

文章编号: 1001-9014(2009)03-0168-05

# 河口悬沙粒径对遥感反射率影响的理论分析与实验观测

沈芳, 周云轩, 李九发, 刘小丽  
(华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062)

**摘要:** 为了尽可能减少野外测量的不确定性可能带来的影响, 研究设计了一个基于实验水桶稳定观测平台及可控制条件下的光谱辐射测量实验, 采用典型高浊度河口—长江口和黄河口的泥沙颗粒物作为研究对象, 理论分析了悬浮物粒径与后向散射系数、遥感反射率的定量关系, 实验观测了悬浮颗粒物粒径对遥感反射率的响应变化, 实验结果可为河口二类水遥感建模及粒径在遥感模型中的参数化表达提供参考依据。

**关键词:** 遥感反射率; 河口海岸; 悬浮泥沙; 颗粒粒径

**中图分类号:** TP79 P734.2+31 **文献标识码:** A

## THEORETICAL ANALYSIS AND EXPERIMENTAL OBSERVATION FOR THE EFFECT OF SUSPENDED SEDIMENT PARTICLE SIZE ON REMOTE-SENSING REFLECTANCE

SHEN Fang ZHOU Yun-Xuan LI Jiu-Fa LIU Xiao-Li

(State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

**Abstract:** An experiment for spectral radiation measurement was designed and conducted under the stable controllable conditions in order to minimize the uncertain influences from in situ measurements in the estuarine water. Sediment particles from the Yangtze river estuary and the Yellow river estuary as two typically turbid estuaries in China were sampled in the field and screened and resampled in the laboratory. Furthermore, the quantitative relationships between the suspended sediment particle size and the backscattering coefficient and remote sensing reflectance were theoretically analysed. The effects of the particle size of sediment on remote sensing reflectance were experimentally observed. The results provide the basis for the modelling of case 2 waters and the parameterized expression of particle size in remote sensing models.

**Key words:** remote sensing reflectance; estuary and coast; suspended sediment; particle size

### 引言

反演河口悬浮泥沙浓度是水色卫星遥感应用的主要内容之一, 然而现有卫星产品的标准水色算法 (SeaWiFS/OC4, MODIS/OC3M, MERIS/Case2 Processor 等) 几乎不考虑颗粒组分、粒径及分布模式对遥感反射率的影响。本实验观测表明粒径对遥感反射率的影响十分显著, 特别像长江口这类中等潮差的动力河口, 悬浮物浓度、颗粒粒径呈现时空非均匀分布的特征, 粒径变动范围比较大, 如  $0.37 \sim 282 \mu\text{m}$ , 粒径  $< 8 \mu\text{m}$  的颗粒易吸附有机质, 粒径  $> 100 \mu\text{m}$  的多为絮

凝团块颗粒。仅建立悬沙浓度与遥感反射率 (或后向散射系数) 的反演模型, 忽略粒径变化对遥感反射率的影响会导致较大的反演误差。故粒径变化在动力河口的遥感反演中应当引起足够关注。

2004 年以来, 河口海岸学国家重点实验室在长江河口多次开展水文泥沙调查的同时, 同步进行了水体光谱辐射测量, 分析后发现, 相当数量的数据存在不确定性, 受观测条件及环境的影响较为明显<sup>[2]</sup>。为了尽可能减少野外测量的不确定性可能带来的影响, 研究设计了一个基础性的测量实验, 即采用室外自然光源, 基于大型实验水桶的样品观测, 由

收稿日期: 2008-12-21, 修回日期: 2009-02-12

Received date: 2008-12-21, revised date: 2009-02-12

基金项目: 教育部科学技术研究重点项目 (105076), 国家 973 项目 (2002CB412403), 国家自然科学基金项目 (40871165)

作者简介: 沈芳 (1964-) 女, 江苏无锡人, 副教授, 博士, 目前从事河口近岸水色遥感研究。

©1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

此分析 (1) 相同物质组成不同颗粒粒径分布对遥感反射率的影响; (2) 相同颗粒粒径分布但物质组成不同对遥感反射率的影响. 实验结果可为河口二类水的遥感建模提供参考依据.

