

近岸水体表层悬浮泥沙平均粒径遥感反演

杨曦光^{1,2,3} 黄海军^{1,3} 严立文^{1,3} 刘艳霞^{1,3} 马立杰^{1,3}

1 中国科学院海洋研究所, 山东 青岛, 266071

2 中国科学院大学, 北京, 100049

3 中国科学院海洋地质与环境重点实验室, 山东 青岛, 266071

摘要: 悬浮泥沙的粒径分布特征不仅体现了悬浮颗粒态物质的存在状态, 而且可以指示水动力及再悬浮作用的过程和强度, 因此研究悬浮泥沙粒径分布特征具有重要意义。利用 Mie 理论建立悬浮泥沙平均粒径反演模型, 结果表明, 悬浮泥沙后向散射系数与其平均粒径的三次方线性关系明显, 4 个波段(412 nm、443 nm、555 nm、667 nm)拟合方程决定系数均在 0.93 以上, 拟合误差最小值为 16.632 2%(412 nm), 最大值为 20.314 3%(667 nm)。利用 QAA 算法从 MODIS 影像上反演研究区域悬浮泥沙后向散射系数, 并结合反演的悬浮泥沙浓度推算研究区域表层悬浮泥沙的平均粒径。对比发现, 近岸高悬浮泥沙区域的反演结果与实测数据吻合较好, 相关研究可以为深入开展陆海相互作用、海洋生态系统演变和海洋参与全球碳循环等研究提供重要数据支持。

关键词: 平均粒径; 遥感反演; 悬浮泥沙浓度; Mie 理论

中图分类号: TP79; TP751; P333.4; P87 **文献标志码:** A

悬浮泥沙的粒径大小及分布特征不仅体现了海域水体中颗粒态物质的存在状态, 而且悬浮泥沙级配(或粒径组成)和悬沙浓度可以指示水动力及再悬浮作用的过程和强度^[1]。常规的海水悬浮物平均粒径数据是通过走航取样、实验室分析获取, 大区域的粒径分布特征也是通过调查数据空间插值获取, 在调查速度和周期上, 都很难满足大面积调查的要求^[2], 对于水动力作用强烈的地区, 很难捕获瞬时海水表层悬浮泥沙的粒径分布特征。遥感技术为快速、定量地获取区域环境参数提供了参考。Rainey 等人^[3]利用图像处理技术从机载 ATM(airborne thematic mapper)上获取了潮间带地区的沉积物粒径分布特征, 结果表明, 遥感技术可以应用到更广泛的河口地区调查研究中。Kostadinov 等人^[4]结合 Mie 散射理论, 利用查找表的方法, 对全球海洋的悬浮物粒径分布特征进行了讨论。Huang 等人^[5]利用不同类型的遥感数据反演潮间带底质平均粒径, 并对多光谱和高光谱遥感数据的反演结果进行了比较分析^[5]。Chakraborty 等^[6]利用声学后向散射数据和神经网络模型反演海底沉积物类型, 结果表明,

BP 神经网络反演的平均粒径与实测结果具有很好的 consistency。目前, 关于粒径分布特征的研究主要集中在潮间带, 而对表层海水的悬浮物粒径分布特征的研究较少。本文尝试利用 Mie 理论, 结合海洋光学原理建立了基于表层海水固有光学参数的悬浮泥沙平均粒径的遥感反演模型。相关研究不仅缩短了调查周期, 降低了调查成本, 而且避免了大区域平均粒径空间插值带来的不确定性, 相关信息可以为深入开展陆海相互作用、海洋生态系统演变以及海洋参与全球碳循环等研究提供数据支持。

1 研究区域及泥沙粒径数据采集方法

1.1 研究区域

黑泥湾位于山东半岛东侧, 地处 E 122°31′~122°37′, N 36°55′~37°2′。北部隔楮岛半岛与桑沟湾相邻, 南部隔馍岛与石岛湾相邻, 海湾湾口开阔, 中部岸线向外突出, 将海湾分成南北两部分。黑泥湾水下地形较为平缓, 水动力作用单一,

湾内基本无河流注入。

1.2 数据采集

数据采集时间为 2004 年 11 月,共设置 25 个站位。海水的样品采集严格按照 GB/T13909-92 海洋调查规范进行,采用负压抽滤法抽滤,滤膜为 0.45 μm 的聚酯纤维膜,并按照 20% 设置校正膜。海水过滤后,用蒸馏水冲洗量筒一次,滤膜洗盐三次。

