粒径,PSD 斜率在 $2.7\sim 4.7$ 范围内,且呈现出一定的空间分布差异。其中,大洋中悬浮颗粒物的 PSD 斜率大(均值为 3.78),而河口地区悬浮颗粒物的 PSD 斜率小(均值为 3.63),河流羽区域悬浮颗粒物的 PSD 斜率最小(均值为 3.30)。Xi 等^[3]采用激光衍射计 LISST-100X (Laser In-Site Scattering and Transmissometry) Type-B 实测数据,以 $37.6\ \mu\text{m}$ 作为参考粒径,研究了加拿大 Hudson 湾悬浮颗粒物粒径分布特征及其时空变化,结果表明,PSD 斜率范围为 $2.5\sim 4.5$,其中沿岸地区河口及河流羽区域的悬浮颗粒浓度高、无机物颗粒物占总悬浮颗粒物的比重大、PSD 斜率较小,而离岸水体的颗粒浓度低、PSD 斜率大、小颗粒粒径占主导。Astoreca 等^[14]研究了比利时至英国沿岸北海南部海域的悬浮颗粒物浓度、成分、粒径变化,分别分析了当参考粒径为 280 、 104 、 $10\ \mu\text{m}$ 时,PSD 斜率与悬浮颗粒物衰减系数的关系,发现两者呈负相关。综上所述,学者们在不同的水域研究颗粒粒径分布时虽然都采用了幂律模型,但其所选的参考粒径却各不相同,对于这些研究中的幂律模型参考粒径的选择,各研究者也均未说明相关依据,然而参考粒径的不同选取是否对悬浮颗粒物 PSD 的斜率及其模型模拟精度产生影响,目前尚不清楚。

为此,本文基于在黄、渤海利用现场激光粒度析仪测量的悬浮颗粒物粒径和粒子数浓度数据,首先分析了幂律模型在黄、渤海模拟悬浮颗粒物粒径分布的适用性,进而研究了不同参考粒径对悬浮颗粒物粒径分布斜率以及对粒径分布模拟精度的影响。这将为进一步分析悬浮颗粒物粒径分布特征、探索高精度的悬浮颗粒物粒径分布模拟,提供重要的科学参考依据。

1 数据与方法

1.1 研究区域及站位

黄海是位于我国东部陆架和朝鲜半岛之间近似南北向的半封闭浅海,总面积为 $3.8\times 10^5\ \text{km}^2$,平均

水深 $44\ \text{m}$,最大水深 $140\ \text{m}$ ^[15],流入黄海的主要河流有长江、淮河和鸭绿江。渤海位于我国东北部,面积为 $7.7\times 10^4\ \text{km}^2$,海岸线长 $3\ 800\ \text{km}$,平均深度 $18\ \text{m}$,最大深度 $83\ \text{m}$ ^[16],是我国唯一的半封闭内海,仅东面通过渤海海峡与黄海沟通相连,北、西、南三面分别与辽宁、河北、天津和山东毗邻,主要由渤海中央区,辽东湾、渤海湾和莱州湾组成,海河、黄河、辽河是其主要的淡水径流。河流径流、沉积物再悬浮以及人类活动直接影响着黄渤海悬浮颗粒物的分布^[16-17]。

本文中实测数据来源于 2014 年 11 月 07 日~11 月 26 日中国海洋大学“东方红 2 号”科学考察船对黄海、渤海海域 103 个站位的调查取样,调查站位分布如图 1 所示。

1.2 数据观测和方法

悬浮颗粒物粒径与粒子浓度通过现场激光粒度仪 LISST-100 C 型观测计算得出。LISST 的基本原理^[18]为:一束从二极管中发出的平行激光束遇到颗粒阻挡时,一部分光发生散射现象,散射光的传播方向与主光束的传播方向形成一个夹角 θ ,散射角 θ 的大小与颗粒的大小有关,颗粒越大, θ 角就越小;反之,就越大。散射光的强度代表该粒径颗粒的数量,散射的激光通过一个凸透镜聚焦到一个由 32 个圆环构成的光敏二极管检测器上记录和存储,每个探测环上接收到的能量换算出其所对应粒径范围内的粒子浓度,LISST-100X 运用 Mie 散射理论,将直径在 $2.5\sim 500\ \mu\text{m}$ 内颗粒粒径划分为 32 个呈对数分布的粒级,可计算得到 32 个粒级悬浮颗粒体积浓度^[19]。将悬浮颗粒物近似为球体, D_i 为各粒级粒子等效球直径,单位体积内所含粒子个数 $N(D_i)$ ^[3]:

$$N(D_i) = 6V(D_i) / \pi D_i^3 \quad (2)$$

式中, $V(D_i)(\mu\text{L/L})$ 表示不同粒级悬浮颗粒物的体积浓度。

单位体积内悬浮颗粒物粒径在 D_i 到 $D_i+\Delta D_i$ 范围内的平均粒子个数 $N'(D_i)$ (个/ $(\text{m}^3\cdot\mu\text{m})$)^[3]:

$$N'(D_i) = N(D_i) / \Delta D_i \quad (3)$$

将悬浮颗粒物最小粒径对应的体积浓度开始叠加,当累加的体积浓度等于悬浮颗粒物总体积浓度值一半时,所对应的粒径称为中值粒径 D_{50} 。

总悬浮颗粒物(Total suspended matter, TSM)浓度 S_{TSM} 采用《GB 17378.4-2007 海洋监测规范》^[20]通过称量法计算得到。实验采用直径 $47\ \text{mm}$,孔径为 $0.7\ \mu\text{m}$ 的 Whatman GF/F 玻璃纤维滤膜,实验前对滤膜进行了烘烤、称重、标号处理。利用船载直读式温盐深仪 CTD(Seabird 911 plus)采水器采集获得了