## 1 实验与测量方法

### 1.1 野外现场采样

实验采用 2 个典型高浊度河口—长江口和黄河口的泥沙颗粒物作为研究对象. 由于水动力条件的复杂性, 长江口悬浮泥沙颗粒粒径呈非均匀分布, 中值粒径 ( $D_{50}$ ) 从江津的  $217.8 \mu\text{m}$  逐渐减少至口外的  $12 \mu\text{m}$ . 北槽为  $22.4 \sim 48 \mu\text{m}$ , 南槽为  $12.1 \sim 22 \mu\text{m}$ . 最大浑浊带粒径呈现多样性和复杂性<sup>[3]</sup>. 泥沙采样部位位于崇明东滩上潮滩的潮沟里, 样品收集  $30 \text{ kg}$  经激光粒度分析, 其粒径分布范围为  $0.375 \sim 282 \mu\text{m}$ . 中值粒径在  $11.7 \sim 42.5 \mu\text{m}$  与水中悬浮泥沙粒径接近, 基本满足浓度及粒度配比重采样的需求.

为对比泥沙颗粒物由于矿物组成及含量、有机物含量的差异, 可能造成对遥感反射率的影响, 选用了河口悬浮泥沙作为实验的对比样品. 采样位于前缘潮滩的潮沟里 ( $118^{\circ} 80' \text{ E} / 38^{\circ} 14' \text{ N}$ ), 样品于 2006 年 5 月收集  $50 \text{ kg}$ . 河口由于挟沙量较多, 在三角潮滩前缘淤积迅速, 滩面上快速淤积的沉积物尚未及时遭到冲刷, 故其物质颗粒粒径较细, 能够代表水体中悬浮颗粒物.

### 1.2 室内样品分析

野外收集的两组样品, 从表观上, 长江口样品呈深黄色, 河口样品呈浅黄色. 实验室有机质分析结果: 长江口样品有机质含量为  $0.904\%$ , 河口样品有机质含量为  $0.633\%$ .

显微镜矿物分析, 长江口样品主要由  $95\%$  的轻矿物如石英 + 长石和碳酸岩 ( $3\%$ ), 以及  $5\%$  重矿物如云母 ( $< 1\%$ ), 帘石、闪石等抗风化矿物 ( $< 3\%$ ), Fe-Mn 黑色金属矿物 ( $1\%$ ) 组成. 河口样品主要由  $92\%$  的轻矿物如石英、长石, 以及  $8\%$  重矿物如云母 ( $< 0.5\%$ ), 帘石 ( $< 3\%$ ), 闪石 ( $2\%$ ), Fe-Mn 黑色金属矿物 ( $1\%$ ), 绿泥石 ( $1\%$ ) 等物质组成.

X 衍射粘土矿物分析表明, 长江口样品的粘土矿物组成: 蒙脱石  $4.17\%$ 、伊利石  $66.62\%$ 、高岭石  $16.55\%$ 、绿泥石  $12.67\%$ . 河口样品的粘土矿物组成: 蒙脱石  $4.62\%$ 、伊利石  $65\%$ 、高岭石  $16.45\%$ 、绿泥石  $13.94\%$ .

水样悬沙浓度测定采用称重法, 即用  $0.7 \mu\text{m}$  Whatman GF/F 玻璃纤维滤纸过滤, 再用 MilliQ 蒸

馏水冲洗去除盐分, 烘干再经天平称重获得干重, 换算为悬沙浓度.

泥沙颗粒粒径采用激光粒度仪测定, 方法为取  $5 \sim 10 \text{ g}$  样品放入  $50 \text{ mL}$  的烧杯中加入  $10 \text{ mL}$  浓度为  $10\%$  的双氧水, 静置 24 小时以去除有机质, 之后加入  $10 \text{ mL}$  浓度为  $4\%$  的偏磷酸钠浸泡经超声波振动  $15 \text{ min}$  使颗粒分散, 然后置入激光粒度仪测定.

### 1.3 实验样品重采样

室内样品分析结果表明两组样品有机质含量及矿物组分存在一定差异, 展开对比实验即可观测到成分或组成要素对遥感反射率的影响. 对于粒径要素对遥感反射率的影响, 实验采用颗粒筛分的方法对两组原始样品的粒级级配重新配比, 即先将样品用水浸泡若干天, 然后用粒级  $0.04 \text{ mm}$  的网筛过滤筛选, 重新筛选出粒径大于  $0.04 \text{ mm}$  的粗颗粒物和小于  $0.04 \text{ mm}$  的细颗粒物的具有两个不同粒径分布的样品, 然后展开对比观测实验. 经激光粒度分析, 重采样后的样品粒径分布特征见表 1 所示.

