

鄱阳湖水体悬浮颗粒物散射光谱分解方法研究

陈莉琼¹, 陈晓玲^{1,2,3}, 田礼乔^{1*}, 邱 凤¹

1. 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430079
2. 江西师范大学鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室, 江西 南昌 330022
3. 南昌大学鄱阳湖环境与资源利用教育部重点实验室, 江西 南昌 330022

摘要 内陆水体复杂性为水体悬浮颗粒物散射光谱分解带来难题, 也制约着水色遥感理论算法的发展。以 2009 年鄱阳湖秋季观测数据为基础, 提出一种二元简化主轴(ranged major axis, RMA)方法的水体悬浮颗粒物散射光谱分解模型, 对鄱阳湖水体中悬浮无机颗粒物与有机颗粒物的散射光谱进行了提取研究。结果表明采用 RMA 方法建立的悬浮颗粒物散射光谱分解模型在鄱阳湖具有很好的分离效果, 在高浑浊水体区域总悬浮颗粒物散射系数预测误差在 15% 以内, 与现有方法相比具有明显优势。分解结果显示鄱阳湖悬浮颗粒物散射主要来自以伊利石/蒙脱石为主要成分的无机颗粒物, RMA 方法能够反映占主导地位悬浮颗粒物的散射特性, 可以为高浑浊水体散射模型与水色遥感反演算法的研究提供重要依据。

关键词 散射; 水色遥感; 光谱分解; 鄱阳湖

中图分类号: O432 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2012)03-0729-05

引言

水体悬浮颗粒物的散射特性描述了水体中各悬浮颗粒物组分对入射到水体中能量的散射能力, 是影响水体光学特性与遥感反射率的主要因素, 也是构成水色遥感定量反演理论模型的重要参量^[1-3]。目前针对水体散射特性的研究, 多采用现场仪器(如 Wetlabs 公司的 AC-9 和 AC-S, ECO-BB9, HS-6 等光学仪器)观测获取水体中总悬浮颗粒物的散射光谱^[4]。在近海与湖泊等 II 类水体中, 大量的陆源无机悬浮物使得水体的悬浮颗粒物散射特性不是只受到浮游植物的影响, 而是由无机颗粒物和有机颗粒物(包括藻类、有机碎屑等多种物质)共同决定, 大量研究表明, 自然水体中的无机颗粒物与有机颗粒物在复折射率与粒径大小上存在差异, 导致其散射与后向散射能力存在显著不同^[5,6]。总悬浮颗粒物散射光谱无法很好地表征目标水体在水色组分上的差异, 阻碍我们对于 II 类水体光学特性的认识, 从而影响水色遥感反演的精度, 为内陆水体水色遥感的发展带来了挑战^[7]。因此开展水体悬浮颗粒物散射系数的分离研究, 对于深入理解湖

泊水体光学特性的内在变化机制, 建立水色遥感反演模型等具有重要意义。

由于 II 类水体散射光谱分解存在困难, 早期的研究多采用总悬浮颗粒物散射系数 b_p 与总悬浮颗粒物浓度(TSM)或无机颗粒物浓度(PIM)的比值 b_p/TSM 或 b_p/PIM 来代替无机颗粒物散射光谱^[5], 或者利用 MIE 散射理论计算不同折射率、颗粒分布的无机颗粒物与有机颗粒物比散射光谱^[8]。国内外学者针对 II 类水体悬浮颗粒物散射光谱分解的研究还处于尝试阶段。例如 Snyder 等采用最小二乘法(ordinary least squares, OLS)对水体中无机颗粒物散射光谱与有机颗粒物光谱进行了分离^[9,10], 也有学者基于藻类颗粒物可见光波段衰减系数为常数的假设, 利用定量滤膜技术测量获取的藻类吸收光谱推算并分离出藻类与非藻类颗粒物的散射光谱^[11]。上述方法虽然在特定研究区域取得了较好的效果, 但由于不同研究区域水体光学特性差异较大, 分解获取的颗粒物散射光谱存在较大的不确定性。比如在高悬沙水体中, 依据藻类颗粒物吸收光谱的分解方法受到藻类颗粒物吸收系数测定误差的影响, 不具备较好的可操作性; 而最小二乘法则依赖于总颗粒物散射与颗粒物浓度的良好相关关系, 且受到