滤膜放入烘箱,用 40 °C 恒温烘干 8 h,之后放入干燥皿中,使之恢复常温,用万分之一电子天平称重。称重后,将滤膜再次烘干 4 h,放入干燥皿,待常温后再次称重。反复上述步骤,直至每张滤膜前后两次称重误差在 0.01 mg 之内。

将称重合格的滤膜(含悬浮物)放入预先烘烤称重的坩埚中,先用酒精灯将滤膜燃烧,然后在 500 °C 下烘烤 1 h,除去有机物质,然后反复烘干、干燥冷却与称重,直至前后两次称重误差在 0.01 mg 以内^[7]。最后,利用 Cilas940L 型激光粒度仪(测量粒径范围为 0.38~2 000 μm)对悬浮泥沙样品粒度进行测试。

2 原理与方法

2.1 平均粒径反演模型

MIE 理论中,后向散射效率因子 Q_{bs} 可以描述均匀球形颗粒的后向散射特征,其数学表达式为^[8]:

$$Q_{bs}(D, \lambda, m) = \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} \frac{|S_1(\theta)|^2 + |S_2(\theta)|^2}{2x^2} \sin\theta d\theta \quad (1)$$

式中, $S_1(\theta)$ 和 $S_2(\theta)$ 称为振幅函数,它是球形颗粒直径 D 、入射光波长 λ 以及颗粒复折射指数 m 的函数,其表达式及计算方法可参阅文献^[9]; x 为尺度参数,定义为 $x=2\pi D/\lambda$,代表颗粒周长与入射波长的比值; θ 为散射角; $m=n+in'$ 为颗粒的复折射指数,其实部 n 表示颗粒的折射,虚部 n' 表示颗粒的吸收;海水中的悬浮物其复折射指数中实部 n 介于 1.01~1.21 之间,有机组分 n 介于 1.02~1.08,而无机组分 n 介于 1.15~1.20 之间;虚部 n' 介于 0~0.01 之间^[10]; Q_{bs} 描述了单个颗粒对光的散射能力,通过它可以进一步计算颗粒群的后向散射系数^[11]。

假设悬浮泥沙颗粒为均质球形粒子,在波长 λ 处,单位体积内的后向散射系数 $b_{bs}(\lambda)$ 可表示为^[4]:

$$b_{bs}(\lambda) = \int_{D_{min}}^{D_{max}} \frac{\pi}{4} D^2 Q_{bs}(D, \lambda, m) N(D) dD \quad (2)$$

式中, $N(D)$ 为悬浮泥沙颗粒尺度分布函数,描述单位体积内直径为 D 的颗粒的数量,可表示为:

$$N(D) = N_0 f(D) dD \quad (3)$$

$f(D)$ 为粒径分布频率,可通过 Cilas940L 型激光粒度仪直接测得; N_0 是参考单位体积颗粒数,可通过悬浮泥沙浓度和密度估算,

$$N_0 = C_X / (\rho_X \int_{D_{min}}^{D_{max}} \frac{4}{3} \pi D^3 f(D) dD) \quad (4)$$

式中, C_X 为悬浮泥沙含量; ρ_X 为沙的密度。

将悬浮泥沙平均粒径 \bar{D} 引入到 N_0 的计算中,则式(4)可写成:

$$N_0 = C_X / (\rho_X \kappa \frac{4}{3} \pi \bar{D}^3) \quad (5)$$

式中, κ 为统计意义上的修正系数。将式(5)、式(3)代入式(2),得到含有平均粒径 \bar{D} 的悬浮泥沙后向散射系数 $b_{bs}(\lambda)$ 的表达式:

$$b_{bs}(\lambda) = \int_{D_{min}}^{D_{max}} \frac{\pi}{4} D^2 Q_{bs}(D, \lambda, m) \frac{C_X}{\rho_X \kappa \frac{4}{3} \pi \bar{D}^3} f(D) dD \quad (6)$$

