

体散射函数测量技术定标方法研究进展

刘聪^{1,2}, 李彩^{1,3}

1. 中国科学院南海海洋研究所 热带海洋环境重点实验室, 广州 510300;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 南方海洋科学与工程广东省实验室, 广州 511458

摘要: 体散射函数描述了光被水体散射后的角度分布特性, 是海水固有光学特性之一, 在水色遥感、生物光学特性及海气交互过程研究等光学海洋学研究及应用领域具有十分重要的意义。基于其强方向性、大动态范围、后向散射微弱等特点, 体散射函数测量技术定标方法及应用研究至今仍在不断探索进步中。伴随体散射函数测量技术的发展, 相继出现了基于散射体及散射通量的定标方法、基于漫射体与传感器响应权重函数的定标方法以及基于标准物质与传感器响应权重函数的定标方法等3大类体散射函数定标方法。相较于基于散射体及散射通量的定标方法, 基于漫射体与传感器响应权重函数的定标方法可有效解决散射体估算难度大等问题, 但更适用于宽视场角的后向散射仪; 基于标准物质与传感器响应权重函数的定标方法极大简化了定标过程, 且不受散射角度范围的限制。可以预见, 上述3大类体散射函数定标方法的变通和组合方案是未来很长一段时间的主要定标方法, 而基于标准物质与传感器响应权重函数的定标方法将是未来体散射函数最有优势的定标方法。本文以水体体散射函数定标方法为主线, 归纳总结了国内外水体体散射函数定标、测量以及应用研究进展, 并对未来体散射函数定标方法的发展趋势进行展望。

关键词: 体散射函数, 定标方法, Mie 散射, 权重函数, 固有光学特性, 水色遥感

中图分类号: P2

引用格式: 刘聪, 李彩. 2023. 体散射函数测量技术定标方法研究进展. 遥感学报, 27(2): 285–298

Liu C and Li C. 2023. Research progress in the calibration method of the volume scattering function measurement technique. National Remote Sensing Bulletin, 27(2): 285–298 [DOI: 10.11834/jrs.20221491]

1 引言

水体体散射函数和吸收系数是海水固有光学特性的两个基础性参数。体散射函数 VSF (Volume Scattering Function, $\beta(\theta, \lambda)$) 是描述光被散射体散射后的角度分布, 是波长 (λ) 及散射角 (θ) 的函数。

水体中, 水体自身、溶解性化合物、悬浮颗粒物以及气泡等都会对水体体散射函数产生贡献 (Hu 等, 2019), 不同组分对体散射函数的角度及波长分布具有特征性贡献。通过对不同角度范围体散射函数积分可以获得水体散射系数、前向散射系数、后向散射系数以及表征散射光进入某一

方向概率的散射相函数等散射特性参数, 利用水体固有光学参数的闭合性 (Haltrin, 2006), 结合吸收系数可推算水体及其组分的所有特征性固有光学特征参数及遥感反射率 R (Duntley, 1963; Mobley 等, 2002), 上述参数及过程对于主被动海洋水色遥感 (海洋辐射传输模型的建立、海洋激光雷达原理的印证等)、生物光学特性及优势藻类检测、生态灾难预警、海气交互过程的研究等光学海洋学问题及应用 (Smith 和 Baker, 1982; McLeroy-Etheridge 和 Roesler, 1998; Lee 等, 2002; Rehm 和 McCormick, 2011; 陈都 等, 2021) 都具有广泛且重要的意义。

水体体散射通量具有很强的方向性, 前后向

收稿日期: 2021-07-19; 预印本: 2022-02-24

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: 41976181, 41976172, 41976170); 广州市科技计划重点项目 (编号: 201707020023); 南方海洋科学与工程广东省实验室 (广州) 人才团队引进重大专项项目 (编号: GML2019ZD0305); 热带海洋环境国家重点实验室自主研究项目 (编号: LTOZZ2003)

第一作者简介: 刘聪, 研究方向为海洋光学技术。E-mail: liucong194@mails.ucas.ac.cn

通信作者简介: 李彩, 研究方向为海洋光学及海洋环境监测技术。E-mail: liclaire@scsio.ac.cn

散射能量分布动态范围大 (Petzold, 1972; 徐聪辉和李彩, 2019), 散射能量主要集中在前向小角度, 后向散射信号极其微弱。体散射信号的上述特点使得体散射函数, 特别是 0° — 180° 范围内广角体散射函数的测量对光机电性能及结构要求较高、设计难度大。受技术发展及元器件性能限制, 体散射函数测量技术发展较为缓慢, 现场实测数据较少。同时, 受体散射函数测量技术复杂光机结构及散射光的强方向性特点制约, 体散射函数的定标, 即将各个探测器测量得到的散射通量信息转换为体散射函数, 亦是制约体散射函数测量技术进展的一个重要因素。

本文在梳理了国内外水体散射及体散射函数定标方法的基础上, 结合水体散射及体散射函数的测量方法及其具体应用, 对几种典型的体散射函数定标原理、方法、适用范围及优缺点等进行了归纳总结。

2 体散射函数测量定标方法

体散射函数的数学定义为相应于某一立体角 Ω 和散射体积 V 的散射通量的二阶导数除以入射辐照度, 单位为 $\text{m}^{-1}\text{sr}^{-1}$ 。

$$\beta(\theta, \lambda) = \frac{\partial^2 \Phi_s(\theta, \lambda)}{E \partial \Omega \partial V(\theta)} \quad (1)$$

式中, θ 为散射角, λ 为波长。在海水中, $\beta(\theta, \lambda)$ 还随时间和空间变化。

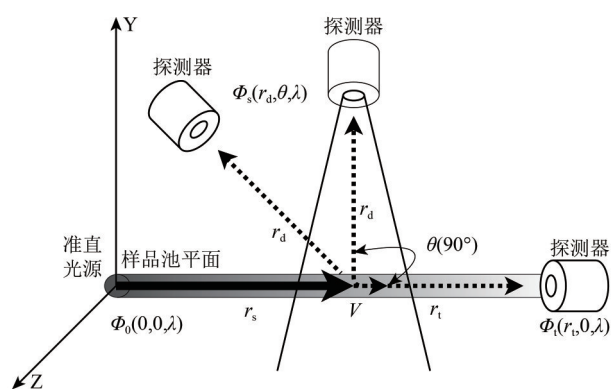


图1 体散射函数测量原理示意图

Fig. 1 Measurement principle of volume scattering function

体散射函数测量技术的发展离不开定标方法及技术的创新和优化。在体散射函数测量技术发展初期, 受技术所限, 很难实现真正意义上的体散射函数测量, 而是, 涌现出一批散射通量归一

