

# 太湖秋季水体体散射和散射相函数特征\*

黄昌春 李云梅<sup>①</sup> 孙德勇 乐成峰

(南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室 南京 210046)

**提要** 利用 Fournier and Forand (FF)体散射函数近似计算方法模拟太湖水体的体散射函数以及散射相函数,进而分析太湖水体体散射函数和散射相函数的特性,以及与波段、深度之间的变化关系,空间分布差异。研究表明,太湖水体体散射函数表现为具有极强前向散射特性的大颗粒物散射特征,体散射函数随波段变化的差异性主要体现在后向方向上,散射相函数的变化规律与体散射函数较为相似;而随着深度的变化体散射函数几乎没有变化,但散射相函数表现出了较为明显的层状特征;体散射函数和散射相函数在空间上表现出了较大的差异性,这种差异性随着散射角的增大而不断地加强。

**关键词** 体散射函数, 散射相函数, 散射系数

**中图分类号** P731

在给定入射太阳光场的情况下,光线在水体中的传输模型可以表示为水体吸收系数( $a$ )、散射系数( $b$ )和体散射函数( $\beta(\theta)$ )或散射相函数  $P(\theta)$ 的函数关系。表征散射特性的体散射函数的形状在大多数自然水体中几乎是相似的(Kirk, 1991),而散射相函数则由于不同水体组分的差异表现出极大的差异性,并决定了水体后向散射的差异。目前,许多学者对水体体散射函数及散射相函数的计算方法进行了研究, Petzold(1972)在 San Diego 海港研究了从外海清洁水体到近海岸水体再到混浊水体的  $\beta(\theta)$ 的近似计算方法,并给出了相关的体散射函数测量数据; Kirk(1981, 1984)运用后向散射系数与散射系数的比值  $b_{bp}/b_p$ , 通过蒙特卡罗方法模拟了  $\beta(\theta)$ ; Haltrin (1998)对 Fournier and Forand(FF)体散射函数近似计算方法进行了分析,认为该方法符合辐射传输模型中体散射函数的假设。体散射函数的研究被大量地应用于辐射传输以及对水下光场分布和水体反射率二向性(Mobley *et al*, 2002; Chami *et al*, 2001)。然而,由于体散射函数和散射相函数的区域性差异研究较少,导致辐射传输模型应用的区域化受到了很大的限制。本文对 2006 年

10—11 月太湖实测数据,利用体散射函数近似计算方法模拟太湖水体体散射函数以及散射相函数,并分析了体散射函数和散射相函数随波段、深度和湖区的变化特征,研究成果有助于深入理解太湖水体辐射传输机理,为准确分解水表面反射光谱的影响因素提供理论依据。

## 1 方法和材料

### 1.1 采样时间与点位

2006 年 10 月 24 日—2006 年 11 月 4 日对太湖 44 个样点(其中 2、24、25、40、42、43、44 样点数据异常不可用)进行了观测,样点分布如图 1 所示,测量的参数包括水体中颗粒物吸收系数、散射系数、颗粒物后向散射系数。测量深度设置为 0.60、0.90、1.2 和 1.5 m。

### 1.2 参数的获取

**1.2.1 散射系数的测量** 水体颗粒物散射系数通过 Wetlabs 公司的光谱吸收和衰减仪(AC-S)获得(Moore *et al*, 2004; Diehl *et al*, 1980), AC-S 在可见光波段范围共有 85 个光谱通道,光谱分辨率为 4 nm,

\* 国家自然科学基金项目, 41201325 号、41271343 号、41030751 号; 南京师范大学科研启动基金项目, 2011105XGQ0244 号; 江苏省高校自然科学基金项目, 12KJB170005 号。黄昌春, E-mail: huangchangchun\_aaa@163.com

通讯作者: 李云梅, 教授, E-mail: liyunmei@njnu.edu.cn

收稿日期: 2009-10-15, 收修改稿日期: 2012-06-10

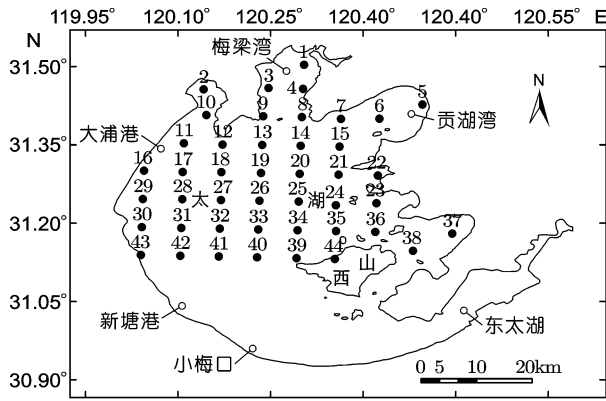


图 1 样点分布

Fig.1 Sampling locations

测量精度为  $0.01 \text{ m}^{-1}$ , 试验之前, 对仪器进行空气和纯水校准, 校准时每次获得的数值偏差在仪器出厂的要求范围  $\pm 0.005 \text{ m}^{-1}$  之内。由 AC-S 直接获得水体吸收系数  $a(\lambda)$  和衰减系数  $c(\lambda)$ , 为了得到更精确的吸收系数数据, 需对吸收系数作温度、盐度和散射纠正 (由于测量水体是淡水湖泊, 盐度纠正可忽略), 纠正公式如式(1)、(2):

$$a_{\text{mts}}(\lambda) = a_{\text{m}}(\lambda) - [\Psi_t(t - t_r) + \Psi_s(s - s_r)] \quad (1)$$

$$a_t(\lambda) - a_w(\lambda) = a_{\text{mts}}(\lambda) - a_{\text{mts}}(\lambda_{\text{ref}}) \quad (2)$$