整理得:

$$b_{bs}(\lambda) = \frac{C_X}{\rho_X} F(\bar{D}) \quad (7)$$

对于实际测量站位,其悬浮泥沙浓度、粒径的分布特征及颗粒物直径的极值是已知的,利用 MIE 理论,可以计算出每个站位的后向散射效率因子 Q_{bs} 及悬浮泥沙的后向散射系数 b_{bs} ,将计算的 Q_{bs} 及 b_{bs} 作为数据样本集,拟合 b_{bs} 与平均粒径 \bar{D} 的函数关系,可以建立基于水体固有光学参数表层悬浮泥沙平均粒径反演模型。结合同步遥感数据,实现利用少量的测量数据反演大区域表层海水悬浮泥沙的平均粒径。

2.2 悬浮泥沙后向散射系数的估算

近岸及河口区等典型二类水体的后向散射特征可以用纯水、叶绿素和悬浮泥沙的含量及其吸收/散射系数的函数来描述^[12]:

$$b_b(\lambda) = b_{bw}(\lambda) + b_{bc}(\lambda) + b_{bs}(\lambda) \quad (8)$$

即总后向散射系数 b_b 为纯水后向散射系数(b_{bw})、浮游植物后向散射系数(b_{bc})和悬浮泥沙后向散射系数(b_{bs})之和。因此,悬浮泥沙后向散射系数 b_{bs} 可表示为:

$$b_{bs}(\lambda) = b_b(\lambda) - b_{bw}(\lambda) - b_{bc}(\lambda) \quad (9)$$

式中, b_{bw} 可通过式(10)计算出^[13]:

$$b_{bw}(\lambda) = 0.5b_w(500)\left(\frac{\lambda}{500}\right)^{-4.3} \quad (10)$$

$b_w(500)$ 为纯水在500 nm的散射系数,其值为 0.00288 m^{-1} 。 b_{bc} 可表示为^[14]:

$$b_{bc}(\lambda) = 0.005b_c(550) \frac{a_c(550)}{a_c(\lambda)} \quad (11)$$

$b_c(550) = 0.12C_c^{0.63}$,为550 nm处叶绿素的散射系数; $a_c(\lambda)$ 为叶绿素的吸收系数。

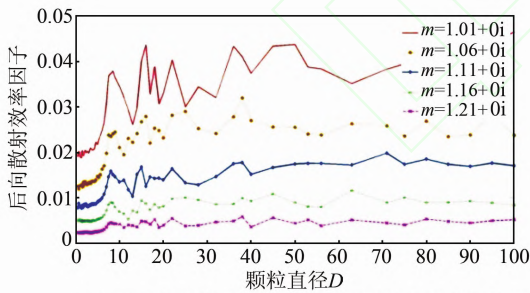
因此,在已知总后向散射系数 b_b 的前提下,可以求解出悬浮泥沙的后向散射系数 b_{bx} 。

QAA(quasi-analytical algorithm)是一种计算水色要素的吸收和后向散射特征的多波段半分析算法。利用QAA算法反演总后向散射系数及叶绿素吸收系数,从而可以推算出悬浮泥沙后向散射系数,再结合平均粒径反演模型,就可以反演出研究海域成像瞬时表层海水悬浮泥沙平均粒径的分布特征。QAA算法描述及本地化参数设置可参阅文献[15]。

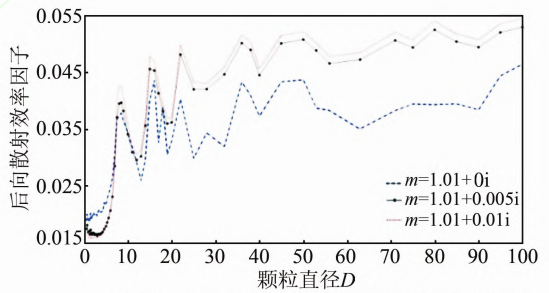
3 反演模型及分析

3.1 后向散射效率因子随粒径的变化规律

参考激光粒度仪的测量范围及实际样品两个因素,确定颗粒的大小取值为 $0.4\sim 100\ \mu\text{m}$ 。利用Mie理论计算特定波长处不同颗粒的后向散射特征。



(a) 不考虑吸收后向散射效率因子随粒径变化特征



(b) 考虑吸收后向散射效率因子随粒径变化特征

图1 后向散射效率因子随粒径变化特征

Fig. 1 Variation Characteristic of Backscattering Efficient Factor at Different Grain Size