化定标甚至无定标的水体体散射定性测量及研究。归一化定标或相对定标其实质为基于某一传感器响应或某一物理量标定结果对其他传感器测量结果进行归一化处理, 仅是对体散射函数或散射通量的定性或半定量描述。如: 基于白炽灯和光电池, Pettersson (Pettersson, 1934a, 1934b, 1936, 1939; Højerslev, 1994) 研发了有记录以来第一台原位后向散射测量仪及透射测量仪, 仅可获取散射通量电流信息, 未对其进行数字量化, 更无物理量定标。Duntley (1963) 报道的有记录以来第一台前向小角度体散射函数测量仪, 仅利用探测器对已知透射率溶液的响应度来实现能量定标。但该阶段散射及体散射函数测量技术的发展及对定标方法的初探对后续体散射函数及衰减系数测量技术的研发与发展均具有里程碑意义。

以早期的归一化及相对定标为基础, 随着体散射函数测量技术发展进步及测量需求的提升, 相继出现了各种水体体散射函数测量定标技术, 概括起来主要有基于散射体及散射通量的体散射函数定标方法、基于漫射体与传感器响应权重函数的体散射函数定标方法以及基于标准溶液或颗粒物与传感器响应权重函数的体散射函数定标方法。

2.1 基于散射体及散射通量的体散射函数定标方法

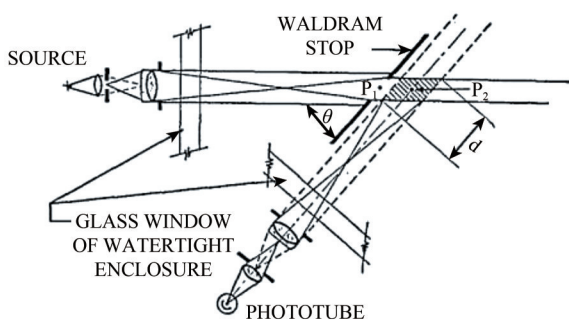
基于散射体及散射通量的体散射函数定标方法多用于广角体散射函数测量技术中。该方法从体散射函数的基本原理出发, 以体散射函数的数学定义式 (1) 为基础, 在假设光源理想准直、光斑大小不随距离改变、定标溶液衰减系数已知、探测器视场角相同或已知的基础上, 基于仪器的光机结构参数估算的散射体及散射通量或其光电转换码值, 结合式 (1) 进行定标。

基于散射体及散射通量的体散射函数定标方法最早出现在 1950 年代。Tyler 和 Richardson (1958) 基于光源固定、探测器旋转的原理研发了一款可用于测量 20° — 170° 范围内水体体散射函数的仪器并给出了初步测量结果, 这是现有文献记载中首次真正意义上用于水体体散射函数测量的仪器。测量仪在光源与散射体之间放置了一个随探测器旋转的光阑 (图 2 (a)) (Tyler 和 Richardson, 1958) 用于限制不同角度散射体的一致性, 这一结构使

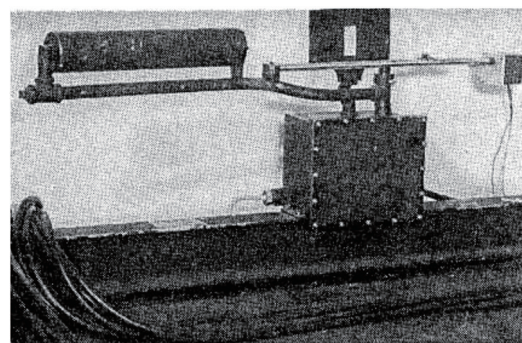
得 Tyler 在体散射函数的定标中省去了对不同角度散射体体积的计算与校正。仪器定标采用由 Benjamin S. Prochard 设计的定标装置 (图 2 (b)) (Tyler 和 Richardson, 1958) 来完成, 该装置的核心是一个白色 Lambert 反射板, 将其安装在与光束平行的丝杆上, 由马达驱动丝杆匀速穿过由光源光束和散射探测器立体角相交的散射体所在位置。基于 Lambertian 自身特性, 散射通量探测器接收并转换的光电信号 $Reading$ 正比于 Lambertian 的反射率 R 、Lambertian 的辐照度 H 及对应位置的散射体截面积 A :

$$Reading = kRAH \quad (2)$$

式中, k 为比例常数。保持光强恒定, 每个固定角度探测器光电信号 $Reading$ 与横截面积成正比。通过对 Lambertian 移动距离 x 进行积分可得到对应的散射体 (式 3)。



(a) 测量仪结构
(a) Structure of VSF meter



(b) 定标装置
(b) Calibration device for VSF meter

图 2 Tyler 体散射函数测量仪结构与定标装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of Tyler's VSF meter and Calibration device

Jerlov (1961) 基于 $Mg(OH)_2$ 材质的 Lambert 板, 对自主研发的、可以测量 10° — 165° 的广角体散射仪— $\beta(\theta)$ 测量仪进行了定标。 $\beta(\theta)$ 测量仪基于光源固定、探测器旋转的原理和结构设计。定标将 $Mg(OH)_2$ 材质的漫射板与仪器光源呈直角放置于水中, 利用探测器对该漫射板的辐射率进行测量。由于漫射板散射特性已知, 便可以结合探测器的测量结果确定 $\beta(\theta)$ 测量仪的定标因子, 其不确定性有 20%。利用定标后的 $\beta(\theta)$ 测量仪, Kullenberg (1968) 在马尾藻海同一个站位做了 10 次重复测量, 通过 45° 与 90° 体散射比值及比较发现马尾藻海表层海水较为清澈, 同步测量得到的衰减系数验证了这一结论, 同时研究发现 45° 体

$$V = \int_{x_1}^{x_2} k_1 A dx \quad (3)$$

基于仪器的光机结构容易计算得到 90° 散射角对应的散射体积。结合仪器光机结构设计及 Lambertian 移动模拟计算证明, 90° 散射体与其他角度散射体基本一致。故不同角度体散射函数 $\sigma(\theta)$ 与 $\sigma(90)$ 之间可表示为

$$\frac{\sigma(90)}{Reading_{90}} \times Reading_{\theta} = \sigma(\theta) \quad (4)$$

Tyler 散射体一致的设计理念致使其在近岸浊度较大的水体无法可靠使用, 因为随着浊度的增加, 准直光束在到达样品体积之前就过度扩散, 使得有效样品体积增加, 同样, 有效散射体和辐照度也会加大。除此之外, 机械转动结构还存在功耗大、采样频率低等共性问题。

散射一定程度上代表了水体的散射特性。

Kullenberg (1968) 基于仪器光机结构的理论设计值及已知衰减系数的标准溶液, 对自主研发的前向小角度体散射函数测量仪进行了定标。该测量仪通过调整接收光路上定制的楔型反射镜实现前向 3 个角度 (1° 、 2.5° 、 3.5°) 体散射函数及透射光测量。同年, 基于光源固定探测器旋转的原理和结构, Kullenberg 设计研发了广角 (10° — 165°) 体散射函数测量仪, 并将自主研发的小角度散射测量仪及广角体散射函数测量仪整合为一体, 实现了 1° — 165° 范围内水体体散射函数测量。仪器定标或测量基于光机结构的理论设计值, 假定准直光源发散角为 0、光斑大小不随光程改变,