式中,  $a_{\text{m}}$  是测量的吸收系数,  $a_{\text{mts}}(\lambda)$  代表了水体总吸收值减去光学纯水的吸收值;  $\Psi_t$ 、 $\Psi_s$  分别是温度和盐度纠正系数;  $t$ 、 $s$  分别是野外实测温度和盐度;  $t_r$ 、 $s_r$  分别是纠正的参考温度和盐度;  $a_{\text{mts}}$  是温度和盐度纠正后吸收系数;  $a_t(\lambda)$  是水体总吸收系数;  $a_w(\lambda)$  是纯水吸收系数;  $\lambda_{\text{ref}}$  是散射纠正的参考波长, 设为 715 nm。对衰减系数作同样的纠正。

纠正后的吸收和衰减系数是水体中颗粒物和黄色物质(CDOM)共同作用的结果, 假设 CDOM 的散射较微弱而被忽略(Mobley, 1994; Pegau *et al.*, 1997; 徐希孺, 2005), 所以可以通过衰减系数和吸收系数之差求出水体中颗粒物的散射系数, 如式(3)—(5)所述:

$$c_{\text{m}}(\lambda)^* = c_{\text{p}}(\lambda) + c_{\text{g}}(\lambda) \quad (3)$$

$$a_{\text{m}}(\lambda)^* = a_{\text{p}}(\lambda) + a_{\text{g}}(\lambda) \quad (4)$$

$$b_{\text{p}}(\lambda) = c_{\text{m}}(\lambda)^* - a_{\text{m}}(\lambda)^* \quad (5)$$

式中,  $c_{\text{m}}(\lambda)^*$ 、 $a_{\text{m}}(\lambda)^*$  分别是纠正后的衰减和吸收系数;  $c_{\text{p}}(\lambda)$ 、 $a_{\text{p}}(\lambda)$  分别是水中颗粒物的衰减和吸收系数;  $c_{\text{g}}(\lambda)$ 、 $a_{\text{g}}(\lambda)$  分别是黄质的衰减和吸收系数;  $b_{\text{p}}(\lambda)$  是水中颗粒物散射系数。

水体中颗粒物后向散射系数通过 Wetlabs 公司的散射仪(BB9)获得(Boss *et al.*, 2001a; Zanveld *et al.*, 1980; 1994), BB9 共有 9 个光谱通道, 分别是 400、

440、488、510、532、595、660、676 和 715 nm, 测量精度为  $0.005 \text{ m}^{-1}$ 。其中由散射引起的后向散射损失部分, 使用 Scale factor (由 Wetlabs 公司提供) 进行纠正, 得到水体总体散射函数; 最后对总体散射函数进行吸收纠正, 如式(6):

$$\beta(\lambda) = \beta(\lambda)^* \exp(0.0391a) \quad (6)$$

式中,  $\beta(\lambda)$  是吸收纠正后的总体散射函数;  $\beta(\lambda)^*$  是吸收纠正前的总体散射函数;  $a$  是相应波段的吸收系数。由纠正后得到的总体散射函数, 减掉纯水的体散射函数 (Morel, 1974), 获得颗粒物的体散射函数  $\beta_{\text{p}}(\lambda)$ ; 根据公式(7)得到颗粒物后向散射系数  $b_{\text{bp}}(\lambda)$ , 相应误差为 4% (Boss *et al.*, 2001a)。

$$b_{\text{bp}}(\lambda) = 2\pi X \beta_{\text{p}}(\lambda) \quad (X=1.1) \quad (7)$$

**1.2.2 CDOM 吸收系数和颗粒物粒径的测量** 使用  $0.22 \mu\text{m}$  的 Millipore 滤膜过滤 100 ml 水样, 提取出 CDOM, 然后, 将 CDOM 溶液装入  $1 \times 4 \text{ cm}$  的比色皿, 以 Milli-Q 水作为参考水样, 利用 UV-240IPC 型紫外-可见光分光光度计测量 CDOM 的吸光度, CDOM 光谱吸收系数计算公式:

$$a(\lambda') = 2.303D(\lambda)/r \quad (8)$$

计算各个波长的吸收系数, 再利用公式:

$$a(\lambda) = a(\lambda') - a(750)\lambda/750 \quad (9)$$

进行散射作用校正, 其中  $a(\lambda)$  为波长  $\lambda$  的吸收系数 ( $\text{m}^{-1}$ ),  $a(\lambda')$  为波长  $\lambda'$  未校正的吸收系数 ( $\text{m}^{-1}$ ),  $D(\lambda)$  为吸光度,  $r$  为光程路径 (m)。