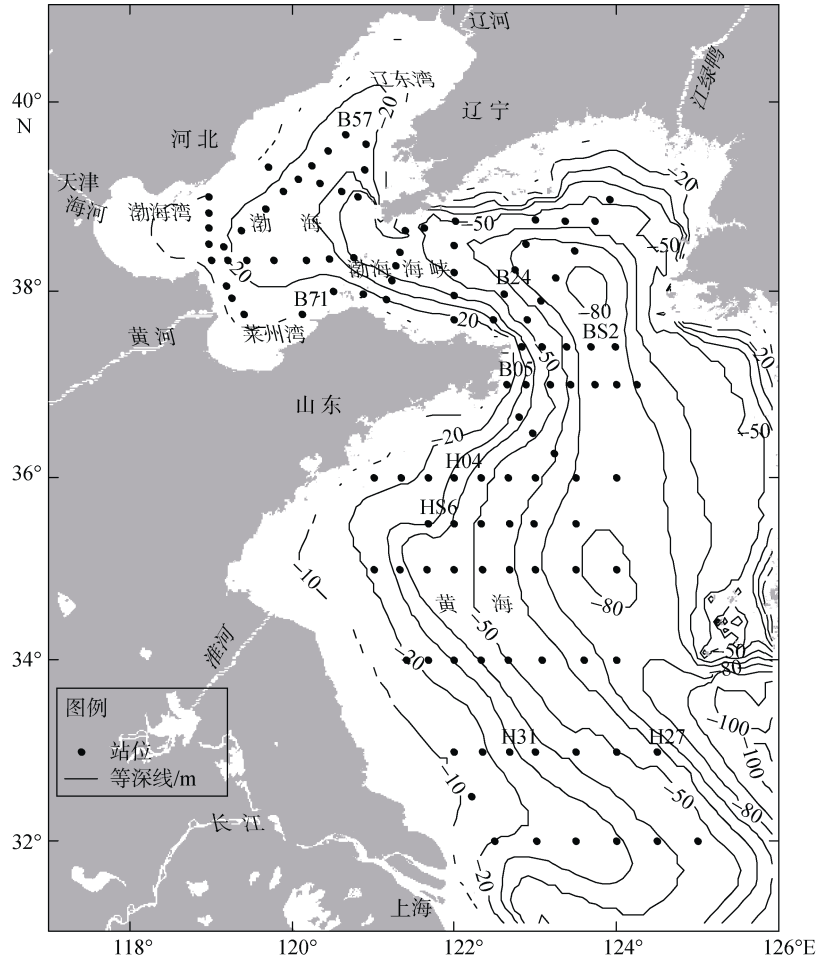


图1 研究区域站位分布图

Fig. 1 Station distribution in the study area

海水水样, 取 500~1 000 mL 表层水样, 在实验室对水样进行过滤, 将过滤了样品的滤膜保存在冷藏室里。将带回实验室的滤膜在 40 °C 温度下烘烤 9 h, 随后称重, 进而计算得到了总悬浮颗粒浓度(mg/L), 总悬浮颗粒浓度通过以下公式计算得到^[20]:

$$S_{TSM} = \frac{W_1 - W_2}{V} \quad (4)$$

W_1 、 W_2 分别为滤膜称重前、后质量(mg), V 为过滤样品体积(L)。

1.3 方差分析与优度检验

为了检验用幂律模型描述颗粒粒径分布的适用性及其模拟精度, 本研究进行了方差分析, 利用决定系数 R^2 检验了拟合优度, 决定系数的大小决定了相关的密切程度, 当 R^2 越接近 1 时, 表示相关的关系式参考价值越高; 相反, 越接近 0 时, 表示参考价值越低。

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \right]^2 \quad (5)$$

式中: x 、 y 分别表示粒子数浓度实测值、拟合值; \bar{x} 、 \bar{y} 分别表示粒子数浓度实测值、拟合值的平均值, 计算决定系数前对粒子数浓度均取以 10 为底对数运算。

为了评价幂律模型模拟悬浮颗粒物粒径分布的模拟精度, 本文采用了平均相对误差绝对值(Mean absolute percentage errors, E_{MAP}), 其可计算为:

$$E_{MAP} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{[\log_{10} N(D)_{mod} - \log_{10} N(D)_{obs}]}{\log_{10} N(D)_{obs}} \right| \times 100\% \quad (6)$$