充分利用旋转结构中单一探测器光电转换因子唯一性的特点, 只需得到不同角度散射光通量 A_θ 与透射光光通量 A_0 的比值、水体的衰减系数、光程长度(l_0 、 l)及立体角 ω 即可计算得到不同角度水体体散射函数 $\beta(\theta)$ (式(5))。衰减系数 c 的定标则是基于已知衰减系数的标准溶液测量实现。

$$\beta(\theta) = \frac{A_\theta \times \exp(-cl_0)}{A_0 \exp(-cl) d\omega dl} (\text{m}^{-1}, \text{str}^{-1}) \quad (5)$$

仪器现场测量结果表明, 总散射系数或能量的贡献者为大于入射波长的粒子。这一结论与Hodkinson(1963)实验室研究结论一致, 现场原位测量均为大洋一类水体, 同时, 基于一类水体现场测量结果, Kullenberg发现前向颗粒物散射几乎不受波长影响, 后向散射具有波长依赖性, 且 45° 角的体散射函数值与总散射系数在不同海域之间展现出显著稳定的相关性, 这与Tyler和Richardson(1958)以及Jerlov(1961)的结论极为相似。Kullenberg(1978)利用改进后的 $\beta(\theta)$ 测量仪(角度范围 7° — 168°)对3种不同的海洋锋面光散射特性进行了实测研究。实测结果表明散射测量可以有效补充CTD、化学和生物观测, 更清楚地显示出大梯度或急剧过渡锋面结构的存在。

Kullenberg(1984)基于光机结构的散射体估算及漫射体, 对改进后的 $\beta(\theta)$ 测量计(角度 8° — 160°)进行定标。定标基于光机结构计算 90° 对应散射体, 结合散射角正弦因子, 实现不同角度散射体的估算。定标时, 将仪器放入一盛有荧光剂的密闭池内, 该荧光信号只与散射体积有关, 与浓度无关。结果显示, 散射角为 30° — 140° 时散射体积与 90° 时的散射体积大致符合正弦函数的关系, 10° — 30° 以及 150° — 160° 则需要通过一个附加的校正因子0.7—1.0以及1.1—1.2对这种正弦关系进行校正; 散射通量辐射定标沿用Tyler的漫射体定标方法, 体散射函数定标结合辐射定标及散射体估算得到。研究发现, 仪器测量误差主要由温深变化、光机结构转动等引入, 其中温深变化对散射测量误差的贡献大约在10%以内, 光机结构转动(仪器探测器旋转方向改变)引入的误差则较大, 60° — 100° 的误差可以达到25%, 其中 90° — 100° 的误差高达40%, 40° — 60° 及 110° — 130° 误差高达15%, 其他测量角度误差小于10%。基于改进后的 $\beta(\theta)$ 测量计, Kullenberg(1984)对德雷克

海峡和秘鲁上升流区水体体散射特性进行剖面测量发现散射函数的形状随剖面深度变化, 其大小在各海区之间差别很大, 这也进一步说明光散射的区域性特点。

基于与Kullenberg(1968)的相似的定标方法, Petzold(1972)对自主研发的广角体散射函数测量的仪器(GASM)进行了定标。与之配套使用的还有其自主研发的前向小角度(0.0859° 、 0.169° 以及 0.338°)体散射函数测量仪(LASM)。LASM测量原理与Duntley(1963)报道的小角度体散射函数测量仪相似。GASM则基于光源旋转、探测器固定的方法实现 10° — 170° 范围内17个角度体散射通量的测量。GASM的定标与Kullenberg(1968)的定标式(5)相似, 仪器定标基于光机结构的理论设计值进行, 与Kullenberg定标方法不同的是Petzold在GASM中增加了不同角度体积校正因子, 引入了水体光吸收对散射光传输的贡献。定标通过在纯水中加入非水溶性氢氧化铝、氢氧化镁(提供散射响应)及黑色有机染料(提供吸收响应)验证仪器定标误差可控制在20%(LASM)和 $\pm 5\%$ (GASM)。LASM和GASM必须配合衰减系数测量仪使用方能获取不同角度体散射函数。Petzold使用LASM和GASM及外配衰减系数测量仪, 对大洋、近岸以及较为浑浊港口等3类典型水体体散射函数、衰减系数、散射系数、后向散射系数及散射相函数等进行了实测和计算研究, 结合实际测量结果和理论假设外推及内插, 实现了 0° — 180° 范围内水体体散射函数测量并将LASM和GASM的角度分辨率分别提升至 0.01° 和 1° 。研究发现, 清洁水体和浑浊水体的体散射函数角度分布在数值上存在较大的差距。Petzold的实测数据作为经典沿用至今, 后续几乎所有体散射函数测量技术及样机在仪器性能验证时都会将其引入加以对比和说明。

2010年代, 基于散射体估算及辐射定标, Li等(2012, 2015)对自主研发的广角海水体散射函数(20° — 160° , 7个角度散射)及衰减系数(0° 透射)测量仪进行了定标。测量仪基于阵列式探测原理设计。仪器定标时, 首先利用仪器光机结构的理论设计参数估算了 90° 散射体, 在合理假设前提下, 以 90° 散射体为基础, 基于散射角正弦校正, 构建了其他角度散射体的估算模型并对模型进行了评价。评估结果表明, 基于 90° 散射体的正

弦校正估计 20° — 160° 的散射体积，计算误差小于 0.158%，越接近 90° ，计算误差越小。当散射角 θ 趋于 0° 或 180° 时， $V(\theta)$ 为无穷大，但实际上，根据仪器的光学和机械结构计算出的 $V(\theta)$ 应为常数。故在前向近 0° 及后向近 180° ，采用该方法进行散射体估算存在较大误差。同时利用标准光源和漫反射板，对不同角度传感器进行辐射定标，在此基础上利用式 (6)、(7) 可以计算得到各个方向体散射函数。

$$\beta(\theta) = \frac{\Phi_s(r_d, \theta) SC_{v\Omega}(90^\circ)}{\Phi_i(0,0) \exp(-c(r_s + r_d))} \sin \theta \quad (6)$$

$$C_{v\Omega}(90^\circ) = \frac{1}{V(90^\circ)} \Omega \quad (7)$$

利用上述体散射函数测量仪，Li 等 (2012, 2015) 首次对中国大亚湾及南海北部等典型水体体散射函数进行了剖面测量研究，将大亚湾实测散射相函数与 Fournier-Forand (简称 F-F) 模型模拟结果及 Petzold 的经典值进行了对比发现所有散射相函数的形状整体相似，但 F-F 模型计算结果及 Petzold (1972) 圣地亚哥港的测量结果、Sokolov 等 (2010) 在黑海的测量结果的 90° 相函数均高于大亚湾海区散射相函数；大亚湾测量结果在 150° 附近有一个峰值，这与黑海 Sokolov 的测量结果相吻合。产生上述不同的可能因素有两个：(1) 大亚湾测量水体中特有的高折射率颗粒物的特征贡献；(2) 仪器较低的角度分辨率也不可避免地丢失了一些重要的体散射函数信息。