颗粒物粒径是利用 mastersize2000 激光粒度分析仪进行测量, 该参数测量系委托南京师范大学地理科学学院滩涂研究所测量。

## 2 体散射函数和散射相函数的计算

### 2.1 体散射函数的计算

体散射函数 ( $\text{m}^{-1}\text{sr}^{-1}$ ) 定义为:

$$\beta(\theta) = \frac{dI(\theta)}{E d\omega} \quad (10)$$

式中  $I(\theta)$  为辐射强度,  $\omega$  为立体角,  $E$  为辐射通量密度。此理论定义公式是难以用于实际计算的。Fournier and Forand (FF) 体散射函数近似计算方法是由 OOC (ocean optics community) 1994 年推荐的, 但是由于其初期计算方法较为复杂, 且没有相关属性分析, 因而并没有得到广泛的注意。但由于其自身的优势: (1) FF 体散射函数近似计算是基于 Mie 的物理模型, 具有可推广性; (2) 它所计算的体散射函数与辐射传输模型模拟的值相符 (Chami, 2006a,b); (3) 著名的水体辐射传输模拟软件 hydrolight (Mobley *et al.*, 2000a,b) 也选

用了该模型,因而本文将使用该方法进行体散射函数的模拟计算。

## 2.2 FF 体散射函数

FF 函数是基于单个粒子的精确 Mie 理论计算,进而计算粒径具有双曲线分布形式的颗粒物的体散射函数,其最新的简要形式为(Fournier *et al.*,1994,1999; Mobley *et al.*,2002):

$$\beta_{FF}(\theta) = \frac{1}{4\pi(1-\delta)^2\delta^v} [v(1-\delta) - (1-\delta^v) + [\delta(1-\delta^v) - v(1-\delta)]\sin^{-2}\left(\frac{\theta}{2}\right)] + \frac{1-\delta_{180}^v}{16\pi(\delta_{180}-1)\delta_{180}^v} (3\cos^2(\theta)-1) \quad (11)$$

式中,  $v = \frac{3-\xi}{2}$ ,  $\delta = \frac{4}{3(n-1)^2} \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right)$ ,  $\xi$  为粒径剖面系数,  $n$  为折射指数实部,  $\delta_{180}$  为  $\theta 180^\circ$  时  $\delta$  (Mobley *et al.*,2002)。其中,  $\xi$  和  $n$  分别通过(13)式和(14)式进行计算。

颗粒物衰减系数(总衰减系数减去纯水和 CDOM 的吸收系数)随波长的增加呈指数递减形式(Boss,2001):

$$c_p(\lambda) = A_c \lambda^\gamma \quad (12)$$

其中  $c_p$  为颗粒物衰减系数,  $A_c$  为回归常数,利用  $c_p$  与波长  $\lambda$  进行指数回归得到其衰减指数  $\gamma$ 。

Haardt(1980)根据 Hulst(1957)的 Mie 理论的近似计算方法验证了粒径剖面系数  $\xi$  与  $\gamma$  具有如式(13)的线性经验关系:

$$\xi = 3 - \gamma \quad (13)$$

根据上述计算出来的  $b_{bp}/b_p$  和  $\xi$  计算折射指数,当  $0 < b_{bp}/b_p < 0.03$  和  $2.5 < \xi < 4.5$  时,可以利用如下经验模型公式计算(Twardowski *et al.*,2001; Sulliva *et al.*,2004):

$$n(b_{bp}/b_p, \xi) = 1 + (b_{bp}/b_p)^{(0.5377+0.4867(\xi-3)^2)} \times [1.4676 + 2.295(\xi-3)^2 + 2.3113(\xi-3)^4] \quad (14)$$

根据 FF 体散射函数近似计算方法,体散射函数主要受三个因素的影响,即后向散射系数与散射系数的比值  $b_{bp}/b_p$ , 粒径的分布即粒径剖面系数  $\xi$ , 折射指数  $n$ 。参数计算分别参照 Boss(2001b)、Twardowski 等(2001)、Sulliva 等(2004)。

## 2.3 散射相函数的计算

散射相函数( $sr^{-1}$ )定义为(Mobley,1994 徐希孺,2005):

$$P(\theta) = \frac{\beta(\theta)}{b_p} \quad (15)$$

利用体散射函数除以颗粒物散射系数得到散射

相函数。

## 3 结果与分析

利用上述计算方法模拟太湖水体体散射函数,并进一步模拟散射相函数,分析太湖水体体散射函数和散射相函数的变化规律和空间差异。(1)利用单个样点数据说明散射相函数随波段的变化规律;(2)计算各个深度的散射相函数,分析散射相函数的垂直分布规律;(3)分析 0.6 m 深度散射相函数的空间分布规律。