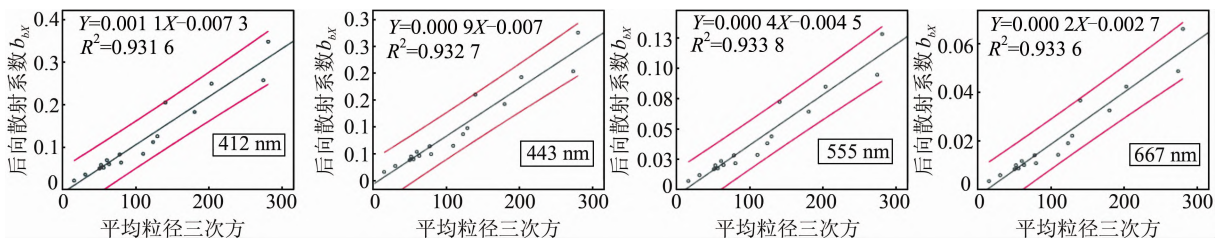


图2 MIE计算的悬浮泥沙后向散射系数与平均粒径三次方的散点图(中间线为拟合曲线,两侧线为95%置信区间)

Fig. 2 Scattering Diagram Between Estimated Suspended Sediment Back Scattering Coefficient and Cubic

Average Grain Size

入射光440 nm处,不考虑吸收情况,不同折射指数单球形颗粒后向散射特征如图1(a)所示。随着颗粒直径的增加,后向散射效率因子 Q_b 呈现振荡变大的趋势;复折射指数变化, Q_b 随着颗粒粒径变化的规律基本保持不变。对于某一固定大小的颗粒,复折射指数增加, Q_b 整体变小。在考虑吸收特征时,单球形颗粒后向散射特征随颗粒粒径变化的规律大致相同(见图1(b))。复折射指数实部 n 不变,直径小于 $10\ \mu\text{m}$ 颗粒的后向散射效率因子 Q_b 随着虚部 n' 的增大而减小,而直径大于 $10\ \mu\text{m}$ 颗粒的后向散射效率因子增大。通过计算其他波段的后向散射特征,亦发现相似的变化规律。

3.2 平均粒径反演模型的建立

根据式(2)计算所有站位的悬浮泥沙后向散射系数。参考式(7),利用线性函数、指数函数、幂函数等形式拟合悬浮泥沙后向散射系数和平均粒径的函数 $b_{bx}(\lambda) = F(\bar{D})$ 。结果表明,Mie理论计算采样站位的 $b_{bx}(\lambda)$ 与对应的平均粒径 \bar{D} 的三次方线性关系明显(见图2)。其线性方程的通用形式为:

$$b_{bx}(\lambda) = K \frac{C_x \bar{D}^3}{\rho_x} \quad (12)$$

其中,沙密度取值为 2600 kg/m^3 。考虑到变量数量级及 K 的统计特征,本文没有对变量进行单位换算。

按照 3 : 1 的比例将数据分成两部分,其中 17 个站位于拟合系数 K , 剩余 8 个站点数据用于模型精度验证。拟合得到 MODIS 几个水色波

段(412 nm、443 nm、555 nm、667 nm)悬浮泥沙平均粒径反演模型及精度如表 1 所示。

表 1 平均粒径反演模型及精度

Tab. 1 Retrieval Models of Average Grain Size and Precisions

波段/nm	模型	决定系数	拟合误差/%	拟合 RMSE/ m^{-1}	检验误差/%	检验 RMSE/ m^{-1}
412	$b_{bX}(\lambda) = 0.0011 \frac{C_X}{\rho_X} \bar{D}^3 - 0.0073$	0.9316	16.6322	0.0242	23.6800	0.0664
443	$b_{bX}(\lambda) = 0.009 \frac{C_X}{\rho_X} \bar{D}^3 - 0.007$	0.9327	17.6075	0.0187	25.5502	0.0551
555	$b_{bX}(\lambda) = 0.0004 \frac{C_X}{\rho_X} \bar{D}^3 - 0.0045$	0.9338	18.9537	0.0088	24.7018	0.0248
667	$b_{bX}(\lambda) = 0.0002 \frac{C_X}{\rho_X} \bar{D}^3 - 0.0027$	0.9336	20.3143	0.0048	24.5339	0.0129