理论上，仪器光机结构确定以后，散射体的体积即为已知，但实际中涉及到光源的准直性、探测器的视场角等复杂几何结构。基于散射体及散射通量的体散射函数定标技术是建立在多个理想化的假设条件之上的，如：光源发出的光为理论准直光，出射光和接收光的实际几何结构与理论设计值的误差可以忽略不计。事实上，实际应用过程中的光束不可能做到真正的准直无发散，且对于前向小角度和后向近 180° 散射角对应的散射体，基于近似估算带来的误差很大。故，散射体估算精准度不高，且基于散射体估算的体散射函数定标角度范围受限。

2.2 基于权重函数及朗伯体的体散射函数定标方法

基于权重函数及朗伯体的体散射函数定标基

本思路是用漫反射板或漫透射板的面散射在一定范围内移动来模拟实际过程的体散射，通过移动漫反射板或漫透射板测定各位置散射通量传感器的响应权函数 $W(a, r)$ ， r 是散射通量探测器光接收面到散射体的法向距离， a 为待测溶液吸收系数。 $W(a, r)$ 是表征仪器光机结构的一个综合参数，无需根据仪器的光机结构进行计算，通过漫反射板或漫透射板移动过程中探测器的光通量响应即可确定仪器的权重函数 $W(a, r)$ 。对于不同的水体，此响应加权函数还与水体光束衰减系数 c 有关。在确定了传感器的权重函数后，结合传感器的光通量响应因子即可计算得到体散射函数。

基于权重函数及朗伯体的定标方法和技术最早出现在 1990 年代。Maffione 等 (1991) 首次将权重函数及朗伯体引入后向体散射函数测量仪定标中。为测量海水颗粒物粒径和浓度分布，Maffione 等 (1991) 对 SRI's 公司 1980 年代研发的后向散射传感器进行了改进及定标，该仪器采用双静态光学几何结构，光源及探测器固定在同一平面，光源中心与该平面成 14° 夹角，光源半发散角为 9° ，探测器的视场角为 40° ，测量角度范围约为 115° — 170° 。基于权重函数及朗伯体的后向体散射函数测量仪定标关键公式及步骤如下：

$$\Phi_\beta = \Phi_0 \int_0^\infty \beta(\theta) \cdot W(a, r) dr = \quad (8)$$

$$\Phi_0 \beta(\theta^*) \int_2^\infty W(a, r) dr$$

$$\beta(\theta^*) = \frac{\Phi_\beta}{\Phi_0 \int_2^\infty W(a, r) dr} \quad (9)$$

定标首先将决定散射体的光机参数转换为权重函数 $W(a, r)$ ， $W(a, r)$ 是表征散射通量探测器视场角、光源到散射体的中心距离、探测器到散射体的中心距离的综合性参数，除与仪器光机结构有关外，它还与散射通量探测器光接收面到散射体的法向距离 r 以及待测溶液吸收系数 a 相关， $W(a, r)$ 无法通过模型精准的模拟计算，但可通过测量后利用积分中值定理准确计算得到， $W(a, r)$ 已知后结合入射光通量及式 (9) 得到体散射函数。

其基本思路是用漫射体的面散射来“模拟”实际过程的体散射。具体定标过程中是将一块已知漫反射率的 Lambertian 板平行放置在距离探测器

平面 2 cm 外、沿散射通量探测器视场与光束作用面移动漫射体,变化图 3 (Maffione 等, 1991) 中的 r 进行多次测量,测定各位置的响应权重函数 $W(a, r)$ 。标定过程在纯水中进行,纯水的散射很小,与漫射体的散射相比可忽略。

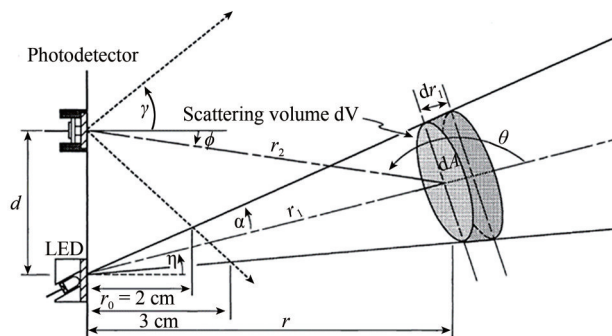


图 3 基于权重函数及漫反射板的后向体散射函数定标方法

Fig. 3 Backward volume scattering function calibration method based on weight function and diffuse reflector plate [Reprinted] with permission from [ref (Maffione et al., 1991)] © (1991) COPYRIGHT Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE)

Maffione 和 Dana (1997) 采用与 Maffione 等 (1991) 相似的方法,对 SRI 公司的商业化后向散射测量仪 HS-6 进行了定标。HS-6 是对 SRI 公司固定角度后向散射测量仪的光机结构、背景光干扰能力、波长信息等进行优化升级的基础上的升级版,它可以实现 6 波段 (可调) 单角度 (140°) 后向散射测量。HS-6 是最早的商业化后向散射体散射函数测量仪,在前述后向散射传感器定标方法的基础上引入改进的权重函数 $W(c, r)$ 来获取探测器的响应以完成定标,与 Maffione 等 (1991) 权重函数的区别是引入衰减系数替代吸收系数以提高测量结果的准确性。结合 Mie 理论及 HS-6 的测量结果, Maffione 和 Dana (1997) 研究了后向体散射函数与散射系数之间的相关关系,研究发现,后向 140° 体散射函数与后向散射系数之间相关性最佳,二者之间相关因子 χ 为 1.08,不确定性约为 9%,研究结论与 Oishi (1990) 的理论研究结果相吻合。

Dana 和 Maffione (2000) 沿用与 HS-6 相似的定标方法,对 HoboLabs 公司自主研发的 HydroBeta 进行了定标。HydroBeta 基于阵列式探测原理,可以实现 10° — 170° 范围内 11 个角度体散射函数及 0° 透射的测量。定标时,对每一个探测器在其探测

视场角与激光束之间放置可移动的漫射板,分别获取其权重函数 $W(c, r)$ 。根据不同角度之间散射的差异性,使用不同的漫射板以获取最佳的标定效果, 60° — 170° ,采用标准漫反射板,其反射率可以达到 99% 且更加符合理想的余弦分布。小于 50° 时,采用漫透射板可以获取较为理想的效果。Dana 和 Maffione (2002) 结合 HydroBeta 加州蒙特雷湾的现场测试数据以及 Mie 散射理论,比较了基于实测结果和理论模拟的 χ ,比较发现实测 ($\chi = 1.13, 140^\circ$) 与理论模拟 ($\chi = 1.08, 140^\circ$) 之间相差 0.05。同时,为了验证 HydroBeta 定标有效性和测量准确性,将其与 HS-6 进行比测,200 m 以浅剖面,HydroBeta 与 HS-6 测得的后向散射系数具有高度一致性。