收稿日期: 2011-05-23, 修订日期: 2011-10-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(40906092, 41071261), 国家自然科学基金委创新研究群体科学基金项目(41021061); 南昌大学“鄱阳湖环境与资源利用教育部重点实验室”开放课题(Z03975), 测绘遥感信息工程国家重点实验室专项科研经费和 985、国家重点实验室仪器设备专项经费资助

作者简介: 陈莉琼, 女, 1983 年生, 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室博士研究生 e-mail: chenlq@whu.edu.cn

* 通讯联系人 e-mail: tianye2003@gmail.com

现场观测误差的影响,对于无机颗粒物占主导地位的水体散射光谱分解容易出现负值^[12]。本工作针对典型高悬沙含量水体湖泊——鄱阳湖,提出了一种浑浊水体悬浮颗粒物散射光谱分解模型,并对其适应性进行评价。

1 研究区域和数据

鄱阳湖位于长江中下游南岸,江西省北部,是我国最大的淡水湖。鄱阳湖承纳江西省境内赣江、抚河、信江、饶河和修水五大河流(下称五河)的来水来沙,河流入湖携带大量颗粒物,以及鄱阳湖日益加剧的采砂活动,使鄱阳湖成为长江中下游典型的高浑浊湖泊,而悬浮颗粒物也成为影响鄱阳湖水体光学特性的重要因子^[13]。分析数据取自 2009 年 10 月 16 日—22 日鄱阳湖观测航次。水体散射光谱观测的有效站点位于鄱阳湖主湖区及东部波阳县附近水域,共计 33 个样点(见图 1)。在测量水体散射光谱的同时,采集水样放入冷藏箱,送回实验室进行水体组分浓度的测定。

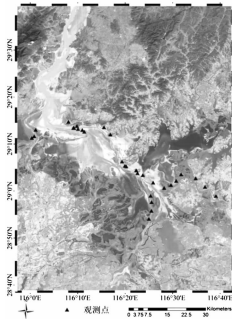


Fig. 1 Location of 33 stations investigated in October 2009, Poyang Lake

采用美国 WET Labs 公司的 AC-S 吸收/衰减计对总悬浮颗粒物散射光谱 $b_p(\lambda)$ 进行测量。AC-S 可获取 400~750 nm 波长范围内共 85 个波段的水体吸收与衰减光谱,光谱分辨率为 4 nm,测量精度可达 $\pm 0.01 \text{ m}^{-1}$ 。通过现场观测可直接获取水体吸收系数和衰减系数,分别对其进行温度校正和散射校正^[14,15]。校正后的吸收系数 $a_{p+g}(\lambda)$ 与衰减系数 $c_{p+g}(\lambda)$ 包含了悬浮颗粒物与 CDOM(chromophoric dissolved organic matter)的共同作用,考虑到 CDOM 的散射贡献可以忽略不计,水体中悬浮颗粒物的散射系数可由下式获得

$$b_p(\lambda) = c_{p+g}(\lambda) - a_{p+g}(\lambda) \quad (1)$$

实验室水样分析获取的参数包括总悬浮颗粒物浓度(TSM)、无机悬浮颗粒物浓度(PIM)、有机悬浮颗粒物浓度(POM)以及叶绿素 a 浓度(Chla)。将表层水样经烘干后的 Whatman GF/F 滤膜过滤,对吸附了悬浮颗粒物的滤膜进行 105 °C 高温烘干、冷却后称重,获取总悬浮颗粒物浓度 TSM。对滤膜进行 450 °C 烘烤、冷却再称重即可获得无机颗粒物浓度 PIM,有机颗粒物浓度 $\text{POM} = \text{TSM} - \text{PIM}$ 。叶绿素 a 浓度(Chla)采用荧光计法测定,即将表层水样经孔径为 0.45 μm 的醋酸纤维滤膜过滤,用丙酮萃取后采用荧光计测量。