对重采样后形成的四组样品, 分别用精密电子秤称重  $25 \text{ g}$  (湿重) 形成小样存入密封的塑料袋中, 以备实验过程中逐步投入实验水桶形成浓度梯度变化使用.

### 1.4 实验与测量方法

水体辐射测量通常采用两种方法: 水下测量和水上测量法. 水下测量法在高浊水中测量时信号敏感性减弱, 易发生饱和<sup>[4]</sup>. 故采用水上光谱测量方法, 测量仪器为美国 ASD 公司 ASD FieldSpec FR 光谱辐射计. 该仪器可用于  $350 \sim 2500 \text{ nm}$  全光谱范围的反射率、辐照度和辐亮度的数据采集,  $350 \sim 1000 \text{ nm}$  抽样间隔为  $1.4 \text{ nm}$ , 光谱分辨率为  $3 \text{ nm}$ ;  $1000 \sim 2500 \text{ nm}$  抽样间隔为  $2 \text{ nm}$ , 光谱分辨率为  $10 \text{ nm}$ .

实验桶的材料为黑色亚光塑料制品, 圆桶高度  $1.5 \text{ m}$ , 底部直径  $1.4 \text{ m}$ , 顶部直径  $1.5 \text{ m}$ , 并用黑色棉布包裹圆桶外壁, 以尽量减少桶壁及底部对目标测量的影响. 实验时将桶放置于空旷的运动场内, 并选在夏至午时太阳高度角较高的 7 月份, 即 2006 年 7 月 13.

表 1 重采样后的样品粒度特征

Table 1 Particle characteristics of subsamples after resampling

样品特征	颗粒粒径分布	平均粒径	中值粒径	体积百分比 (筛网粒级)
长江口细颗粒	$0.375 \sim 76.43 \mu\text{m}$	$12.90 \mu\text{m}$	$20.30 \mu\text{m}$	$> 89.8\%$ ( $< 0.04 \text{ mm}$ )
长江口粗颗粒	$0.375 \sim 282.1 \mu\text{m}$	$55.55 \mu\text{m}$	$68.81 \mu\text{m}$	$> 84.1\%$ ( $> 0.04 \text{ mm}$ )
河口口细颗粒	$0.375 \sim 69.62 \mu\text{m}$	$6.9 \mu\text{m}$	$8.18 \mu\text{m}$	$> 95.4\%$ ( $< 0.04 \text{ mm}$ )
河口口粗颗粒	$0.375 \sim 282.1 \mu\text{m}$	$40.01 \mu\text{m}$	$52.01 \mu\text{m}$	$> 70.2\%$ ( $> 0.04 \text{ mm}$ )

17、19、28、29、30日天气晴朗、风速小于 5m/s 的天气条件下测量,测量时间为北京时 9:30~15:00

实验步骤: (1)干桶测量:用水冲净晾干,光谱辐射计 ASD水上测量法测量; (2)加入清水:光谱辐射计 ASD测量; (3)添加泥样 25g (4)搅拌均匀,同时使用浊度计 OBS实时测量验证, OBS自上而下,由于 OBS的测程限制,左右移动,至 OBS数值稳定; (5)浊水 ASD测量,同时记录天气状况及时间; (6)采集水样 2瓶 (用于悬浮物浓度测定)重复实验步骤 (3)~(6),直至完成实验计划。

由于遥感反射率  $R_{rs}(sr^{-1})$  (或离水反射率) 不能通过光谱辐射计直接测量获得,需采用间接测量的方法及公式估算<sup>[5,6]</sup>:

$$R_{rs}(\theta, \phi, \lambda) = \frac{L_w(\theta, \phi, \lambda)}{E_d^+(\lambda)}, \quad (1)$$