基于权重函数及朗伯体的定标方法最早开始用于后向单一角度体散射函数定标,后扩展至广角体散射函数定标,利用实测计算得到的权重函数替代体散射函数计算和定标的关键光机参数,可以有效解决散射体估算难度大、精度不高的问题,在一定角度范围内简化了体散射函数的定标过程,提高了体散射函数的定标精度,但这种方案更适用于宽视场角的后向散射仪器,对于前向散射部分,由于漫射板的朗伯体特征随入射角的增加而减弱,带来的误差具有强的不确定性。

2.3 基于标准物质及权重函数的体散射函数定标方法

基于标准物质的定标可分为基于标准溶液和基于标准颗粒物两种定标方法。基于标准溶液定标技术是以瑞利散射为理论依据,将甲苯等标准溶液的散射特性理论计算结果与实测结果一一对应,以此完成对探测器相应及体散射函数的定标。基于标准颗粒物定标方法是以颗粒物的 Mie 散射理论 (Pak 等, 1971; Bohren 和 Huffman, 1983) 为基础,根据选定标准颗粒物的物理特性 (如: 折射率、粒径分布等),计算标准颗粒物的体散射函数 ($\beta_{\text{mie}}(\theta)$) 或是相函数 ($\tilde{\beta}_{\text{mie}}(\theta)$),将其与仪器实测角度散射通量码值一一对应,由此确定每一个角度散射通量码值与体散射函数之间的权重因子 (Moore 等, 2000; Twardowski 等, 2007, 2012),在体散射测量仪光机结构及光电探测单元保持不变的前提下,实际测量时即可根据定标权重因子将各个角度探测器接收到的散射光通量码值转换

为对应的体散射函数。

2.3.1 基于标准溶液的体散射函数定标

基于标准溶液定标最早出现在 1940 年代。Dawson 和 Hulburt (1941) 基于标准溶液和瑞利散射对自主研发的广角度测量仪器实验室样机（角度范围 22.5° — 157.5° ，角度分辨率 22.5° ）进行了定标。该测量仪基于光源固定、探测器旋转原理设计，这是目前有记载最早的广角体散射函数测量仪。仪器光源为钨丝灯，通过安装红、黄、蓝色滤光片实现不同波长体散射测量。Dawson 等利用该仪器对乙醚、四氯化碳、二硫化碳、苯和水 5 种液体分别进行了测量，并与瑞利散射计算结果 (Martin 和 Lehrman, 1922; Raman 和 Rao, 1923; Krishnan, 1925) 进行对比发现，两者具有较高的一致性，可见光及紫外部分偏差不超过 5% 和 10% (Dawson 和 Hulburt, 1941)，Dawson 等认为这一偏差来源可能受限于当时技术条件落后，标准介质本身存在一定的偏差。虽然测量仪仅有散射偏振光强度的描述，并未涉及到体散射函数，但对广角体散射函数测量仪的后续研发及基于标准物质的散射定标均具有里程碑意义。

20 世纪 50 年代，基于氧化镁和碳酸镁，Brice 等 (1950) 对自主研发的实验室散射光度计 Brice-phoenix 进行了浊度定标。Brice-phoenix 设计的目的是为获取低浓度高分子化合物溶液的浊度、不对称性和消偏振能力等性能。Brice-phoenix 基于光源固定、探测器旋转原理，采用汞灯作为固定光源，光电倍增管为光电探测器件，仪器配套有偏振元件，随着探测器的旋转可以测量 0° 、 45° 、 90° 以及 135° 的散射信号，通过计算 90° 散射与 0° 透射之比获取溶液的浊度。进行浊度校准时，为简便计算，根据 Preston, 1929、Ryde, 1931 及 Harrison, 1946 等研究成果，选择扩散剂氧化镁和碳酸镁作为标准溶液计算确定浊度，其不确定度小于 5%。后 Spilhaus、Gibbs 等利用多次改进后的 Brice-phoenix 开展了大量的实验室测量及多个海域的船载在线测量。Spilhaus (1968) 研究发现基于 45° 体散射函数估算 30° — 150° 体散射系数误差仅为 6%。Gibbs (1978) 通过对球形、不规则立方体以及扁平状 3 种典型颗粒物的体散射函数的实测研究，提出一种基于 90° 体散射函数与 140° 体散射函数的比值来确定颗粒物形状的方法及模型。

Wyatt (1993) 基于标准溶液的瑞利散射，对自主研发实验室用广角体散射函数测量仪 (DAWN) 进行了定标。DAWN 基于阵列式探测原理设计，目标是测量液体中大分子或胶体物质的摩尔质量，DAWN 最多可实现 18 角度体散射函数的同步测量，角度覆盖 22.5° — 147° ，广泛应用于生物化学领域。仪器通过给定标准物质在不同角度的瑞利比来实现散射定标，对于给定的单一成分标准溶液，体散射定标常数仅与标准溶液折射率、探测器响应及样品池的结构相关。在原有基础上，Babin 等 (2012) 提出利用甲苯对 DAWN 的 90° 体散射函数进行定标，定标基于 DAWN 的光机结构计算了 90° 对应的散射体积，再结合甲苯的散射特性对 90° 体散射函数进行定标，并构建其他方向体散射函数与 90° 体散射函数之间的近似估算；同时基于蒙特卡洛模拟，建立反射光校正模型，将反射对散射测量误差贡献从 300% 降至 13%，并利用聚苯乙烯标准球形颗粒物对定标及校准结果进行比测，发现定标后实测结果与 Mie 理论结果高度一致。

日本学者 Hiroyuki Tan 等 (2013) 基于标准溶液（甲醇），结合瑞利散射理论模型，对自主研发水体体散射函数测量仪样机 (I-VSF) 进行定标。I-VSF 基于面阵 CCD 和望远镜原理设计，可实现 8° — 172° 水体体散射函数的测量。CCD 的不同像元对应接收不同角度散射光形成散射光图像，通过在前向 0° — 25° 放置中性滤光片来实现前后向宽动态范围散射光信号的有效探测，同时通过手动转动滤光设备实现不同波长 (400—700 nm) 体散射函数的测量，尽管其完成 400—700 nm 体散射函数测量耗时十几分钟，这应该是第一款真正意义上的高光谱广角体散射函数测量仪。仪器选择甲醇作为标准物质是因为甲醇的折射率与水的折射率相近，可最大限度降低水与甲醇之间的界面反射；另外，甲醇溶液对于可见光波段具有较高的散射。Tan (2015, 2017) 利用 I-VSF 对精准推算藻类颗粒物及水体的后向散射系数进行了研究，并进一步探索了颗粒物体散射函数与叶绿素浓度之间的相关关系。研究认为深入了解 $\beta_{ps}(\theta, \lambda)$ 可为海洋水色遥感的发展及基于水色遥感的叶绿素浓度反演模型的优化和提升提供更优的科学依据，建立 Chl-IOPs 数据库是浮游植物功能类型 (PFTs) 算法优