2 模型与方法

2.1 悬浮颗粒物散射光谱模型

依据颗粒物复折射率特性,可以将水体中悬浮颗粒物划分为低折射率的有机悬浮颗粒与高折射率的无机悬浮颗粒两类,根据 MIE 散射理论,总散射 $b_p(\lambda)$ 可以表示为无机颗粒物总散射与有机颗粒物总散射之和^[16]

$$b_p(\lambda) = b_{\text{PIM}}(\lambda) + b_{\text{POM}}(\lambda) = \sigma_i(\lambda)N_i + \sigma_o(\lambda)N_o \quad (2)$$

其中 $\sigma_i(\lambda)$ 为单个无机颗粒物颗粒的散射截面, N_i 为单位体积内无机颗粒物的个数, $\sigma_o(\lambda)$ 为单个有机颗粒物颗粒的散射截面, N_o 为单位体积内有机颗粒物的个数。

由于水色遥感反演研究中更关注的是悬浮颗粒物浓度信息,以无机颗粒物为例,定义 V_{Ti} 为单位体积内所有颗粒物的总体积, ρ_i 为颗粒物密度, V_i 为单个粒子体积,则悬浮颗粒物散射系数 $b_{\text{PIM}}(\lambda)$ 与浓度 PIM 的关系式可以通过以下公式得出

$$\text{PIM} = \rho_i V_{Ti} = \rho_i N_i V_i \quad (3)$$

$$b_{\text{PIM}}(\lambda) = \sigma_i(\lambda)N_i = \frac{\sigma_i(\lambda)}{\rho_i V_i} \text{PIM} \quad (4)$$

式(4)中, $\sigma_i(\lambda)/(\rho_i V_i)$ 定义为无机颗粒物的散射截面 $\sigma_{\text{PIM}}(\lambda)$;与此类似,有机颗粒物的散射系数 $b_{\text{POM}}(\lambda)$ 也可以表示成散射截面 $\sigma_{\text{POM}}(\lambda)$ 与有机颗粒物浓度 POM 之积。则水体中悬浮颗粒物的散射光谱可以描述为以颗粒物浓度与颗粒物散射截面的函数

$$b_p(\lambda) = \sigma_{\text{PIM}}(\lambda)\text{PIM} + \sigma_{\text{POM}}(\lambda)\text{POM} \quad (5)$$

2.2 分解方法

悬浮颗粒物散射光谱分解的关键,在于通过观测获取的 $b_p(\lambda)$, PIM 和 POM, 实现对式(5)中水体无机悬浮颗粒物与有机悬浮颗粒物对应的散射截面的二元估计值。最普遍的二元线性参数估计是采用最小二乘法,但是 OLS 方法仅适用于符合基本假设的情况,即因变量 $b_p(\lambda)$ 的误差符合正态分布且误差大小与自变量 PIM 和 POM 独立^[12,17]。对于水体光学观测数据,由于野外观测条件的限制,采样获取的颗粒物浓度及总散射系数往往不能严格符合 OLS 线性回归理论的基本假设,因此本研究建立一个二元线性模型参数估计的简单归一化主轴模型(RMA)对散射光谱进行分解,并与 OLS 分解结果进行对比。首先依次对每个波段的自变量 PIM, POM 及因变量 b_p 进行归一化处理

$$\text{PIM}'_i = \frac{\text{PIM}_i - \text{PIM}_{\min}}{\text{PIM}_{\max} - \text{PIM}_{\min}} \quad (6a)$$

$$\text{POM}'_i = \frac{\text{POM}_i - \text{POM}_{\min}}{\text{POM}_{\max} - \text{POM}_{\min}} \quad (6b)$$

$$b'_{pi} = \frac{b_{pi} - b_{p\min}}{b_{p\max} - b_{p\min}} \quad (6c)$$

其次,对变量 $[b_p, \text{PIM}, \text{POM}]$ 的相关矩阵 $\mathbf{R} =$

$$\begin{bmatrix} 1 & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & 1 & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & 1 \end{bmatrix}$$

求解特征值及特征向量,最大特征值对应的特征矢量 $a_{\max} = [a_{m1} \ a_{m2} \ a_{m3}]^T$ 即为数据三维空间椭球对应长轴的方向,由此可以得到因变量的 RMA 估计值为

$$b'_p = -\frac{a_{m2}}{a_{m1}} PIM' - \left(\frac{a_{m3}}{a_{m1}}\right) POM' \quad (7)$$