模拟得到的体散射函数随着  $b_{bp}/b_p$  的增加,即随着后向散射概率的增加,光线的前向散射不断的减弱,后向散射不断的增强,从而使得体散射函数随散射角分布趋向于均匀,只在  $90^\circ$  附近有所起伏,散射类型由 Mie 散射逐渐向瑞利散射过程过度;而粒径剖面系数的变化具有一定的复杂性,随着散射角度的增大,该角度上的散射强度随粒径剖面系数的增大先减小,当角度大于  $20^\circ$  后,随粒径剖面系数的增大而增大。

### 3.1 体散射函数和散射相函数随波段的变化规律

由散射理论可知,当颗粒物直径比波长小得多时发生瑞利散射,前向散射和后向散射相等;当颗粒物直径与波长相当时发生 Mie 散射,散射光线的前向散射要强于后向散射。因此,随着波长的变化,即使是同一水层同一物质,不同波段也会出现不同的体散射函数和散射相函数。图 2a,b 是同一样点(1 号样点)在不同波段的体散射和散射相函数,从图 2a,b 中看到:最上面的一条曲线是 440 nm,其次是 488 nm,接着是 510 nm,400 nm 和 532 nm 几乎重合,最后分别是 595、660、676、715 nm。由于后向散射系数和散射系数分别是体散射函数在  $90^\circ-180^\circ$  和  $0^\circ-180^\circ$  范围内的积分值,因此后向散射率可以看成体散射函数曲线与散射角坐标在  $90^\circ-180^\circ$  范围的面积与  $0^\circ-180^\circ$  范围内面积的比值,这可以说明该水层颗粒物后向散射率以 440 nm 为最大值,其次是 488 nm,其他波段后向散射率随波长逐渐递减,400 nm 和 532 nm 后向散射率接近;散射相函数的变化趋势是与体散射函数相类似的,但是从图 2b 中可以明显看出,不同波长的散射相函数值差异相对较大,从散射的离散程度上看,散射相函数在大于  $10^\circ$  的方向上要比体散射函数小得多,散射相函数大致集中在三个程度,即:以 440 nm 为代表的 440 nm,488 nm,510 nm,532 nm 为最上面的曲线,以 400 nm 为代表的 400 nm,595

nm 形成中间层, 以 660 nm 为代表的 660 nm, 676 nm, 715 nm 为最下层; 在前向小于 10° 的方向上, 散射相函数的离散程度明显要高于体散射函数。可以看出 10° 是体散射函数和散射相函数随散射角度变化的转折点, 在 10° 附近体散射函数和散射相函数波不随波段的变化而变化。

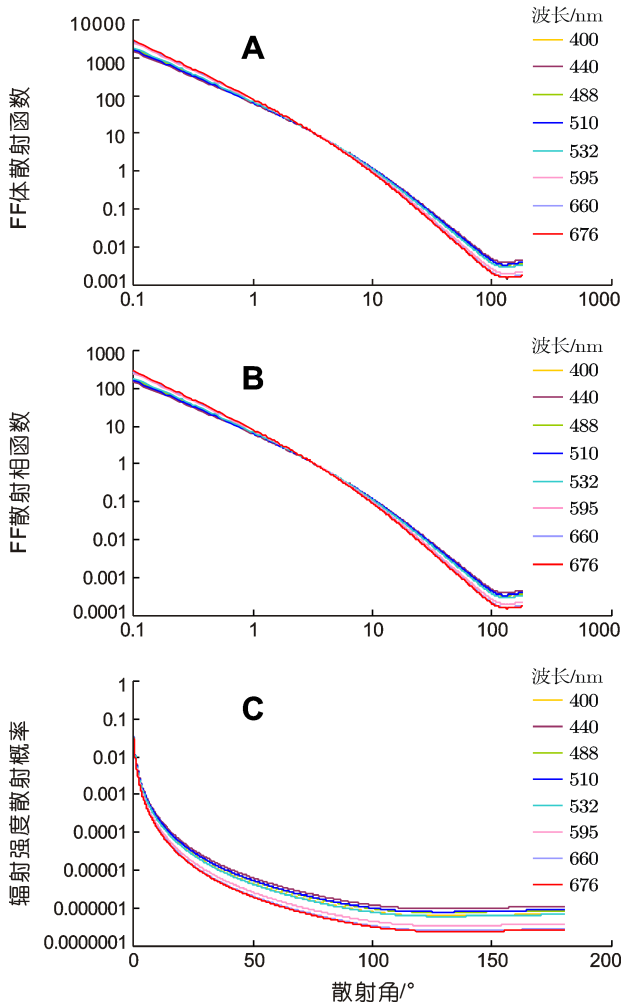


图 2 不同波段的体散射函数(A)、散射相函数(B) 以及不同波段散射强度随散射角度变化的概率分布(C)

Fig.2 The volume scattering function for different wave bands (A), the scattering phase function for different wave bands (B), and the probability distribution of scattering intensity with change of scattering angle for different wave bands (C)