化和应用的有力保障。

2.3.2 基于标准颗粒物的体散射函数定标

基于标准颗粒物的定标方法最早出现在1990年代。Balch等(1999)为了研究颗粒有机碳及无机碳的散射特性,结合标准颗粒物与Mie理论对DAWN重新进行了定标,定标以90°散射体估算为基础,结合标准球形颗粒物的散射相函数及散射系数Mie理论计算结果对DAWN进行定标,利用定标后的DAWN对颗粒无机碳(PIC)和颗粒有机碳(POC)的散射特性进行了实测研究发现,基于光散射可以对POC和PIC进行估算,前者通过测量钙化浮游植物的后向散射及其粒径分布实现,后者与酸敏感碳酸钙颗粒物后向散射成正比。

21世纪初,基于标准球形颗粒物及Mie散射理论, Lee与Lewis(2003)完成了自主研发的高角度分辨率广角体散射函数测量的仪器(MVSM)的定标, MVSM基于旋转棱镜结构,与旋转探测器或旋转光源的广角体散射函数测量仪的设计原理基本一致但性能有较大的提升,旋转棱镜结构可以实现0.3°—179.3°不同角度体散射函数的测量,角度分辨率可达0.3°。MVSM是迄今为止角度分辨率最高,有效测量角度范围最广的体散射函数测量仪。MVSM的定标首先基于90°散射体正弦校正估计其他的散射体积,在此基础上,基于标准溶液(纯水或0.2 μm过滤后的海水)及不同大小的聚苯乙烯标准球形颗粒物对体散射函数进行定标。聚苯乙烯颗粒在0.064—87.9 μm,其体散射相函数基于Mie理论计算(Bohren和Huffman, 1983)。实验结果发现0.064 μm聚苯乙烯颗粒物不同角度体散射通量测量数据稳定性较差不适宜用于定标。为验证仪器定标可靠性,将45.6 μm的标准聚苯乙烯微球颗粒的理论计算结果与仪器测量结果进行比较发现二者相对偏差可达19%,理论计算后向散射系数与基于实测体散射函数计算得到的后向散射系数之前相对偏差为8%。

Chami等(2005)利用VSM及HS-6等后向散射仪对黑海沿岸区域海水光学性质的研究发现,45°体散射函数描述散射系数依赖于水体颗粒物的组成,而4°体散射函数与散射系数之间的相关性可达96%且对水体组分变化敏感度较低,更加适用于不同类型的水体。随后,Chami等(2006a)利用VSM对黑海沿岸水体体散射函数进行了在线

测量研究,发现140°体散射函数与后向散射系数之间的转换因子并不适用于富含藻类水体的后向散射系数估算。

Zhang等(2002)利用MVSM结合Mie理论对海水中气泡的体散射函数进行研究,研究结果表明气泡表层有机包裹层对后向散射的贡献远大于总散射,结合Mie散射及辐射传输模拟发现,海表层气泡会导致离水幅亮度蓝移,而且这种蓝移情况在干净的大洋一类水体中极为显著。

Chami等(2006b)利用VSM的测量结果,并结合Hydrolight首次定量估算了散射相函数中不同方向散射对遥感反射率的贡献并发现在后向散射比率一定的前提下,散射相函数形状可以导致辐射反射率的估计相差高达20%。

Slade和Boss(2006)等提出了一种针对LISST用于体散射函数测量的定标方法。LISST是美国Sequoia公司的商业化粒径测量仪,可测量0.08°—15°范围内32个角度的体散射函数。定标基于标准聚苯乙烯球形颗粒(2、10、20、50、100 μm)的Mie理论估算得到理论体散射函数,在对其进行衰减校正(式(10))后与LISST实际测量信号相除(式(11)),得到定标因子。

$$\langle \beta_{\text{Mie}} \rangle_i = c_{\text{LISST}} \frac{\langle \beta_{\text{Mie}}^* \rangle_i}{c_{\text{Mie}}^*} \quad (10)$$

$$\chi_i = \frac{\langle \beta_{\text{Mie}} \rangle_i}{p_{\text{scat}_i}} \quad (11)$$

结果显示,所有探测器定标因子的平均相对绝对误差为6%;采用10 μm与50 μm的聚苯乙烯微球颗粒对其进行验证,平均相对不确定性高达30%,Slade认为这一偏差来源于实际使用颗粒物与理论假设之间存在的偏差所致。

LISST-VSF是Sequoia公司在LISST的基础上研发的全球第一台商业化广角体散射函数测量仪。仪器在LISST原有环形阵列式小角度衍射测量的基础上增加了转动的“眼球探测器”以实现15°—155°体散射函数测量。最初LISST-VSF中15°—150°体散射函数定标利用LISST最外围的两环(12.3°、14.4°)对15°进行线性外推,利用眼球探测器测得15°的测量值及15°的外推结果获得眼球探测器的响应函数,以此确定整个角度范围内的体散射函数。但该定标方法水体适用性差且定标精度主要依赖于LISST最外两环定标的精度。

为提高其定标精度，拓宽其适用水体，Hu等（2019）利用0.2 μm 聚苯乙烯标准颗粒物对 LISST-VSF 中 15° — 150° 范围内体散射函数进行定标，并利用0.5 μm 及 11 μm 聚苯乙烯标准颗粒物对定标结果进行了验证发现，两种粒径颗粒的理论值与定标后实测值的中值差为 11.1%。在此基础上，Hu 于 2017 和 2018 年利用 LISST-VSF 的 3 次现场试验（LP-2017、LP-2018、EX-2018）其相对和绝对定标的不确定性进行对比分析，LP-2017、LP-2018 试验结果表明基于 LISST 外推的定标不确定性高达 83.2%，而基于 Mie 理论定标的不确定性仅为 16.6%；EX-2018 的实验中（较为清澈的水域），两种定标方法的变异系数相差 15 倍；试验结果表明基于 Mie 散射理论的体散射函数定标方案具有较好的水质适应性。