其中 $N(D)_{obs}$ 和 $N(D)_{mod}$ 分别代表 LISST 测量、幂律模型计算的粒子数浓度。

2 结果与分析

2.1 悬浮颗粒物的统计特征

研究区域的水体总悬浮颗粒物浓度、粒子数浓度、体积浓度、中值粒径的统计分析结果如表 1 和图 2 所示。为了便于研究水体中占主导的悬浮颗粒物的频数分布,统计参量的最大值未在图 2 中显示。水体总悬浮颗粒物浓度最小值为 0.04 mg/L,最大值为

96.80 mg/L, 平均值 8.58 mg/L±13.22 mg/L, 悬浮颗粒物浓度主要集中在 0.04~8.00 mg/L, 占 69.6%。粒子数浓度最小值为 3.65×10^9 个/m³, 最大值为 3.24×10^{11} 个/m³, 在 $3.65 \times 10^9 \sim 2.65 \times 10^{10}$ 个/m³ 浓度范围内占 59.3%, 粒子浓度变化较大, 变异系数为 225%。中值粒径主要分布在 17.84~100.00 μm、190.00~300.00 μm 范围内, 分别占 37.5%、39.3%, 平均值为 159.09 μm±99.72 μm。

表 1 黄渤海悬浮颗粒物统计

Tab. 1 Descriptive statistics of the suspended particle matter

项目	总悬浮颗粒物浓度(mg/L)	粒子数浓度($\times 10^{11}$ 个/m ³)	粒子体积浓度(μ L/L)	中值粒径(μ m)
最小值	0.04	0.04	3.50	17.84
最大值	96.80	32.40	540.97	381.94
平均值	8.58	1.53	34.96	159.09
标准差	13.22	3.45	58.90	99.72
变异系数*(%)	154.00	225.00	169.00	62.00

* 变异系数=标准差/平均值 $\times 100\%$

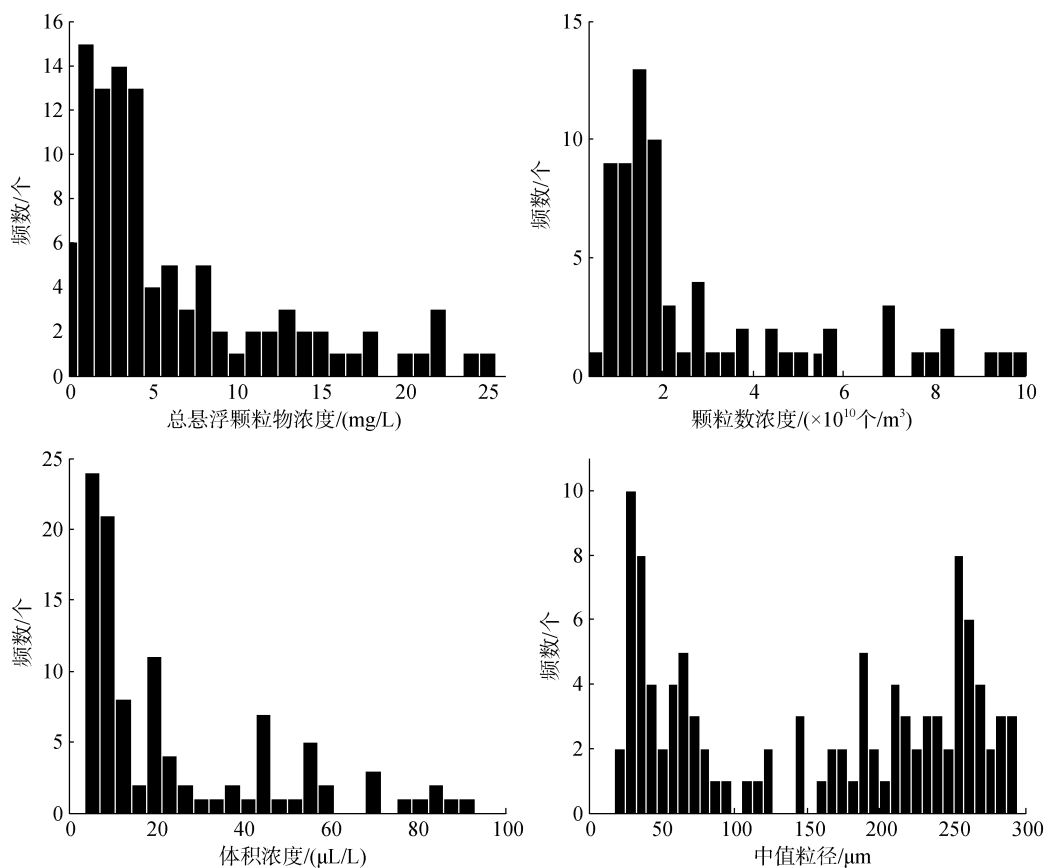


图 2 研究区总悬浮物浓度、粒子数浓度、体积浓度和中值粒径的直方图

Fig. 2 Histogram distribution of the total suspended matter, particle number concentration, volume concentration, and median particle size