其中,  $\theta$ 为观测天底角,  $\phi$ 为观测平面自太阳入射平面的方位角,  $\lambda$ 为波长. 测量及估算方法: (1)  $L_w(\theta, \phi, \lambda)$  ( $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot nm^{-1}$ )为在方向  $(\theta, \phi)$ 上的离水辐射率,通常采用 Lee<sup>[7]</sup>和 Whitlock<sup>[8]</sup>等人建议的近似估算方法  $L_w(\theta, \phi, \lambda) = L_r(\lambda) - \rho I_s(\lambda)$ , 其中  $L_r(\lambda)$ 为光谱仪测量水面的总辐射率,  $L_s(\lambda)$ 为天空漫散射光的辐射. 水上测量的难点在于水表面易受太阳耀光的污染,刘志刚等人分析了利用偏振方法剔除太阳耀光的影响<sup>[9]</sup>; 本文采用 Mobley<sup>[6]</sup>建议的“回避剔除”方法,即水面观测时保持  $\theta = 40^\circ$ 和  $\phi = 135^\circ$ , 天空光观测时,保持  $\phi$ 不变,观测天顶角保持  $40^\circ$ ; 如此可使太阳耀光污染最小;  $\rho$ 为水气界面对天空光的反射因子,取决于太阳天顶角、观测几何、风速风向及海面粗糙度<sup>[6]</sup>. 根据 Mobley辐射传输过程模拟的近似结果:晴空无云天气风速  $< 5m/s$ ,  $\rho$ 取值 0.0367; 晴空但有云覆盖的天气条件下,  $\rho$ 取值 0.028. 为减少随机误差,目标光谱连续采样 5~10次. (2)向下辐照度  $E_d^+(\lambda) = \pi I_p(\lambda) / R_p(\lambda)$ <sup>[6,7]</sup>通过参考板 (如 20%的灰板)的反射测量完成,  $R_p(\lambda)$ 为参考板漫反射因子,在测量前应该经实验室检测率定;  $I_p(\lambda)$  ( $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot nm^{-1}$ )为参考板漫反射辐射亮度. 为减少受光照条件变化的影响,尽量在最短时间内完成参考板、水体目标及天空光的测量。

### 2 理论分析

Gordon等经过理论分析及辐射传输模拟建立了遥感反射率  $R_{rs}$ 与固有光学特性 (IOPs)关系的计算公式<sup>[10]</sup>. 基于一些假定,如海水无限水深或浑浊海岸水底部影响极小,垂向水柱均匀等,理论公式经

过相应简化得出遥感应用的近似关系式<sup>[11,12]</sup>:

$$R_{rs} = \frac{f \cdot b_b}{Q \cdot a + b_b}, \quad (2)$$

其中,  $f$ 为经验值,与水气界面传输、海水折射指数有关;  $Q$ 为向上辐亮度与辐照度之比;  $a$ 为水体总的吸收系数,与水体组分和浓度有关;  $b_b$ 为水体总的后向散射系数,与水体颗粒物粒径、折射指数及浓度有关. 在以悬沙为主要成分的浑浊水中,高浓度颗粒物的散射过程往往比吸收过程对水下光场的影响要大得多,后向散射系数成为遥感反射率计算中的重要参数<sup>[13]</sup>.

对于颗粒物与后向散射特性的关系, Mie理论给出了颗粒浓度、折射指数、粒径及分布规律与后向散射系数的理想描述,即假定悬浮物为规则球状微粒,直径为  $D$ 均匀微粒折射指数  $m = n - ik$ , 后向散射系数可表示为:

$$b_b = \int_0^\infty Q_{bb}(m, \alpha) \alpha^2 N(\alpha) d\alpha, \quad (3)$$

其中,后向散射效率因子  $Q_{bb} = \frac{1}{(\alpha^2)} \left| \sum_{n=1}^\infty (2n+1)(-1)^n (a_n - b_n) \right|^2$ , 尺度参数<sup>[14]</sup>  $\alpha = \frac{\pi m D}{\lambda}$ ,  $N(\alpha)$ 是粒子的尺度分布函数.

Forge等对悬浮颗粒的后向散射进行模型化后给出一个表达式<sup>[15]</sup>:

$$b_p(\lambda) = \frac{3PC}{2\rho_{PM}} \left[ \frac{D_{max}}{D_{min}} \right] \int_{D_{min}}^{D_{max}} Q_{bb}(D, m, \lambda) D^{-2} dD, \quad (4)$$

其中,  $\rho_{PM}$ 为悬浮颗粒密度,  $PC$ 为悬浮颗粒浓度, 粒径  $D$ 假定服从 Junge-type分布.