Chami 等（2014）基于标准颗粒物的 Mie 散射理论，完成了自主研发的多光谱（440 nm、532 nm、660 nm）、广角（角度范围 1° — 179° ，角度分辨率 1° ）偏振体散射特性测量仪（POLVSM）的定标。POLVSM 基于双潜望镜（一个反射镜和两个棱镜组成）光学结构设计，使得光源平面与样品和接收器的散射平面分离，可有效防止样品池及探测器之间的镜面反射，仪器可以测量包括偏振度在内的穆勒矩阵元素 M_{11}^{uncal} ，可用于水溶胶的方向性以及偏振散射特性测量。POLVSM 的定标与 MVSM 基本类似，即采用不同粒径的聚苯乙烯标准颗粒物进行定标，不同的是 POLVSM 定标因子为仪器所测量的原始信号（穆勒矩阵元素）在测量散射角度范围内的积分与利用 Mie 理论计算的散射系数之比：

$$C_0 = \frac{2\pi \int_{\theta=\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} M_{11}^{\text{uncal}}(\theta) \sin \theta d\theta}{b_{\text{know}}} \quad (12)$$

$$b_{\text{know}} = 2\pi \int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} M_{11}^{\text{know}}(\theta) \sin \theta d\theta \quad (13)$$

定标实验通过对 1 μm 和 3 μm 两种聚苯乙烯微粒测量来验证和评估仪器定标因子的可靠性。实验验证发现不同波长之间，定标因子的变化系数均小于 6.5%，测量相对不确定度为 4.3%。基于 POLVSM 的实测研究发现颗粒物的后向散射会随着颗粒物折射率增大而增大，随粒径减小而减小，且在散射角大于 150° 时尤为显著。这一规律与 Twardowski 及 Zhou 等（Twardowski 等，2001；Zhou

等，2012）基于 Mie 理论模型的研究结论高度一致。

2010 年代，基于 Lorenz-Mie 散射理论及权重因子 Twardowski 等（2012）完成了 Wetlab 公司研发的单波长、17 个角度广角体散射函数测量仪（MASCOT）的定标。MASCOT 基于阵列式探测原理，需同步借助 AC-S 等衰减系数仪进行体散射函数测量和计算。定标实验选取粒径为 $0.1998 \pm 0.0006 \mu\text{m}$ 的标准聚苯乙烯颗粒物，利用 Lorenz-Mie 理论计算得到颗粒物的散射相函数，结合实际测量获得的散射系数，建立起每一个角度散射通量传感器实测码值与理论散射相函数之间的权重函数。

$$\Phi_i - D_i = b_p \frac{\tilde{\beta}(\bar{\theta}_i)}{f_i} e^{-L(b_p \varepsilon + a_{ps} + a_v)} \quad (14)$$

定标结果显示，利用相同的聚苯乙烯标准颗粒，在长达几年的多次校准试验中其变化小于 2%。MASCOT 的定标方法与 Wetlab 公司的 ECO 系列后向散射测量仪一样，但因 MASCOT 的光程较长（20 cm），定标过程必须引入衰减校正因子 ε （ $0 < \varepsilon < 1$ ）（见式（14））， ε 与待测水体直接相关。2009 年，Sullivan 和 Twardowski（2009）基于 MASCOT、AC-S 等仪器在十个不同海区的调查研究发现，所有颗粒物平均后向散射相函数形状相似，与水体没有明显的相关性，颗粒物后向散射系数与后向单一角体散射函数相关因子的不确定性在 110° — 120° 最小（最大为 5%），故利用该范围内单一角度体散射函数估计后向散射系数误差较小。后续 Czerski 等（2011）利用 MASCOT 研究发现对于小粒径的气泡（小于 5 μm ），气泡的体散射函数对覆盖在气泡表面的有机质成分及厚度较为敏感。

2021 年，基于 Mie 散射理论及微米、亚微米级聚苯乙烯标准颗粒物，陈都等（2021）完成了自主研发的近 180° 水体体散射函数实验室测量系统的定标。该系统基于离轴光路设计，有效解决了光路遮挡和背景杂散光的干扰问题，可以实现 173° — 179.4° 的近 180° 体散射函数的测量。结果显示，1 μm 颗粒物在 173° — 177.7° 的体散射测量值与理论值的数值和变化趋势基本吻合，测量值与理论的相对平均标准偏差为 0.34（水平偏振光）与 0.45（垂直偏振光）；10 μm 标准颗粒物的理论值

与测量值在曲线的波动起伏与波动周期上具有较好的一致性, 测量值与理论值的相对平均标准偏差为0.42 (水平偏振光) 和0.35 (垂直偏振光), 这一测量结果与 Mie 散射理论值具有较好的一致性。

基于标准液体和固体颗粒物的体散射函数定标, 将各个方向实测散射通量 (码值) 与标准颗粒物的散射相函数或体散射函数通过权重函数或定标比例因子直接相关, 极大的简化了体散射函数定标过程, 定标精度也基本不受散射角度范围的限制; 且随着测量及计算能力的飞速发展, 基于理论模型的标准物质散射相函数/体散射函数以及标准物质 (液体或固体) 的相关物理参数如折射率、粒径等的分布或信息越来越准确, 模型越来越完善, 理论计算越来越接近实际, 定标精度会越来越高。近年来, 基于 Mie 理论的标准颗粒物定标方案已成为体散射函数定标的主流方案。

3 结 语

水体体散射函数表征光在水体中某一散射体上散射光的角度分布状况, 是描述水体散射特性的重要固有光学参数, 在主被动水色遥感、生物光学特性及优势藻类检测以及赤潮等生态灾难预警、海气交互过程研究等光学海洋学问题及应用领域具有十分重要的意义。

体散射函数测量和定标是海洋光学领域较为棘手的科学技术难题, 至今仍在不断探索和进步中。自20世纪30年代第一台后向散射原位测量仪诞生以来, 体散射函数有效定标方法技术随体散射函数测量技术同步发展。基于散射体及散射通量、基于漫射体与传感器响应权重函数及基于标准溶液或颗粒物与传感器响应权重函数的体散射函数定标3大类定标方法正在齐头并进, 每一种方法都还在不断改进和完善以充分发挥其优势, 为提升体散射函数测量技术的性能和精度发挥着关键的作用。

基于散射体及散射通量的体散射函数定标技术从体散射函数的基本原理出发, 构建在多个理想假设条件下 (如: 光源发出理论准直光, 出射光和接收光的实际几何结构与理论设计值的误差忽略不计), 致力于对散射体积的精准计算, 但由于散射体积不规则且计算繁琐, 若要实现各个角度散射体的精准估算, 其计算量非常巨大甚至不

可行, 故一般选用散射体较为规则且易计算的 90° 散射体积作为基准, 进而近似推算其余角度的散射体积, 该方法对于前向小角度和后向近 180° 散射体近似估算误差很大, 体散射函数定标角度范围受限 (Li 等, 2012)。基于权重函数及朗伯体的定标方法则是通过移动漫射板测定各位置散射通量传感器的响应权重函数, 该方法可以有效解决散射体估算难度大的问题, 但该方案由于漫射板的朗伯体特征会随入射角的增加而减弱, 对于前向散射部分, 带来的误差具有强的不确定性, 因此更适用于宽视场角的后向散射仪。基于标准液体和固体颗粒物的体散射函数定标将各个方向实测散射通量 (码值) 与标准颗粒物的散射相函数或体散射函数通过权重函数或定标比例因子直接相关, 极大的简化了体散射函数定标过程, 该方法不受散射角度范围的限制, 且随着理论计算模型的逐渐完善、模型输入参数 (标准物质的物理参数, 如折射率、粒径等) 的愈发精确, 定标精度稳步提高, 定标结果也逐步逼近真实结果。