2.2 幂律模型模拟 PSD 的适用性分析

基于 2014 年 11 月在黄、渤海获取的悬浮颗粒物粒径原位实测数据, 利用幂律模型模拟悬浮颗粒物的粒径分布, 结果显示: 悬浮颗粒物粒径与粒子数浓度满足幂指数关系, 研究区域所有站点的拟合所得决定系数 R^2 均大于 0.95 ($P < 0.01$)。这表明幂律模型适用于分析研究我国黄、渤海悬浮颗粒物的粒径分布。图 3 展示的是从每十个站点中随机选取一

个代表站点的悬浮颗粒物粒径分布(依据 2.4 节误差分析, 参考粒径 D_0 为 122 μm), 圆圈代表 LISST 实测值, 黑色线为幂律模型拟合直线。图 3 中个别站点粒径高值区的拟合效果一般, 可能是受浮游植物的影响, 海洋悬浮颗粒物的种类繁多, 变化大, 在特殊的时间或区域浮游植物的爆发生长, 某一特定种类的粒子数激增, 可能导致特定尺寸范围内的粒子数出现反常, 从而会使 $N'(D)$ 出现局部突起。

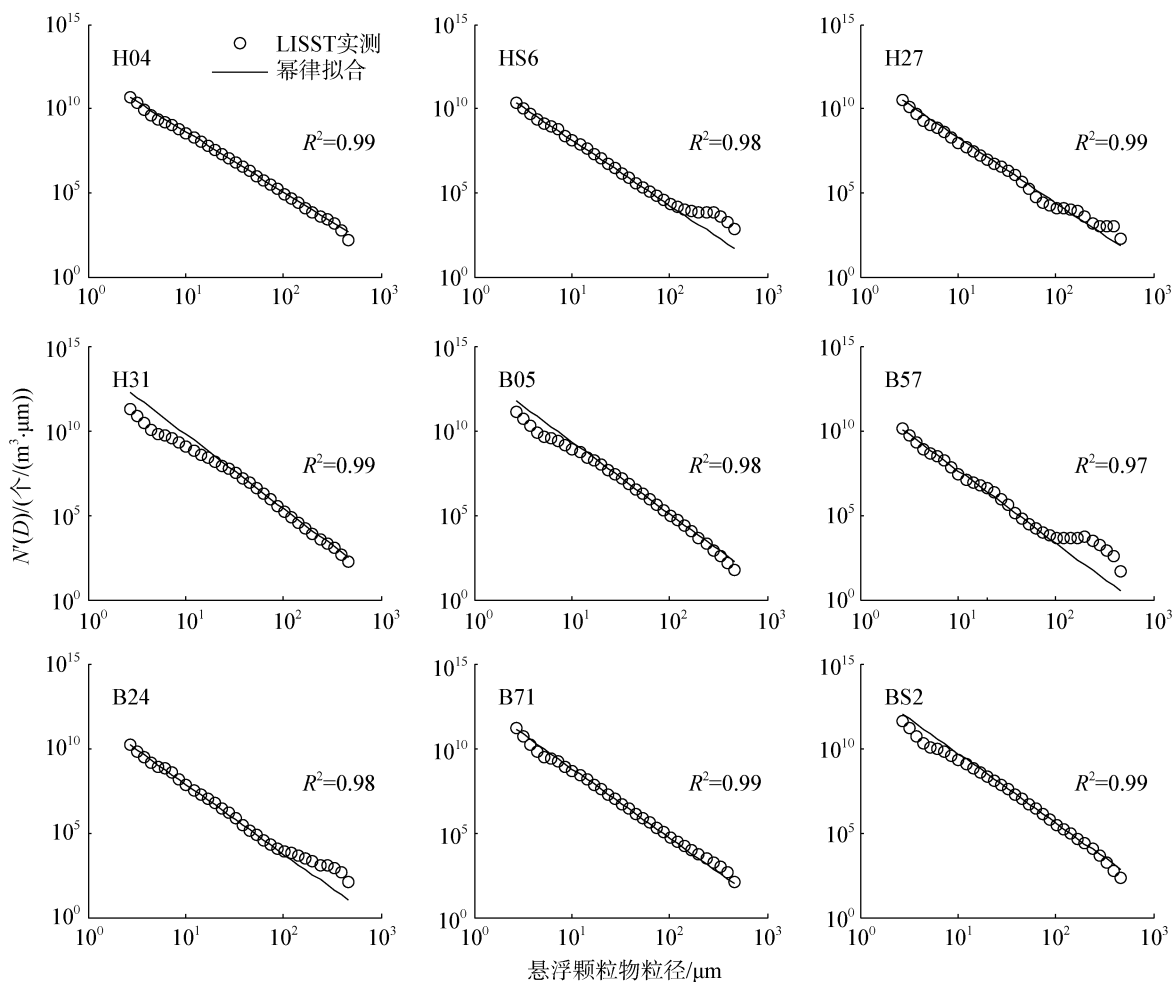


图 3 实测颗粒粒径分布与幂律分布拟合

Fig. 3 Field observation of the PSD fit to the power-law distribution

2.3 D_0 对 PSD 斜率 j 的影响

将各个粒级平均粒子数浓度 $N(D_i)$ 视为粒径 D_i 的函数(公式 1), 分别将 32 个粒级粒径作为幂律模型参考粒径, 再经过对数转换, 计算了不同参考粒径下颗粒粒径分布斜率 j 。图 4 为本航次所有站点 j 的频数分布, j 值变化范围广(0.46~7.53, 均值为: 4.09), 其中 j 值在 3.20~4.50 变化范围内的样本占总样本的