利用各个角度上分布的散射强度值除以 0°—180° 角度上分布的散射强度总和, 得到散射强度随散射角的分布概率, 如图 2c 所示: 散射强度分布概率随着角度的增加迅速减小, 在 1° 的散射角内的散射强度占总辐射的 81.35%, 在前向上(0—90°) 辐射强度散射率占有的比例 99.93%, 说明太湖水体中散射类型是以大颗粒物的前向散射占主要的地位, 不同波

长的散射强度分布概率随着角度的增加减小的速度具有一定的差别。由图 2c 中可以看出, 715 nm 波长减小的速度最大, 而 440 nm 波长相对最小, 其他波长减小速度介于 440 与 715 nm 之间, 这主要是由于折射系数随波长增加而不断减小形成的(Morel *et al.*, 1990)。

后向散射主要是由粒径小于 1 μm 大于 0.03 μm 的固体悬浮颗粒物引起的, 粒径大于 35 μm 对后向散射的贡献率一般要小于 1%, 而粒径小于 0.03 μm 对后向散射贡献率能够达到 6% (Risović, 2002)。由此可以认为粒径小于 35 μm 的颗粒物是后向散射的贡献者。太湖水体颗粒物粒径分布较为复杂, 以 15 号样点为例(图 3), 其颗粒物粒径主要分布在以 0.1 μm, 10 μm 和 1000 μm 为中心的区域, 50%左右的粒径分布在大于 35 μm 的区域。同时, 由图 3 可见, 太湖水体颗粒物粒径不但较为复杂而且粒径分布函数(PSD) 与双曲线分布具有一定的差异, 这使得传统的双曲线 PSD 模式在太湖应用具有一定的限制性, 因此, 在假设 PSD 符合双曲线分布条件下计算粒径剖面系数  $\xi$  进而计算折射指数和模拟体散射函数会存在一定的误差。悬浮颗粒物是太湖水体的重要组成部分, 其复杂的理化特性决定了太湖水体散射特性的复杂性。将所有样点计算得到的 510 nm (与 514 nm 接近) 的体散射函数平均值与 Petzold 提供的清洁海水、近岸水体、混浊水体以及纯海水和 Kopelevich 的大颗粒、小颗粒 514 nm 处的体散射函数相比较(图 4A), 太湖水体体散射函数与 Petzold 的混浊水体的体散射函数极其相似, 后向散射部分要大于 Kopelevich 的大颗粒体散射函数, 但小于小颗粒体散射函数; 前向散射远远高于小颗粒体散射函数, 说明本研究体散射函数模拟结果较为可靠, 有利于保证对其进行分析的准确性。

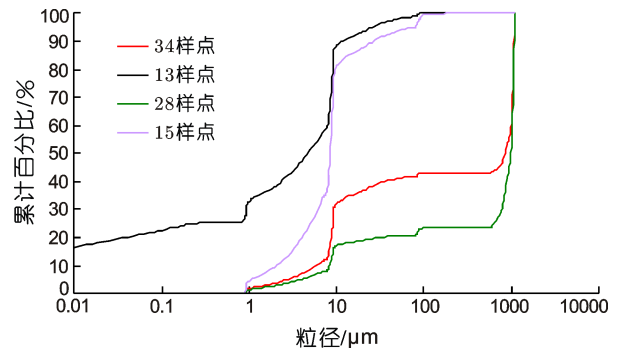


图 3 34 号, 13 号, 28 号和 15 号样点粒度体积百分比分布  
Fig.3 Percentage distribution of particle size for 34#, 13#, 28# and 15#