Mie理论关系式在遥感应用的生物光学模型中往往被简化. Gordon-More模式仅给出了颗粒物浓度与后向散射贡献的关系表达; Kopelevich模式区分了小粒径与大粒径的颗粒物对后向散射的贡献,认为小颗粒在大角度有较高的散射贡献 (后向散射强) 且有较强的波长依赖,大颗粒散射主要位于小角度分布 (前向散射强) 且波长依赖相对弱; Haltrin-Katayama模式为 Kopelevich模式的扩展,它对小、大颗粒后向散射的贡献给出了进一步的参数化表达<sup>[16]</sup>:

$$b_b(\lambda) = 1/2 b_w(\lambda) + B_s b_{ps}(\lambda) P_s + B_l b_{pl}(\lambda) P_l, \quad (5)$$

其中,  $b_w(\lambda) = 5.826 \times 10^{-3} \left[ \frac{400}{\lambda} \right]^{4.322}$ ,

$$b_{ps}(\lambda) = 1.1513 \left[ \frac{400}{\lambda} \right]^{1.7} (m^2 g^{-1} \lambda)$$

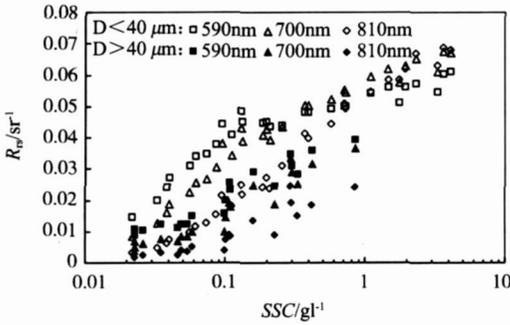


图 1 随着悬沙浓度梯度变化悬浮颗粒物的粒径对遥感反射率的影响

Fig. 1 Effects of particle size of suspended sediment matter on remote sensing reflectance with the suspended sediment concentration (SSC) variations

$$b_{p1}^0(\lambda) = 0.3411 \left[ \frac{400}{\lambda} \right]^{0.3} (\text{m}^2 \text{g}^{-1}),$$

$P_s$ 、 $P_l$ 分别为小、大颗粒物浓度(单位:  $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ );  $B_s$ 、 $B_l$ 分别为小、大颗粒后向散射的概率, Haltrin-Kattawar 分别给出 0.039和 0.00064. Kopelevich及 Haltrin-Kattawa 模式在参数化区分大、小颗粒后向散射的贡献时,假定小粒径指小于  $1\mu\text{m}$ 的颗粒、大粒径指大于  $1\mu\text{m}$ 的颗粒.本实验悬沙粒径的分布要大于此范围(参见表 1).

### 3 实验观测结果及讨论

通过实验观测,对比分析了两组不同粒径  $D$ (细颗粒  $D < 40\mu\text{m}$ ;粗颗粒  $D > 40\mu\text{m}$ )下的遥感反射率对浓度变化的响应,发现无论是黄河口还是长江口的样品,在可见光及近红外波段,悬浮物浓度增高,遥感反射率也随之增高;相同浓度水平下,细颗粒悬浮物的遥感反射率显著高于粗颗粒物的遥感反射率.图 1列出了两组粒径颗粒随着悬沙浓度(SSC)的变化,其对应峰值波段<sup>[2]</sup>的遥感反射率的变化特征.

实验结果表明,小颗粒的遥感反射率明显高于大颗粒的遥感反射率,从第 2节的理论分析原因是小颗粒后向散射的贡献远大于大颗粒.假定有小、大两个粒径范围的两组颗粒,分别改变小、大颗粒不同的浓度水平  $P_s$ 和  $P_l$ 根据公式(5)估算出对应的总的后向散射系数.从图 2可见,小粒径颗粒浓度  $P_s$ 增高后,对应的  $b_b$ 在整个波长范围内也随之大大增高;而大粒径颗粒浓度  $P_l$ 增高后,  $b_b$ 变化极少.