3.3 表层悬浮泥沙浓度反演模型

要获取表层悬浮泥沙平均粒径,不仅需要表层海水中悬浮泥沙的后向散射系数,还需要表层悬浮泥沙的浓度作为辅助数据才能实现悬浮泥沙平均粒径的反演。从 MODIS 影像上获取遥感反射率与对应站位的悬浮泥沙浓度,建立表层悬浮泥沙反演统计模型。分析发现,MODIS 555 nm 遥感反射率与悬浮泥沙浓度的对数线性关系最好,建模样本为 17 个,剩余 8 个样本用来检验。建立的模型为:

$$Lg(C_X) = 220.66R_{rs}(555) - 2.303 \quad (12)$$

模型决定系数为 0.7066,模型拟合平均误差为 6.2453%,拟合 RMSE 为 0.0837,模型检验平均误差为 14.7588%,检验样本 RMSE 为

0.2316。

3.4 反演结果的比较与分析

利用 MODIS 遥感反射率产品 (MODIS- R_{rs}),结合 QAA 后向散射系数反演算法,计算对应站位的悬浮泥沙后向散射系数,并与 Mie 理论模拟结果进行比较,见图 3。从图 3 可以看出,两结果之间存在一定的线性关系,通过对比 QAA 算法推算的悬浮泥沙后向散射系数与 Mie 理论模拟结果发现,QAA 算法估算的悬浮泥沙后向散射系数结果偏高,并且 QAA 算法计算的结果呈现出在一定区间内聚集的现象。其可能原因是由于 MODIS 遥感反射率产品大气校正误差、QAA 算法中经验参数的不适应以及空间尺度问题引起的。

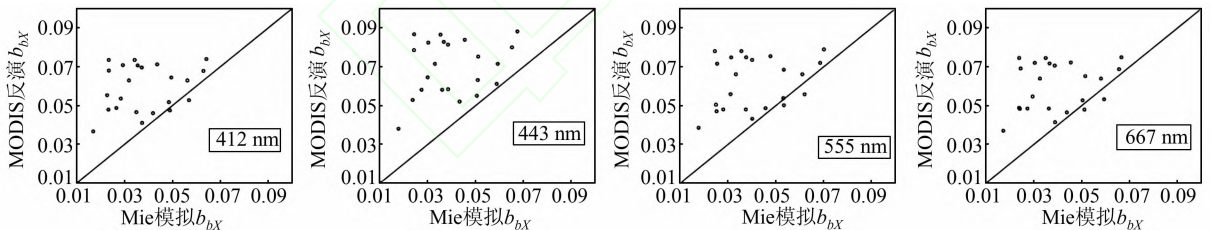


图 3 MIE 模拟的悬浮泥沙后向散射系数与 MODIS QAA 计算结果的比较

Fig. 3 Comparison of Calculated the Suspended Sediment Backscattering Coefficient Between MIE Theory and MODIS QAA Algorithm

利用 QAA 算法和悬浮泥沙浓度模型,从 MODIS 影像上获取研究区域的悬浮泥沙后向散射系数和悬浮泥沙浓度,并结合平均粒径反演算法反演研究区表层海水悬浮泥沙平均粒径,其结果如图 4(c)所示。通过对比 MODIS 反演的悬浮泥沙平均粒径与实测数据,在 412 nm 处,其平均相对误差为 20.0961%,均方根误差为 6.1603 μm ;443 nm 处,其平均相对误差为 22.3876%,均方根误差为 7.1548 μm ;555 nm 处,平均相对误差为 23.0266%,均方根误差为 6.2338 μm ;

667 nm 处,其平均相对误差为 44.1645%,均方根误差为 2.8994 μm 。在近岸高悬浮泥沙区域,其结果与实际调查结果相一致,吻合较好。离岸较远的水体,其成分主要以叶绿素及浮游植物碎屑为主,泥沙含量极少,悬浮泥沙不再是水体光学特征的主控因素,水体后向散射系数主要是由于藻类及浮游植物碎屑颗粒引起的,本文模型中悬浮泥沙浓度和密度参数不适用于以藻类和浮游植物碎屑为主的水域。