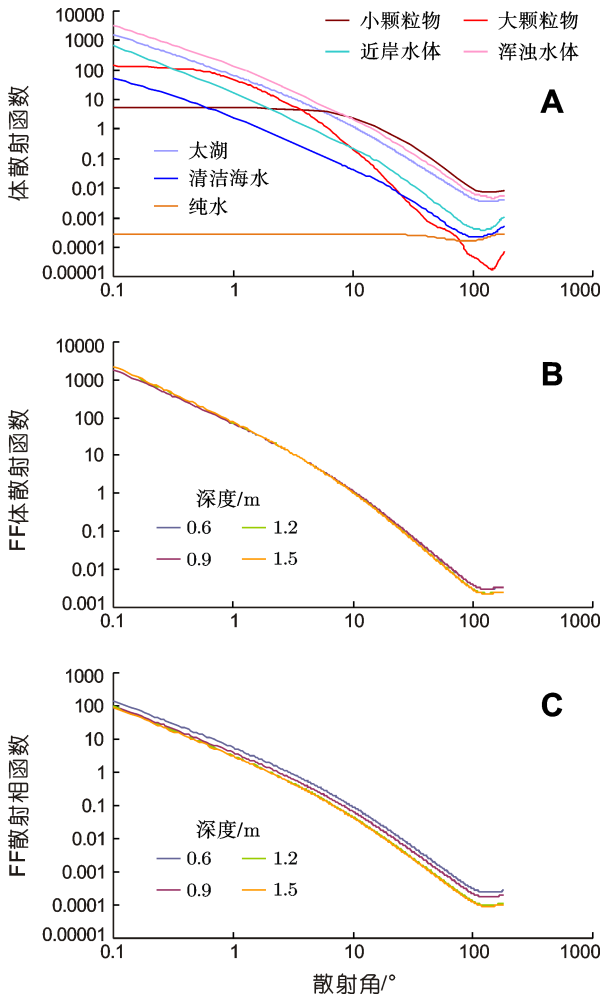


图4 本文模拟的太湖水体体散射函数与其他文献中体散射函数比较 (Mobley,2000a,b) (A)、不同深度的体散射函数 (B) 以及不同深度散射相函数随散射角度的变化(C)

Fig.4 Simulated scattering phase function of Taihu Lake versus existed scattering phase function in previous studies (Mobley, 2000a, b) (A), the volume scattering function for different depths (B), the scattering phase function for different depths (C)

3.2 体散射函数和散射相函数随深度的变化规律

体散射函数在 0.6 m、0.9 m、1.2 m、1.5 m 深度上随散射角的分布具有一定的层状特征, 如图 4B 所示, 0.6 m 和 0.9 m、1.2 m 和 1.5 m 分别具有相类似的体散射函数形状特征, 不同深度之间的体散射函数的差异性主要体现在后向上, 而前向的差异性较不明显。在不同深度处, 散射相函数随着深度的增加近似呈平行递减, 但是前向和后向平行距有一定的差别, 如图 4C 所示。散射相函数曲线由上到下分别是 0.6 m、0.9 m、1.2 m 和 1.5 m, 1.2 m 和 1.5 m 的散射相函数曲线几乎重合, 随着深度的增加, 颗粒物平均粒径不断增大, 使得后向散射率不断降低, 前向散射率不断加强, 1.2 m 和 1.5 m 的颗粒物水层较相似, 可

以作为同一水层考虑。

3.3 体散射函数和散射相函数的空间差异性

计算 37 个样点 0.6 m 深度处的体散射函数和散射相函数(折射指数为 9 个波段的平均值)在不同角度上的方差和标准差, 并将标准差除以不同角度上 37 个样点的平均值, 得到不同角度上归一化标准差(即统计上的变异系数), 如图 5 所示, 明显地看出空间样点在不同的散射角上体散射函数和散射相函数都有较大的差异, 且这种差异性随着散射角度的增大变得更加明显, 即后向差异性显著, 但是这种差异性在散射角 90°—180°范围内随散射角的增加表现的较为平缓; 前向差异性亦很明显, 且在 0.1°—45°散射角范围内是其变化的剧烈部分, 45°—90°变化相对于 0.1°—45°较为平缓; 同时体散射函数和散射相函数在前向角度上出现了变化拐点, 体散射函数拐点位置为 13°, 散射相函数拐点为 5°, 在拐点之前, 差异性随角度的增加而减小, 而在拐点之后, 差异性随散射角度的增加而增大。散射相函数的空间差异要明显大于体散射函数, 该现象与 morel 的结论“散射相函数差异性大于体散射函数”相一致。

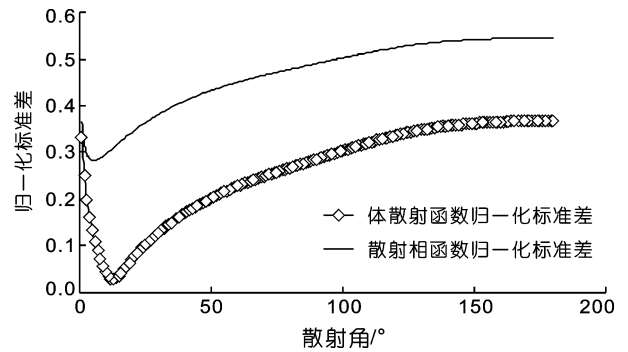


图5 归一化后的 37 个样点体散射函数和散射相函数差异  
Fig.5 The difference volume scattering and scattering phase function among the 37 samples

3.4 体散射函数的对称特征

根据 Morel 等的研究体散射函数具有一定的对称性, 但由于颗粒物和介质的差异性, 其内部形式具有一定的变异性和无规律性(Kullenserg,1968; Petzold,1972;Morel,1973;), 故将散射系数分为 4 个部分, 即将体散射函数分别在 0°—45°、45°—90°、90°—135°、135°—180°范围内积分, 分别得到  $b_{45^\circ}$ 、 $b_{90^\circ}$ 、 $b_{135^\circ}$ 、 $b_{180^\circ}$  散射系数, 用以讨论体散射函数对称特征, 计算公式为:

$$b_\theta = \sum_{\theta=45}^{\theta} \beta(\theta)0.1 \frac{\pi}{180} \tag{16}$$

式中 $\theta$ 分别为 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $135^\circ$ 、 $180^\circ$ ，求和间隔为 $0.1^\circ$ 。