对应无机颗粒物与有机颗粒物的散射截面为

$$\sigma'_{PIM}(\lambda) = -\left(\frac{a_{m2}}{a_{m1}}(\lambda)\right) \left(\frac{b_{pmax} - b_{pmin}}{PIM_{max} - PIM_{min}}\right) \quad (8)$$

$$\sigma'_{POM}(\lambda) = -\left(\frac{a_{m3}}{a_{m1}}(\lambda)\right) \left(\frac{b_{pmax} - b_{pmin}}{POM_{max} - POM_{min}}\right) \quad (9)$$

3 实验与分析

3.1 散射截面分解结果

鄱阳湖水体悬浮颗粒物浓度及总悬浮颗粒物散射系数概况见表1。本次观测的有效站点主要集中在鄱阳湖星子水文站以南湖区,总悬浮颗粒物浓度在 $5\sim 72\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间变化,悬浮颗粒物总散射系数也呈现较大的动态变化,总散射系数 $b_p(555)$ 在 $9.59\sim 34.32\text{ m}^{-1}$ 之间变化。与国外类似研究选取的区域水体悬浮颗粒物浓度(最大值 $=38\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)相比^[6, 8-10],鄱阳湖水体悬浮颗粒物浓度明显较高。

Table 1 Concentrations of suspended particles and particulate scattering coefficient at 555 nm

	最大值	最小值	均值	标准差	CV(%)*
TSM/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	72	5	23.87	18.44	77
PIM/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	66.51	2.66	18.4	15.02	82
POM/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	10.06	0.59	3.47	2.16	66
POM/PIM	0.59	0.06	0.24	0.15	63
$b_p(555)/\text{m}^{-1}$	34.32	9.59	17.32	6.54	37
Chla/($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	10.51	1.33	4.1	2.4	59

* CV=标准差/均值

采用OLS线性回归与RMA方法估计得到的无机颗粒物与有机颗粒物散射截面如图2所示。85个波段OLS线性回归模型的决定系数 R^2 在 $0.67\sim 0.72$ 之间变化,回归方程通过显著性水平 $p<0.005$ 的 F 检验。对单个回归参数进行显著性检验后发现,无机颗粒物散射截面的回归系数显著,但有机颗粒物散射截面估计值未通过显著性水平 $\alpha<0.05$ 的双边 t 检验。

在整个观测波长范围内,RMA方法获得的无机颗粒物与有机悬浮颗粒物的散射截面均位于OLS回归估值的一倍方差范围内。RMA方法估算获取的无机颗粒物散射截面 σ_{PIM_R} 略高于OLS方法,但二者相差不大, $400\sim 750\text{ nm}$ 波段范围内相对误差在 $7.9\%\sim 10.1\%$ 之间(见图2a)。而对于有机颗粒物散射截面,除 400 nm 波长附近外,RMA回归模型获取的散射截面 σ_{POM_R} 小于OLS模型结果 σ_{POM_L} ,其光谱曲线相对于OLS获取的光谱曲线略为平缓[见图2(b)]。随着波长的增加, σ_{POM_R} 逐渐偏离 σ_{POM_L} 。波长越大,二者相差越大,相对误差最大可达 30% 。与其他研究略有不同,鄱阳湖有机颗粒散射截面 σ_{POM_R} 光谱曲线呈现明显的非藻类颗粒物散射光谱特征,即除 700 nm 附近出现微弱峰值外,随着波长的增加有机颗粒物散射截面指数衰减,对比鄱阳湖水体叶绿素含量可以看到,本次观测全部站点叶绿素浓度低

于 $15\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,说明鄱阳湖水体中非藻类有机颗粒物对总有机颗粒物的散射光谱起决定作用。