84.2%, 这与学者们对于海洋生态系统中 j 值的研究基本一致, 如 Jonasz^[8]的研究指出 j 的一般变化范围为 3.0~5.0, 其典型值是在 3.5~4.0 之间, Loisel 等^[23]人发现对于非常小的亚微米微粒 j 值能够达到 7.0, 因而许多学者常常将 j 取 3.5~4.5 用于海洋生态系统颗粒粒径分布研究。

图 5 表示了 103 个样本站点分别以 32 个不同粒级粒径作为参考粒径获得 j 值的变化情况。从图 5a

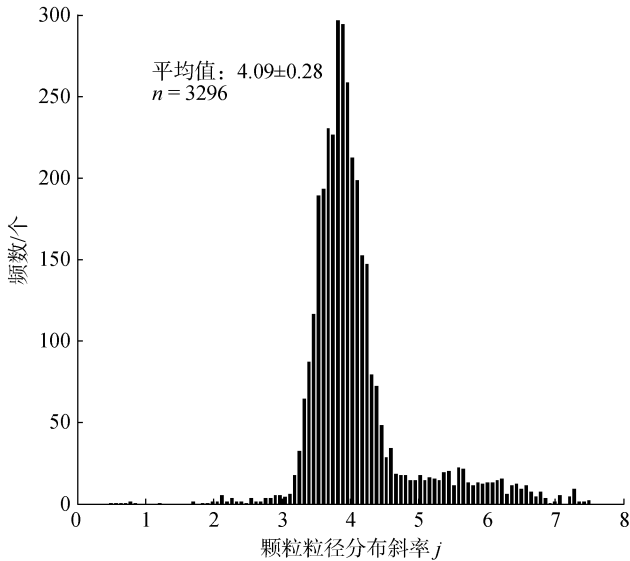


图 4 颗粒粒径分布斜率 j 直方图分布
Fig. 4 Histogram distribution of PSD slope j

中可以看到参考粒径的不同选取对颗粒粒径分布斜率 j 有很大影响: 以小悬浮颗粒物粒径(2.72~7.33 μm) 作为参考粒径, j 值变化范围为 0.46~7.52, 变化幅度大(标准差为 1.09, 变异系数为 19.83%); 以 10.2~460 μm 粒级粒径作为参考粒径, j 的平均值为 3.81, 变化平稳(标准差为 0.29, 变异系数为 7.31%)。以第 17 个粒级(粒级的中间点)粒径 38.4 μm 作为参考粒径, 将计算所得的 j 值作为参照, 与其它参考粒径下的 j 值作差值, 获得 Δj (图 5b), 结果发现: 粒径在 2.72~7.33 μm 和 104~460 μm 范围内的 j 变化幅度大, 标准差和变异系数分别为 0.82、46.98%和 0.22、51.37%; 当粒径在 10.2~87.90 μm 范围内时, j 变化平稳(标准差 0.006 6, 变异系数 10.72%)。

2.4 D_0 对 PSD 模拟的误差分析

针对 103 站位, 分别以 32 个不同粒级粒径作为参考粒径, 计算了悬浮颗粒物粒径分布的幂律模型模拟的平均相对误差绝对值 E_{MAP} (图 6)。结果表明: 以较小粒径作为参考粒径($D_0 < 7.33 \mu\text{m}$)时, 模拟误差较大, E_{MAP} 超过 50%有 52 个站位; 以 7.33~19.8 μm 作为参考粒径时, 模拟误差 E_{MAP} 分布在 5%~25%之间, E_{MAP} 的平均值在 9.8%±5.9%, 当参考粒径取值大于 19.8 μm 时, 模拟误差较小, E_{MAP} 分布在 2%~15%之间, E_{MAP} 的平均值在 6.0%±2.6%。当以 122 μm 为参考粒径时, E_{MAP} 的值小于 10%, 变动幅度小(E_{MAP} 的平均值为 4.79%, 标准差为 1.78%), 可以把 122.0 μm 考虑作为最优参考粒径。