计算得到的数据如图6所示:(为了在同一图中展现,将 $b_{45^\circ}$ 缩小1000倍)

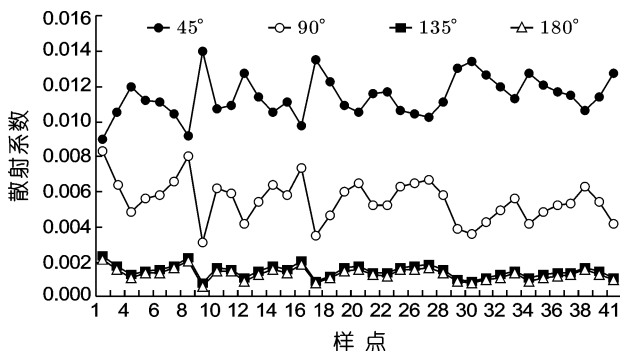


图6 37个样点 $b_{45^\circ}$ 、 $b_{90^\circ}$ 、 $b_{135^\circ}$ 、 $b_{180^\circ}$ 散射系数分布图(图例标目是: 角度/ $^\circ$ )

Fig.6 The distribution of  $b_{45^\circ}$ 、 $b_{90^\circ}$ 、 $b_{135^\circ}$ 、 $b_{180^\circ}$  scattering coefficient of the 37 samples

发现 $b_{135^\circ}$ 、 $b_{180^\circ}$ 具有相似的趋势和数值,但是37个样点表现出了较大的差异性,其归一化标准差分别为0.2472、0.2625; $b_{90^\circ}$ 与 $b_{135^\circ}$ 、 $b_{180^\circ}$ 的变化趋势具有一定的相似性, $b_{90^\circ}$ 归一化标准差为0.2142,然而 $b_{45^\circ}$ 表现出了与 $b_{90^\circ}$ 相反的变化趋势, $b_{45^\circ}$ 归一化标准差为0.1004,且 $\frac{b_{45^\circ}}{1000}$ 、 $b_{90^\circ}$ 表现出了一定的规律特性:

$$\frac{b_{45^\circ}}{1000} + b_{90^\circ} = c \quad (17)$$

其中C为接近0.01695的常数,最大值为0.01734,最小值为0.01688。

#### 4 结论

利用FF体散射近似计算方法模拟太湖水体的体散射函数,并且进一步计算其散射相函数,对体散射函数和散射相函数进行分析,得出以下结论:

(1) 湖水体体散射函数表现为具有极强前向散射特性的大颗粒物的散射特征。

(2) 体散射函数与散射相函数随波段的变化差异性主要体现在散射角大于 $90^\circ$ 的范围内。

(3) 度的变化体散射函数几乎没有变化,但散射相函数表现出了较大的层状特征。

(4) 湖水体特性具有较强的不一致性,辐射传输方程中的体散射函数或散射相函数的假设需要进行分区考虑,以减小辐射传输方程中假设带来的误差。

(5) 散射函数和散射相函数在空间上表现出了较大的差异性,在后向散射方向内,差异性随散射角

度的增加而增加,但增加速度不断减慢;在前向散射方向,差异性随散射角的变化出现了拐点,在拐点之前,差异性随角度的增加而减小,而在拐点之后,差异性随散射角度的增加而增大。

#### 参 考 文 献

- 徐希孺, 2005. 遥感物理. 北京: 北京大学出版社, 189
- Boss E, Pegau W S, Gardner W D *et al*, 2001a. Spectral particulate attenuation and particle size distribution in the bottom boundary layer of a continental shelf. *Journal of Geophysical Research*, 106(c5): 9509—9516
- Boss E, Pegau W S, 2001b. Relationship of light scattering at an angle in the backward direction to the backscattering coefficient. *Applied Optics*, 40(30): 5502—5507
- Chami M, David McKee, Leymarie E *et al*, 2006a. Influence of the angular shape of the volume-scattering function and multiple scattering on remote sensing reflectance. *Applied Optics*, 45(36): 9210—9220
- Chami M, Shybanov E B, Khomenko G A *et al*, 2006b. Spectral variation of the volume scattering function measured over the full range of scattering angles in a coastal environment. *Applied Optics*, 45(15): 3605—3619
- Chami M, Santer R, Dilligeard E, 2001. Radiative transfer model for the computation of radiance and polarization in an ocean-atmosphere system: polarization properties of suspended matter for remote sensing. *Applied Optics*, 45(15): 2398—2416
- Diehl P, Haardt H, 1980. Measurement of the spectral attenuation to support biological research in a “plankton tube” experiment. *Oceanol Acta*, 3: 89—96
- Fournier G, Forand J L, 1994. Analytic phase function for ocean water in *Ocean Optics XII*. *Proc SPIE*, 2558:194—201
- Fournier G, Jonasz M, 1999. Computer-based underwater imaging analysis, in *Airborne and In-water Underwater Imaging*. *Proc SPIE*, 3761: 62—77
- Haltrin V I, 1998. An analytic Fournier-Forand scattering phase function as an alternative to the Henyey-Greenstein phase function in hydrologic optics, Naval Research Laboratory. USA, Ocean Sciences Branch, Code 7331, Stennis Space Center, MS 39529—5004
- Hulst H C, 1957. *Light Scattering by Small Particles*. USA, New York: John Wiley & sons INC, 78—80
- Haardt H, 1980. Measurement of the spectral attenuation to support biological research in a “plankton tube” experiment. *Oceanol*, 3: 89—96
- Kirk J T O, 1991. Volume scattering function, average cosines, and the underwater light field. *Limnol Oceanogr*, 36(3): 455—467
- Kirk J T O, 1981. Monte Carlo study of the under water light field in, and the relationship between optical properties of