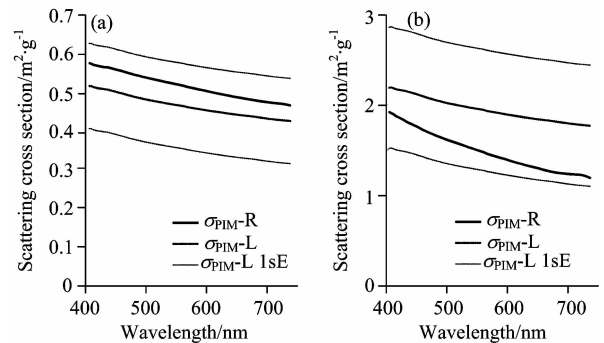


Fig. 2 Spectral scattering cross sections retrieved by OLS and RMA methods

(a): Spectral scattering cross section of inorganic particles σ_{PIM} ;

(b): Spectral scattering cross section of organic particles σ_{POM}

将本研究与国内外其他学者报道的无机颗粒物散射截面相比,鄱阳湖水体无机颗粒物散射截面 $\sigma_{PIM}(555)=0.52\text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ 在目前已报道无机颗粒物散射截面动态范围($0.14\sim 1.57\text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$)内^[18, 19],结合无机颗粒物散射截面斜率与Mie散射理论计算值($\sigma_{PIM}(555)=0.57\text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$,粒径分布荣格谱系数 $J=4$,复折射率实部 $n=1.18$)^[5],鄱阳湖南部水域无机颗粒物散射特性表现与伊利石/蒙脱石等高折射率颗粒物相似,与鄱阳湖沉积物理化分析结果一致^[20, 21]。目前针对有机颗粒物散射截面的报道不多,本研究分解获取的 $\sigma_{POM}(555)=1.54\text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ 接近Stavn报道的海岸带水体有机颗粒物散射截面值($1.2\sim 2.6\text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$),从Snyder以及Stavn等的报道来看,采用OLS方法进行有机颗粒物散射截面估算时,对于有机颗粒物浓度与总颗粒物浓度相关不高的水体,其估算结果往往容易出现负值或存在较大不确定性^[10]。本研究中也发现类似问题,即鄱阳湖总颗粒物散射系数TSM与无机颗粒物浓度PIM在 $400\sim 750\text{ nm}$ 波长范围内线性相关,但与有机颗粒物浓度相关关系不显著,从而导致OLS有机颗粒物散射截面估值非显著。可见在浑浊水体,尤其是悬浮泥沙(无机颗粒物)占主导地位的水体,OLS方法存在较大偏差,而RMA方法则可以有效的改善估计量出现的不确定性问题。

3.2 误差分析

由于散射系数与颗粒物浓度动态范围相对较大,采用平均相对误差绝对值(MAPE)对重构的总悬浮颗粒物散射系数进行精度分析。

$$MAPE = \frac{1}{N} \left(\sum \left| \frac{\text{观测值} - \text{模拟值}}{\text{观测值}} \right| \right) \quad (10)$$

从OLSS与RMA模型预测结果的精度评价表(表3)可以看到,在 $440, 532, 555$ 和 676 nm 等水体悬浮颗粒物的主要贡献波段RMA都有较好的分解效果,模拟效果优于OLS模型。图3给出了RMA模型与OLS模型4个代表性波段总悬浮颗粒物散射系数模型预测值与实测值的比较,可以看出RMA模型各波段的观测值与模拟值散点图相较于OLS模型

更接近 1:1 比例线, 尤其是在 676 nm 波长处 RMA 模型的优势尤为明显。值得注意的是, 除 676 nm 波长外, RMA 模型在总悬浮物浓度较低的站点表现出比 OLS 模型相对较大的误差, 对于总颗粒物含量 $TSM < 15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的站点, RMA 模型 555 nm 波长模拟结果 MAPE 最大达到 68.9%, 最小为 21.7%, 对应 OLS 模型最大最小相对误差分别为 63.5% 和 12.3%。而对于 $TSM > 15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的站点, RMA 模型各波段的平均相对误差均小于 15%, 优于 OLS 模型结果, 无论从颗粒物浓度, 还是颗粒物散射光谱的贡献来说, 这些站点无机颗粒物都占据了主导地位, RMA 模型在高浓度站点模拟精度方面的显著提高主要是由于在这些站点 OLS 模型对无机颗粒物散射截面的低估导致。