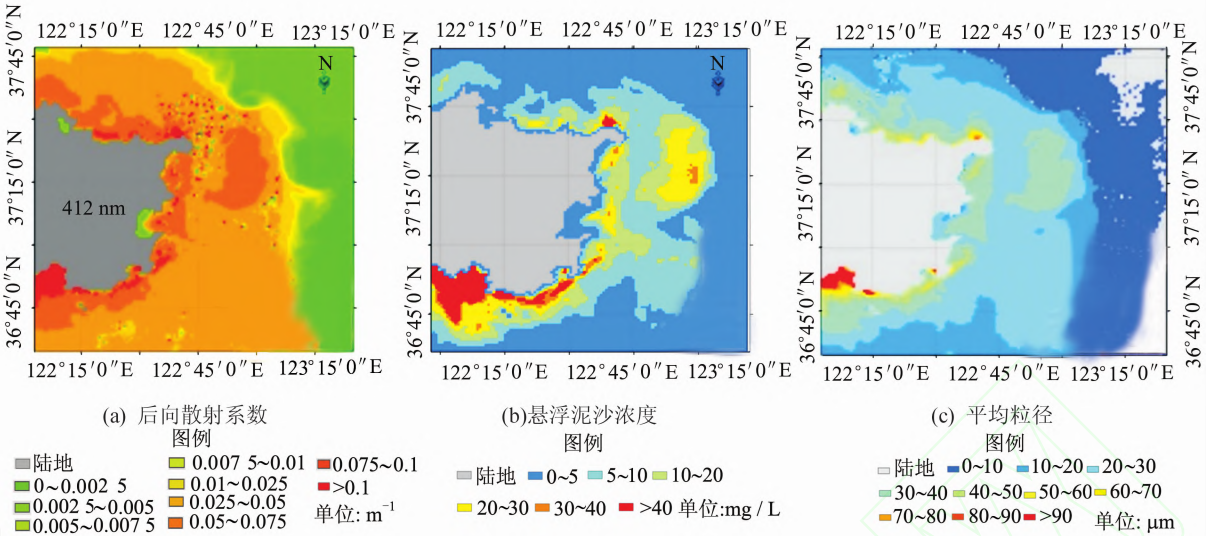


图4 反演的悬浮泥沙后向散射系数、悬浮泥沙浓度和平均粒径

Fig. 4 Retrieval of Suspended Sediment Backscattering Coefficient, Concentration of Suspended Sediment and Average Grain Size

4 结语

本文结合 Mie 理论和海洋光学原理,建立了海水表层悬浮泥沙平均粒径的遥感反演方程。利用 Mie 理论模拟了直径为 D 的球形颗粒的后向散射效率因子,讨论了颗粒后向散射效率因子的变化特征和规律。通过后向散射效率因子推算悬浮泥沙粒子群的后向散射系数,并拟合悬浮泥沙后向散射系数与粒子群平均粒径的函数关系。结果表明,悬浮泥沙后向散射系数与其平均粒径的三次方正相关,线性关系明显,拟合方程决定系数均在 0.93 以上。近岸高悬浮泥沙区域的反演结果与实测数据吻合较好,能够反映海水表层悬浮泥沙的平均粒径分布特征,为相关研究提供数据参考。

本研究中,MIE 理论计算后向散射系数过程中没有考虑到悬浮物物质组成对其后向散射特征的影响,因此,提高模型精度及其适用范围,以及改进 QAA 算法,以提高其后向散射系数的估算精度,有待进一步研究。

致谢:感谢武汉大学黄珏同学在海洋光学原理方面提供的帮助以及 NASA 提供的 MODIS 数据产品。

参 考 文 献

[1] Li Zhanhai, Chen Shenliang, Zhang Guoan. The Study on Grain-Size Distribution of Suspended Sediment and Resuspension Process on the Chongming East Intertidal and Subtidal Zones in the Changjiang

Estuary in China [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2008, 30(6): 154-163(李占海, 陈沈良, 张国安. 长江口崇明东滩水域悬沙粒径组成和再悬浮作用特征[J]. *海洋学报*, 2008, 30(6): 154-163)

[2] Liu Zhonghua, Li Yunmei, Lv Heng, et al. Inversion of Suspended Matter Concentration in Lake Chaohu Based on Partial Least-squares Regression [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2011, 23(3): 357-365(刘忠华, 李云梅, 吕恒, 等. 基于偏最小二乘法的巢湖悬浮物浓度反演[J]. *湖泊科学*, 2011, 23(3): 357-365)