- turbid yellow waters. *Freshwater Res*, 32: 517—532
- Kirk J T O, 1984. Dependence of relationship between inherent and apparent optical properties of water on solar altitude. *Limnol Oceanogr*, 29: 350—356
- Kullenserg G, 1968. Scattering of light by Sargasso sea water. *Deep Sea Res*, 15: 423—432
- Moore C, Barnard A, Hankins D *et al*, 2004. Spectral Absorption and Attenuation Meter (ac-s) User's Guide, Revision A. America WET Labs Inc, 5—20
- Mobley C D, 1994. Light and water : radiative transfer in natural waters. USA, Academic Press Inc, 114
- Mobley C D, Sundman L K, 2000a. Hydrolight 4.1 Users' Guide Sequoia Scientific. Inc Redmond. Wash see also www.sequoiasci.com
- Mobley C D, Sundman L K, 2000b. Hydrolight 4.1 Technical Documentation. Sequoia Scientific, Inc Redmond. Wash8, USA, <http://www.sequoiasci.com/downloads/HE5TechDoc.pdf>
- Mobley C D, Boss E, 2002. Phase function effects on oceanic light fields. *Applied Optics*, 41(6):1035—1050
- Morel A, 1973. The scattering of light by seawater experimental results and theoretical approach. University Paris, 662
- Morel A, Ahn Y H, 1990. Optical efficiency factors of free-living marine bacteria: Influence of bacterioplankton upon the optical properties and particulate organic carbon in oceanic waters. *Journal of Marine Research*, 48: 145—175
- Morel A, 1974. Optical properties of pure water and pure seawater. In: Jerlov N G, Steeman E ed. *Optical Aspects of Oceanography*. Academic, chapter1, 1—19
- Petzold T J, 1972. Volume scattering function for selected ocean waters. Scripps Inst, Oceanogr, Ref: 72—78
- Pegau W S, Gray D, Zaneveld J R V, 1997. Absorption and attenuation of visible and near-infrared light in water: dependence on temperature and salinity. *Applied Optics*, 36(60): 1523—1535
- Risović D, 2002. Effect of suspended particulate-size distribution on the backscattering ratio in remote sensing of seawater. *Applied Optics*, 41(33): 7092—7101
- Sullivan J M, Twardowski M, Donaghay P L *et al*, 2004. Particulate bulk refractive index distributions in COASTAL regions as determined from backscattering ratio measurements. WET Labs Inc, Department of Research, 1—6
- Twardowski M, Boss E, Macdonald J B *et al*, 2001. A model for estimating bulk refractive index from the optical backscattering ratio and the implications for understanding particle composition in case I and case II waters. *Journal of Geophysical Research*, 106(C7): 14129—14142
- Zaneveld J R V, Bartz B, Kitchen J C, 1980. A reflective tube absorption meter. *Ocean Optics: X. SPIE*, 1302: 124—136
- Zaneveld J R V, Kitchen J C, Moore C, 1994. The scattering error correction of reflecting-tube absorption meters. *Ocean Optics: XII. SPIE*, 2258:44—55

## THE PROPERTIES OF VOLUME SCATTERING FUNCTION AND SCATTERING PHASE FUNCTION IN LAKE TAIHU IN AUTUMN

HUANG Chang-Chun, LI Yun-Mei, SUN De-Yong, LE Cheng-Feng

(Key Laboratory of Virtual Geographic Environment, Nanjing Normal University, Ministry of Education, Nanjing, 210046)

**Abstract** The approximate calculation method of Fournier and Forand (*FF*) volume scattering function was used to simulate the volume scattering function and scattering phase function in Lake Taihu. The properties, temporal and spatial variation of volume scattering function and scattering phase function were analyzed. The research indicated that the volume scattering function in Taihu Lake belonged to the big size particle, which had strong forward scattering property. The variations of volume scattering function for the wavelength were mainly in backward. The scattering phase function was similar with the volume scattering function. There was almost no change of volume scattering function with increasing of depth, but the scattering phase function showed significant stratified property. The spatial variations of volume scattering function and scattering phase function were significant, which will become more obvious with the increase of scattering angle.

**Key words** Volume scattering function, Scattering phase function, Scattering coefficient