采用 RMA 分解的另一个主要优势在于, 在进行参数估计时, 由于 RMA 选取的主轴方向代表了大部分数据站点的悬浮颗粒物散射光谱特征, 在整体上能更真实反映鄱阳湖主湖区悬浮颗粒物散射光谱特性, 从而获得较高的预测精度。尽管 OLS 模型与 RMA 模型采用了不同的参数估计方法, 但是在散射系数分解模型上, 都是采用了分解所获取的颗粒物截面表征了整个研究区域颗粒物的平均水平的假设^[21]。从观测站点的空间分布可以看到, 总颗粒物含量 $< 15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的站点, 多位于波阳县附近饶河入湖口, 其总颗粒物的来源

与主湖区站点之间存在差异, 导致 RMA 模型预测获取的颗粒物散射截面在一定程度上不能代表 $TSM < 15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 站点的颗粒物光谱特征, 从而造成这些站点的总颗粒物散射光谱出现分解误差。

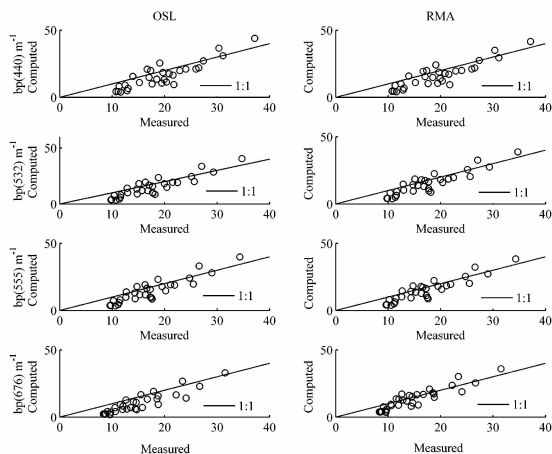


Fig. 3 Comparison of particulate scattering coefficients reconstructed by OLS and RMA with the measured scattering coefficients at the wavelengths of 440, 532, 555 and 676 nm

Table 2 The comparison of the coefficients and predict errors derived by OLS and RMA

Wavelength/nm	OLS			RMA		
	$\sigma_{\text{PM}}(555)$ / $(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$	$\sigma_{\text{POM}}(555)$ / $(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$	MAPE /%	$\sigma_{\text{PM}}(555)$ / $(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$	$\sigma_{\text{POM}}(555)$ / $(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$	MAPE /%
440	0.505	2.137	30	0.563	1.792	24.8
532	0.472	1.974	28.8	0.526	1.538	23.6
555	0.467	1.953	28.6	0.52	1.497	23.2
676	0.437	1.816	39.8	0.48	1.254	21.5

4 结论

在分析鄱阳湖悬浮颗粒物浓度及其散射光谱空间变化规律的基础上, 采用 RMA 方法对鄱阳湖水体中悬浮无机颗粒物与有机颗粒物的散射光谱进行提取。通过与当前常用的最小二乘分解方法进行的比较验证, 结果表明 RMA 颗粒物散射光谱分解模型在鄱阳湖具有较好的分离效果, 尤其对于悬

浮颗粒物浓度大于 $15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的水体, RMA 模型分解获取的散射光谱斜率与幅度均能更为真实地反映出鄱阳湖主湖区悬浮颗粒物散射光谱的特征。在后续研究中, 可以采用本研究提出的模型, 通过不同季节、不同区域的散射光谱分解分析, 估算高悬浮颗粒物浓度水体的散射光谱, 弥补高浑浊水体区域因散射光谱观测仪器限制导致的数据不足, 为进一步构建悬浮颗粒物浓度的遥感反演模型提供重要信息。

References

- [1] Bohren C F, Huffman D R. Absorption and Scattering of Light by Small Particles. New York: Wiley-Interscience, 1983.
- [2] Kirk J T O. Light & Photosynthesis in Aquatic Ecosystems. Cambridge: University Press, 1994.
- [3] Doxaran D, Ruddick K, McKee D, et al. Limnology and Oceanography, 2009, 54(4): 1257.
- [4] MA Rong-hua, TANG Jun-wu, DUAN Hong-tao, et al(马荣华, 唐军武, 段洪涛, 等). Journal of Lake Sciences(湖泊科学), 2009, 21(2): 143.
- [5] Babin M, Morel A, Fournier-Sicre V, Fell F, et al. Limnology and Oceanography, 2003, 48(2): 843.
- [6] Twardowski M S, Macdonald J B, Pegau W S, et al. Journal of Geographical Research, 2001, 106: 14129.
- [7] ZHOU Guan-hua, TIAN Guo-liang, CHEN Jun, et al(周冠华, 田国良, 陈军, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2010, 30(2): 470.