[3] Rainey M P, Tyler A, Gilvear D, et al. Mapping Intertidal Estuarine Sediment Grain Size Distributions Through Airborne Remote Sensing[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 86(4): 480-490

[4] Kostadinov T S, Siegel D A, Maritorenas S. Retrieval of the Particle Size Distribution from Satellite Ocean Color Observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2009, 114(C9): C09015

[5] Huang Haijun, Liu Yanxia, Wang Bo. Effect of Spatial and Spectral Resolution of Images on Interpreting Intertidal Estuarine Sediment Grain Size Distributions [C]. 2010 30th IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Piscataway, 2010

[6] De Chakraborty B C. Estimation of Mean Grain Size of Seafloor Sediments Using Neural Network [J]. *Marine Geophysical Research*, 2012, 33(1): 45-53

[7] Fan Hui, Huang Haijun. Remote Sensing Retrieval of Suspended Particulate Matter Concentrations of Surface Waters Near Radial Sand Ridges Area in the South Yellow Sea [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2011, 31(2): 159-165 (樊辉, 黄海军. 南黄海

- 辐射沙洲邻近海域表层悬浮颗粒物浓度遥感反演[J]. 地理科学, 2011, 31(2): 159-165)
- [8] 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(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)
- [9] Boss E, Twardowski M S, Herring S. Shape of the Particulate Beam Attenuation Spectrum and Its Inversion to Obtain the Shape of the Particulate Size Distribution[J]. *Applied Optics*, 2001, 40(27): 4 885-4 893
- [10] Babin M, Morel A, Fournier R-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
- [11] Bricaud A, Morel A. Light Attenuation and Scattering by Phytoplanktonic Cells: A Theoretical Modeling[J]. *Applied Optics*, 1986, 25(4): 571-580
- [12] Smith R C, Baker K S. Optical Properties of the Clearest Natural Waters(200-800 nm)[J]. *Applied Optics*, 1981, 20(2): 177-184
- [13] Sathyendranath S, Prieur L, Morel A. A Three-Component Model of Ocean Colour and Its Application to Remote Sensing of Phytoplankton Pigments in Coastal Waters[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1989, 10(8): 1 373-1 394
- [14] Ahn Y H, Bricaud A, Morel A. Light Backscattering Efficiency and Related Properties of Some Phytoplankters[J]. *Deep Sea Research Part A*, 1992, 39(11/12): 1 835-1 855
- [15] Qing S, Tang J, Cui T, et al. Retrieval of Inherent Optical Properties of the Yellow Sea and East China Sea Using a Quasi-analytical Algorithm[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2011, 29(1): 33-45

Average Grain Size Inversion of Suspended Sediment in Offshore Waters

YANG Xiguang^{1,2,3} HUANG Haijun^{1,3} YAN Liwen^{1,3} LIU Yanxia^{1,3} MA Lijie^{1,3}

1 Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China

2 University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China

Abstract: Suspended sediment particle size distribution characteristics not only represent the state of being of the suspended particle, but can also be used to imply the procedure and strength of the hydrodynamics and re-suspension. Mie theory is used to build the suspended sediment average grain size retrieval model. Results show that suspended sediment backscattering coefficient and the cube of average grain size has ideal linear relationship, with the determination coefficients of the fitting equations all above 0.93 at four bands (412 nm, 443 nm, 555 nm, 667 nm). The maximal and minimal fitting errors are 16.632 2% (412 nm) and 20.314 3% (667 nm), respectively. The suspended sediment backscattering coefficient in the study area was estimated using the quasi-analytical algorithm (QAA) from a MODIS remote sensing reflectance image. Surface water average grain size was estimated by combining the retrieval values of the suspended sediment concentration and the suspended sediment backscattering coefficient. The result shows that values estimated from the inversion model are in good agreement with experimental data from near-shore areas with high suspended sediment content. This study can provide significant supporting data for deep research on land-ocean interaction, marine ecological system evolution, and marine participates in the global carbon cycle.

Key words: average grain size; retrieval of remote sensing; suspended sediment concentration; Mie theory

First author: YANG Xiguang, PhD, lecturer, specializes in remote sensing and GIS. E-mail: yangxiguang21@163.com

Corresponding author: HUANG Haijun, PhD, professor. E-mail: hjhuang@qdio.ac.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41076031, 41306190.