3 讨论

诸多描述悬浮颗粒物粒径分布 PSD 的数学模型中, 幂律模型的应用最为广泛。幂律模型的斜率 j (Junge 指数)的大小, 与水体中大颗粒与小颗粒的相对浓度比重有着密切关系, 因而 j 常被用于刻画海水中悬浮颗粒物粒径的分布特征。本研究发现在黄、渤海所有采样点的悬浮颗粒物粒径与粒子数浓度呈现出非常好的幂指数关系($R^2 > 0.95$, $P < 0.01$), 表明幂律模型在我国黄、渤海区域仍然具有很好的适用性(图 3)。PSD 斜率, 因参考粒径选择不同在 8 μm 粒级两侧出现显著的阶跃变化, 以小粒径作为参考粒径($D_0 < 7.33 \mu\text{m}$), 计算出来的粒径分布斜率在 3.0~7.0, 但是模拟的粒径分布与实测的误差较大(E_{MAP} 超过 40%), 参考粒径取值大于 7.33 μm 时, 计算出来的粒径分布斜率在 3.5~4.5, 模拟的粒径分布与实测的误差小(E_{MAP} 在 10%以内)。针对 8 μm 粒级两侧出现的阶跃变化的情况, 我们分析除了内外陆架地区差别可能带来一定影响外, LISST 仪器探测精度可能另外一个原因。当水体中亚微米悬浮颗粒物浓度含量较高时, 部分激光能量将衍射到 LISST 探测环外环^[21-22], 此外, 前向散射到外环底部的外部红光, 也会增大的仪器的散射能量^[13], 而 LISST 会把这些‘虚假的颗粒物’散射能量计算到周围的探测圆环, 识别为小粒级处的悬浮颗粒物, 因此 LISST 测量粒径小于 8 μm 悬浮颗粒物粒径时会产生一定的测量误差, 有可能影响本论文中 8 μm 粒级两侧出现的阶跃变化。另外, 为了检验幂律模型在黄渤海其他季节用于模拟颗粒物粒径分布的可靠性, 分析了 2014 年 5 月份航次实测数据(2014 年 11 月航次站位相同), 结果发现所测站位的悬浮颗粒物粒径与粒子数浓度的幂指数拟合决定系数 R^2 也均大于 0.95 ($P < 0.01$)(结果未展示)。这表明幂律模型也可以用来描述春季黄、渤海悬浮颗粒物的粒径分布。尽管如此, 然而仍需要指出的是海洋悬浮颗粒物的种类繁多, 变化大, 如在特殊的时间或区域浮游植物的爆发生长, 某一特定种类的粒子数激增, 可能导致特定尺寸范围内的粒子数出现反常, 从而会使 $N'(D)$ 出现局部突起, 进而可能使得幂律模型模拟精度降低。

尽管研究者常用幂律模型来模拟悬浮颗粒物的粒径分析, 然而不同研究者在不同区域所选用的参考粒径不尽相同, 不同参考粒径的选择对模型模拟结果的影响也未有讨论^[3, 12-14]。针对此问题, 本文系统地

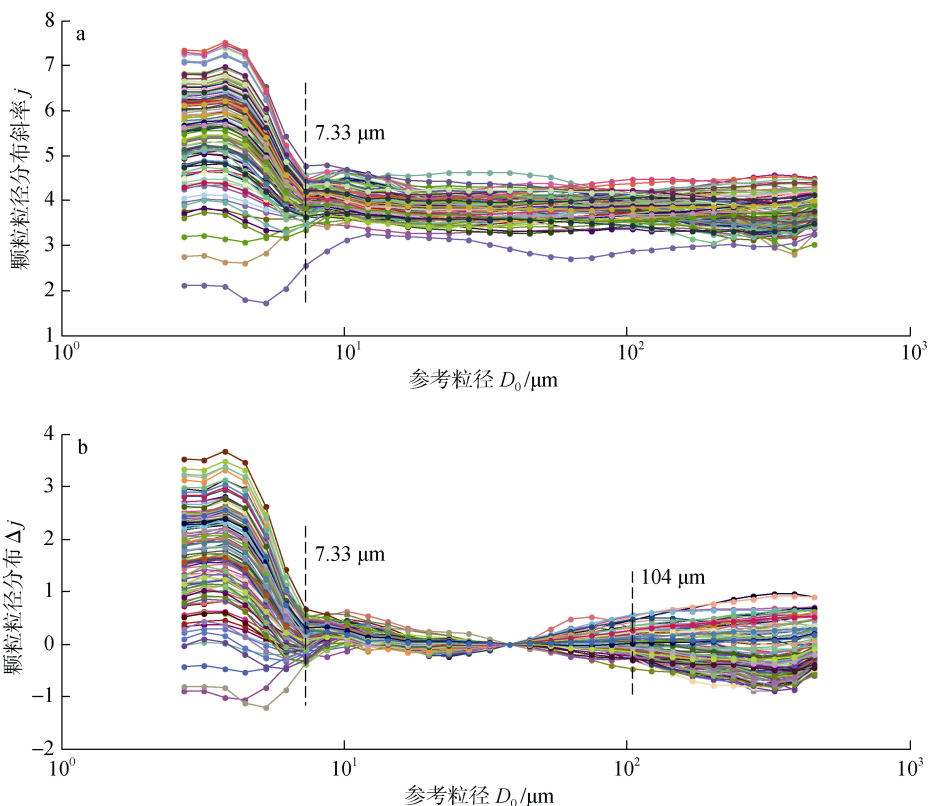


图 5 不同参考粒径下 j 值(a)和 Δj (b)的变化情况

Fig. 5 Variation of (a) j and (b) Δj for different reference diameters

注: 每条曲线表示一个站点(图 6 同)

Note: Each of the curve stand for one station(Also applied in fig.6)