- [8] Wozniak S B and Stramski D. *Applied Optics*, 2004, 43(17): 3489.
- [9] Snyder W A, Arnone R A, Davis C O, et al. *Applied Optics*, 2008, 47(5): 666.
- [10] Stavn R H, Richter S J. *Applied Optics*, 2008, 47(14): 2660.
- [11] Sun D Y, Li Y, Wang Q, et al. *Hydrobiologia*, 2010, 64: 337.
- [12] Laws E A, Archic J W. *Marine Biology*, 1981, 65: 13.
- [13] Cui L J, Wu G F, Liu Y L. *Hydrological Processes*, 2009, 23: 342.
- [14] Pegau W S, Cleveland J S, Doss W, et al. *Journal of Geographical Research*, 1995, 100: 13201.
- [15] Sullivan J M, Twardowski M S, Zaneveld J R, et al. *Applied Optics*, 2006, 45(21): 5294.
- [16] Gordon H R, Du T. *Limnology and Oceanography*, 2001, 46: 1438.
- [17] Johnson R A, Wichern D W. *Applied Multivariate Statistical Analysis(实用多元统计分析)*. 6th ed. Prentice Hall, 2007.
- [18] Bowers D G, Binding C E. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2006, 67: 219.
- [19] Stramski D, Wozniak S, Flatau P J. *Journal of Geographical Research* 2004, 49: 749.
- [20] MENG Fan-de, JIANG Xia, JIN Xiang-can(孟凡德, 姜霞, 金相灿). *Research of Environmental Sciences(环境科学)*, 2004, 25: 17(z1).
- [21] Bowers D G, Braithwaite K M, Nimmo-Smith W A M, et al. *Continental Shelf Research*, 2009, 29(14): 1748.

Partitioning of the Suspended Particulate Spectral Scattering Coefficient in Poyang Lake

CHEN Li-qiong¹, CHEN Xiao-ling^{1, 2, 3}, TIAN Li-qiao^{1*}, QIU Feng¹

1. State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China
2. Key Laboratory of Poyang Lake Wetland and Watershed Research, Ministry of Education, Jiangxi Normal University, Nanchang 310022, China
3. The Key Laboratory of Poyang Lake Environment and Resource Utilization, Ministry of Education, Nanchang University, Nanchang 330022, China

Abstract A model for partitioning the particulate scattering coefficient into the contributions of suspended mineral particle and organic particle was proposed based on the measured data. The independent variables, i. e. the concentrations of mineral particles and organic particles in this study, were used to determine the mass-specific scattering cross section with the concurrent total suspended particulate scattering coefficients collected during the field trip in Poyang Lake 2009. Results show that the scattering spectra of inorganic particles and organic particles can be successful derived by the proposed model, and the reconstructed total particulate scattering coefficients are in better agreement with the measured values by the ordinary least square linear regression. For the whole South Poyang Lake, mean absolute percentage errors between the measured scattering coefficients and reconstructed value were less than 25% over the main remote sensing effective wavebands such as 440, 532, 555 and 676 nm. A remarkable lower predicted error, which can be controlled within 15%, were found at all stations with higher concentration of total suspended matters, while the spectral partitioning is less efficient at stations with total suspended particle concentration less than 15 mg · L⁻¹. Particulate scattering spectrum retrieved by RMA shows that illite and montmorillonite are the major constituents of inorganic matters which dominate the light scattering properties of Poyang Lake. It is possible that scattering spectrum partitioned by the model could infer the major effective components in waters, and could be used to predict particulate scattering properties for highly turbid waters.

Keywords Scattering; Water color remote sensing; Spectrum partition; Poyang lake

(Received May 23, 2011; accepted Oct. 2, 2011)

* Corresponding author