假定水体总吸收远大于总后向散射,由公式(2)计算出小颗粒与大颗粒的遥感反射率之比即  $R_{rs\_small}/R_{rs\_large}$ 可近似等于二者的后向散射系数之

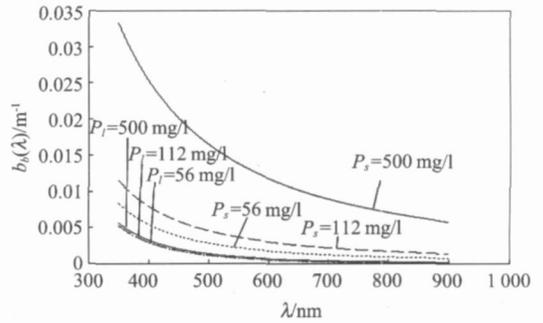


图 2 公式(5)估算出的小、大颗粒物不同浓度水平下的后向散射系数

Fig. 2 Backscattering coefficients in the case of different concentration levels for small and large particle estimated from the Eq. 5

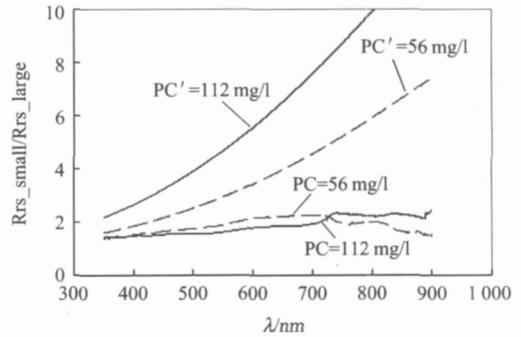


图 3 两个颗粒浓度水平下实测与模式估算的小、大颗粒遥感反射率之比

Fig. 3 Ratios of remote-sensing reflectance of small particles to that of large particles from the experimental measurements and the estimations based on the model respectively in the case of two particle concentrations

比.图 3中给出两个浓度水平下,实测的小、大颗粒遥感反射率之比(浓度用  $PC$ 表示)随波长的变化;由公式(5)估算的后向散射系数之比(浓度用  $PC'$ 表示)随波长的变化.

从图 3可见,在可见光、近红外波段,实测小、大粒径遥感反射率的比值在 1.5~2.5的范围,即小粒径的遥感反射率高于大粒径遥感反射率的 2倍左右,数值随波长增加略有升高;由理论模式估算的遥感反射率比(近似为后向散射系数比)大多在 2~10的数值范围,且比值随浓度增高而增大,并随波长增加而呈指数升高.由此表明:(1)当浓度增高时,小粒径的遥感反射率相对于大粒径遥感反射率增加得多;(2)小粒径的遥感反射率相对于大粒径遥感反射率对波长的依赖更显著.比较而言,实测与模式估算的结果有较大的差距,原因在于理论模式假定的小粒径在  $1\mu\text{m}$ 以下范围,而本实验小颗粒的平均粒径为  $6.9\mu\text{m}$ (黄河口)和  $12.9\mu\text{m}$ (长江口),若在此

粒径范围采用 Haltrin-Kattawa模式计算可能会高估粒径大于  $1\mu\text{m}$  而小于  $40\mu\text{m}$  颗粒的后向散射的贡献, 致使它的遥感反射率高于对应的实测值. 故十分必要在今后的工作中建立不同粒径分布与后向散射系数的关系表达, 可借鉴 Forgel<sup>[5]</sup> 模式尝试给出黄河口和长江口的粒径分布特征与后向散射系数的参数化表达形式.

同时, 从实验室分析的黄河口、长江口两组样品的结果看, 它们的矿物组成和含量, 以及有机物含量存在差异, 经实验观测: 两组样品的遥感反射率光谱曲线仅略有差异. 然而, 对于物质组成中何种矿物成分的吸收特性会导致这种差异有待进一步探讨. 对比结果表明: 悬浮颗粒物的粒径对遥感反射率的影响远大于颗粒成分对它的影响.

#### 4 结论

粒径对遥感反射率的显著影响对于陆—海交互作用强烈、悬浮颗粒物粒径不均匀分布的动力河口来说, 在遥感应用中不考虑粒径对遥感反射率的影响, 会导致悬浮颗粒浓度反演有较大的误差.

理论表明颗粒粒径与后向散射特性的关系十分密切, Mie理论给出了粒径、折射指数和粒径分布函数与后向散射系数之间关系的理想描述, 它们的关系在遥感应用的生物光学模型中通常被简化. 从 Haltrin-Kattawa模式计算分析可知, 小粒径颗粒对后向散射的贡献占据优势, 且随浓度变化显著, 并具有波长依赖. 本研究通过对两组小、大粒径的悬浮泥沙颗粒遥感反射率的实验观测及分析, 结果表明: 随着颗粒物浓度增加遥感反射率增加; 相同浓度水平下, 小粒径的遥感反射率显著高于大粒径的遥感反射率, 实测结果与 Haltrin-Kattawa粒径尺寸及浓度与后向散射系数的关系模式和 Gordon遥感反射率与后向散射系数的关系模型中的变化规律是相吻合的, 但实测与模式计算的数值有差异, 主要在于理论模式给定的粒径范围与实测样品的粒径范围不同. 此外, 颗粒物成分对遥感反射率的影响从实测结果分析是存在的, 但悬浮颗粒物的粒径对遥感反射率的影响远大于颗粒成分对它的影响.