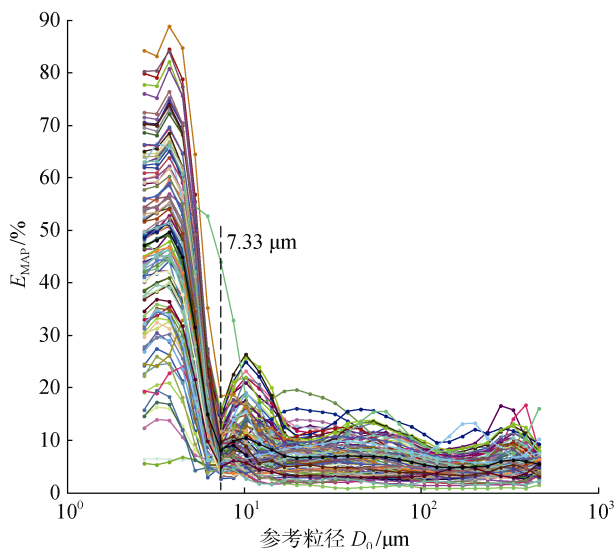


图 6 以不同粒级粒径作为参考粒径, 颗粒粒径分布 E_{MAP}
Fig. 6 Variation of PSD E_{MAP} for different reference diameters

分析了 2.5~500 μm 范围内不同参考粒径下幂律模型的斜率(Junge 指数)变化情况, 以及不同参考粒径对

幂律模型模拟精度的影响。我们的研究表明不同参考粒径的选择会引起幂律模型斜率大的变化(图 5), 而这些变化也导致了幂律模型模拟精度的大幅度改变(图 6)。这表明在利用幂律模型进行模拟悬浮颗粒物粒径分布时, 需要考虑参考粒径的选取, 尽可能选取最优参考粒径。针对黄渤海的情况, 本文通过选取不同参考粒径对幂律模型模拟精度的对比分析, 建议在黄渤海海域参考粒径取值大于 19.8 μm , 此时幂律模型的模拟误差低, 且变化不大(E_{MAP} 为 5%~10%), 最优参考粒径可选为 122 μm , 幂律模型模拟精度最高(E_{MAP} 的平均值为 4.79%)。另外, 本研究发现各个站点可选的参考粒径范围或最优参考粒径变化不大, 表明黄渤海参考粒径的选取范围及最优参考粒径的空间变化较小, 同时分析与本航次站位相同的 2014 年 5 月份航次实测数据, 参考粒径取值大于 19.8 μm 时, 87%的站点的 PSD 模拟误差最小(数据未显示), 因此在春季利用幂律模型模拟黄渤海悬浮颗粒物粒径分布时, 本文对参考粒径选取的建议与秋季的一致。

4 结论

黄、渤海取样站位的悬浮颗粒物粒径分布满足幂指数关系, 决定系数 R^2 高(均大于 0.95), 表明了幂律模型可以用来研究黄、渤海悬浮颗粒物粒径分布。参考粒径作为幂律模型的重要参数, 对颗粒粒径分布斜率及颗粒粒径分布模拟有很大影响, 通过误差分析, 参考粒径取值要大于 19.8 μm , 幂律模型对悬浮颗粒物的粒径分布模拟效果最好, 122 μm 可作为最优参考粒径, 此时模拟误差最小(平均相对误差绝对值的平均值为 4.79%, 标准差为 1.78%)。

参考文献:

- [1] Baker E T, Lavelle J W. The effect of particle size on the light attenuation coefficient of natural suspensions[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 1984, 89(C5): 8197-8203.
- [2] Alpine A E, Cloern J E. Phytoplankton growth rates in a light-limited environment, San Francisco Bay[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1988, 44(2): 167-173.
- [3] Xi H, Larouche P, Tang S, et al. Characterization and variability of particle size distributions in Hudson Bay, Canada[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2014, 119(6): 3392-3406.
- [4] 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.
Zhou Wen, Cao Wenxi, Li Cai. Modeling absorption and scattering properties of mineral particles suspended in seawater based on Mie theory[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2008, 27(1): 22-26.
- [5] Reynolds R A, Stramski D, Wright V M, et al. Measurements and characterization of particle size distributions in coastal waters[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2010, 115(C8): 396-413.
- [6] Jonasz M, Fournier G. *Light Scattering by Particles in Water: Theoretical and Experimental Foundations*[M]. London: Academic Press, 2007, 267-445.
- [7] Bader H. Hyperbolic distribution of particle sizes[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1970, 75: 2822-2830.
- [8] Jonasz M. Particle-size distributions in the Baltic[J]. *Tellus Series B-chemical & Physical Meteorology*, 1983, 35B(5): 346-358.
- [9] Jonasz M. Nonspherical sediment particles: Comparison of size and volume distributions obtained with an optical and a resistive particle counter[J]. *Marine Geology*, 1987, 78: 137-142.
- [10] Risovic D. Two-component model of sea particle size distribution[J]. *Deep Sea Research Part I Oceanographic Research Papers*, 1993, 40(93): 1459-1473.
- [11] Loisel H, Nicolas J, Sciandra A, et al. Spectral dependency of optical backscattering by marine particles from satellite remote sensing of the global ocean[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2006, 111(C9): 616-627.
- [12] Kostadinov T S, Siegel D A, Maritorena S. Retrieval of the particle size distribution from satellite ocean color observations[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2009, 114(C9): 427-428.
- [13] Buonassissi C J, Dierssen H M. A regional comparison of particle size distributions and the power law approximation in oceanic and estuarine surface waters[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2010, 115(C10): 105-109.
- [14] Astoreca R, Doxaran D, Ruddick K, et al. Influence 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(1): 117-128.
- [15] 何起祥. 中国海洋沉积地质学[M]. 北京: 海洋出版社, 2006: 101-169.
He Qixiang. *Marine sedimentary geology of China*[M]. Beijing: Ocean Press, 2006: 101-169.
- [16] 于炜. 渤海表层悬浮物分布变异规律的研究[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2011: 10-11.
Yu Wei. Study of the distribution and its variation patterns of surface suspended sediment concentration in the Bohai Sea[D]. Qingdao: Institute of Oceanography, Chinese Academy of Sciences, 2011: 10-11.
- [17] 青松. 渤海盐度和悬浮颗粒粒径的遥感反演及应用研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011: 1-2.
Qing Song. Remote Sensing Research and application of Salinity and Suspended Particle Size of the Bohai Sea[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011: 1-2.
- [18] Sequoia Scientific, inc. LISST-100X Particle Size Analyzer, User's Manual Version[Z]. 2013: 11-112
- [19] Agrawal Y C, Pottsmith H C. Instruments for particle size and settling velocity observations in sediment transport[J]. *Marine Geology*, 2000, 168: 89-114.
- [20] 中华人民共和国国家质量技术监督局. 海洋监测规范 第 4 部分: 海水分析[S]. 2007: 94-96.
General Administration of Quality Supervision of the People's Republic of China. The specification for marine monitoring -Part 4 Seawater analysis[S]. 2007: 94-96.
- [21] Mikkelsen O A, Pejrup M. In situ particle size spectra and density of particle aggregates in a dredging plume[J]. *Marine Geology*, 2000, 170: 443-459.
- [22] 虞兰兰, 江文胜. 黄、东海悬浮颗粒物浓度和粒径

分布变化研究[J]. 海洋与湖沼, 2011, 42(4): 474-481.
 Yu Lanlan, Jiang Wensheng. 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.

[23] Loisel H, Nicolas J, Sciandra A, et al. Spectral dependency of optical backscattering by marine particles from satellite remote sensing of the global ocean[J]. Journal of Geophysical Research Oceans, 2006, 111(C9): 616-627.

Study of suspended particulate matter particle size distribution based on the power-law model: Case study in the Yellow and Bohai Seas

PENG Tian^{1, 2}, QIU Zhong-feng^{1, 2}, SUN De-yong^{1, 2}, WANG Sheng-qiang^{1, 2}

(1. School of Marine Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Jiangsu Research Center for Ocean Survey Technology, NUIST, Nanjing 210044, China)

Received: Jul. 28, 2015

Key words: Yellow Sea and Bohai Sea; suspended particulate matter; particle size distribution; power-law model; reference diameter; LISST-100 instrument

Abstract: To accurately describe the distribution of the suspended particle size and achieve a high-precision simulation of the suspended particle size distribution in the Yellow and Bohai Seas, in this study, we examined the applicability of the power law for simulating the particle size distribution (PSD) of suspended particles based on LISST-100 measurements from November 2014. The reference diameter, an important parameter of the power law model, affects the PSD power-law slope and PSD simulation accuracy. We analyzed the influence of different reference diameters on the PSD power-law slope and PSD simulation accuracy. Our results show that most power-law-fitted PSD slopes range from 0.46 to 7.53, and 84.2% of these values are within the range of 3.20 to 4.50 (mean: 4.09). Changes in the reference diameter (D_0) have a significant influence on the PSD slope and PSD simulation accuracy: when $D_0 < 7.33 \mu\text{m}$, significant changes occur. PSD slopes ranged from 0.46 to 7.53 (mean = 5.60, standard deviation = 1.09) and large errors (mean absolute percentage errors (E_{MAP}): 20%–85%, mean E_{MAP} : 48.2%) were observed in PSD slope and PSD simulation, respectively. When $7.33 \mu\text{m} < D_0 < 19.8 \mu\text{m}$, the PSD slope was 4.08 ± 0.029 and the PSD simulation error was small (E_{MAP} : 5%–25%, mean E_{MAP} : 9.8%). When $D_0 > 19.8 \mu\text{m}$, the PSD slope was 3.87 ± 0.25 , and PSD simulation error was at a minimum (E_{MAP} : 2%–10%, mean E_{MAP} : 6.0%). Through error analysis, we found that for the reference diameter selection greater than $19.8 \mu\text{m}$, the PSD simulation results fitted well. We found the optimal reference diameter to be $122.0 \mu\text{m}$, at which the simulation error was at a minimum (mean E_{MAP} is $4.79\% \pm 1.78\%$).

(本文编辑: 李晓燕)