**致谢** 本文实验设计得到了中国科学院上海技术物理研究所匡定波院士的指导. C. D. Mobley先生对水上辐射测量及估算方法给予了部分指导. 我的同事陈庆强教授、孟翊副教授参与了实验室的样品分析与指导工作. 在此一并表示感谢!

#### REFERENCES

- [1] XU Jing-Ping, ZHANG Bai, SONG Kai-Shan, et al. Estimation of Chlorophyll a concentration in Lake Ximiao based on a semi-analytical model [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (徐京萍, 张柏, 宋开山, 等. 基于半分析模型的新庙泡叶绿素 a 浓度反演研究. *红外与毫米波学报*) 2008 **27**(3): 197-201
- [2] Shen Fang, Zhang Jie, Liu Zhiguo, et al. Spectral signature characters based on measurement in situ of high turbid water in Yangtze River estuary [J]. *In Proceedings of SPIE* 2006 **6406** 640608
- [3] LI Wei-Hua, LI Jiu-Fa, SHI Jian-Qiang, et al. Review on the researches of sediment properties and transportation rules of the Huanghe estuary China [J]. *Journal of Sediment Research* (刘维华, 李九发, 时连强, 等. 黄河口泥沙特性和输移研究综述. *泥沙研究*) 2005 **6** 76-81
- [4] Doxaran D, Chenikuru N, Lavender S J. Apparent and inherent optical properties of turbid estuarine waters: measurements, empirical quantification relationships and modeling [J]. *Applied Optics* 2006 **45** 2310-2324
- [5] Carder K L, Reinersman P H, Chen R F, et al. AVIRIS calibration and application in coastal oceanic environments [J]. *Remote Sensing of Environment* 1993 **44** 205-216
- [6] Mobley C D. Estimation of the remote sensing reflectance from above surface measurements [J]. *Applied Optics* 1999 **38** 7442-7455
- [7] Lee Z P, Carder K L, Peacock T G, et al. Method to derive ocean absorption coefficients from remote sensing reflectance [J]. *Applied Optics* 1996 **35** 453-462
- [8] Whitlock C H, Poole L R, Ustry J W, et al. Comparison of reflectance with backscatter and absorption parameters for turbid waters [J]. *Applied Optics* 1981 **20** 517-527
- [9] LIU Zhi-Gang, ZHOU Guan-Hua. Polarization of sun glint [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (刘志刚, 周冠华. 太阳耀光的偏振分析. *红外与毫米波学报*) 2007 **26**(5): 362-365
- [10] Gordon H R, Brown O B, Jacobs M M. Computed relationships between the inherent and apparent optical properties of a flat homogeneous ocean [J]. *Applied Optics* 1975 **14**(2): 417-427
- [11] Zaneveld J R V. A theoretical derivation of the dependence of the remotely sensed reflectance on the inherent optical properties [J]. *Journal of Geophysical Research* 1995 **100** (C7) 13 135-142
- [12] Gould R W, Amore R A. Remote sensing estimates of inherent optical properties in a coastal environment [J]. *Remote Sensing of Environment* 1997 **61**: 290-301
- [13] Ristic D. Effect of suspended particulate size distribution on the backscattering ratio in the remote sensing of seawater [J]. *Applied Optics* 2002 **41**(33): 7092-7101
- [14] Ulloa Q, Satyendranath S, Platt T. Effect of the particle size distribution on the backscattering ratio in seawater [J]. *Applied Optics* 1994 **33**(30): 7072-7077
- [15] Forget P, Ouillon S, Lahet F, et al. Inversion of reflectance spectra of non chlorophyllous turbid coastal waters [J]. *Remote Sensing of Environment* 1999 **68** 264-272
- [16] Mobley C D. *Light and Water: Radiative Transfer in Natural Waters* [M]. San Diego: Academic Press, 1994