总的来说, 上述3大类体散射函数定标方法各有其时代背景及适用范围。计算及定标复杂度上, 相对于基于散射体及散射通量的定标方法, 基于权重函数及朗伯体与基于标准物质这两种方法降低了定标计算的复杂程度, 尤其是基于标准物质的定标方法极大的简化了体散射函数的定标过程; 从适用范围来考虑, 基于权重函数及朗伯体的定标方法更适用于宽视场角的后向散射仪, 而基于散射体与散射通量的定标方法与基于标准物质两种定标方法的角度适应性更广, 尤其基于标准物质的定标几乎不受测量角度范围的限制。通过对比可以看出, 对于提升体散射函数测量、特别是广角体散射函数测量, 基于标准物质, 尤其是标准颗粒物的体散射函数定标方法应该更有前景。

随着人们对水体体散射特性认识的不断深入, 微型、高灵敏度、低功耗、低压光电探测技术以及高精定标技术的快速发展, 水体体散射函数测量正在向小型化、高测量频率、高灵敏度、高精度、高光谱、高角度分辨率方向发展。测量技术的快速高精度离不开高精定标技术和方法的完美配合, 应该可以预见, 上述3大类体散射函数定标方案或3种方案中的方法变通和组合方案是未来很长一段时间体散射函数的定标方法。中国在体散射函数测量技术研究上与国际上先进国家差距甚

大，国内海洋光学及海洋物理相关专家高度重视多光谱广角体散射函数测量技术的进展和贡献，这一应用需求可以促进中国在广角体散射函数定标及测量技术上的进步和突破。

水体体散射函数在海洋主被动水色遥感、生物光学特性及优势藻类检测建模以及赤潮等生态灾难预警中发挥着其重要的作用。将体散射函数测量技术及结果与 Mie 散射、瑞利散射、Fournier-Forand 模型、Hydrolight 辐射传输理论等理论模型相结合，开展体散射函数测量定标、定标性能验证分析、多次散射校正、水色遥感反演算法研究及精度提升、生态系统建模、优势藻类反演、水体不同组分的特征性光学特性贡献及其与组分化特性相关性研究越来越受到研究人员的重视；亦是促进水体体散射函数发展、拓宽体散射函数应用领域的前提，加速水体散射特性等固有光学特性更好地在主被动水色遥感、水下光辐射传输、海气交互过程研究及灾难预警等光学海洋学应用领域发挥更为显著的作用。

参考文献 (References)

- Babin M, Stramski D, Reynolds R A, Wright V M and Leymarie E. 2012. Determination of the volume scattering function of aqueous particle suspensions with a laboratory multi-angle light scattering instrument. *Applied Optics*, 51(17): 3853-3873 [DOI: 10.1364/ao.51.003853]
- Balch W M, Drapeau D T, Cucci T L, Vaillancourt R D, Kilpatrick K A and Fritz J J. 1999. Optical backscattering by calcifying algae: separating the contribution of particulate inorganic and organic carbon fractions. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104 (C1): 1541-1558 [DOI: 10.1029/1998jc900035]
- Bohren C F and Huffman D R. 1983. *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*. New York: John Wiley and Sons
- Brice B A, Halwer M and Speiser R. 1950. Photoelectric light-scattering photometer for determining high molecular weights. *Journal of the Optical Society of America*, 40(11): 768-778 [DOI: 10.1364/josa.40.000768]
- Chami M, Marken E, Stamnes J J, Khomenko G and Korotaev G. 2006a. Variability of the relationship between the particulate backscattering coefficient and the volume scattering function measured at fixed angles. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 111(C5): C05013 [DOI: 10.1029/2005jc003230]
- Chami M, McKee D, Leymarie E and Khomenko G. 2006b. Influence of the angular shape of the volume-scattering function and multiple scattering on remote sensing reflectance. *Applied Optics*, 45 (36): 9210-9220 [DOI: 10.1364/ao.45.009210]
- Chami M, Shybanov E B, Churilova T Y, Khomenko G A, Lee M E G, Martynov O V, Berseneva G A and Korotaev G K. 2005. Optical properties of the particles in the Crimea coastal waters (Black Sea). *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 110(C11): C11020 [DOI: 10.1029/2005jc003008]
- Chami M, Thirouard A and Harmel T. 2014. POLVSM (Polarized Volume Scattering Meter) instrument: an innovative device to measure the directional and polarized scattering properties of hydrosols. *Optics Express*, 22(21): 26403-26428 [DOI: 10.1364/oe.22.026403]
- Chen D, Liu B Y, Yang Q, Tang J W and Wu S H. 2021. Measurement of volume scattering function of suspended particles in water approaching to 180°. *Infrared and Laser Engineering*, 50(6): 20211029 (陈都, 刘秉义, 杨倩, 唐军武, 吴松华. 2021. 近 180°水中悬浮颗粒物体积散射函数测量. *红外与激光工程*, 50(6): 20211029) [DOI: 10.3788/IRLA20211029]
- Czerski H, Twardowski M, Zhang X and Vagle S. 2011. Resolving size distributions of bubbles with radii less than 30 μm with optical and acoustical methods. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116(C7): C00H11 [DOI: 10.1029/2011JC007177]
- Dana D R and Maffione R A. 2000. HydroBeta: a new instrument for measuring in-situ profiles of the volume scattering function from 10 to 170 degrees. *Ocean Optics XV*, Monaco. <https://www.hobilabs.com/cmsitems/attachments/3/HydroBetaOOXVExtendedAbstract.pdf>
- Dana D R and Maffione R A. 2002. Determining the Backward Scattering Coefficient with Fixed-Angle Backscattering Sensors—Revisited. *Ocean Optics XVI*, Santa Fe, New Mexico 22(6): 18-22
- Dawson L H and Hulburt E O. 1941. Angular distribution of light scattered in liquids. *Journal of the Optical Society of America*, 31(8): 554-558 [DOI: 10.1364/josa.31.000554]
- Duntley S Q. 1963. Light in the sea. *Journal of the Optical Society of America*, 53(2): 214-233 [DOI: 10.1364/JOSA.53.000214]
- Gibbs R J. 1978. Light scattering from particles of different shapes. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 83(C1): 501-502 [DOI: 10.1029/JC083iC01p00501]
- Haltrin V I. 2006. Absorption and scattering of light in natural waters// Kokhanovsky A A, ed. *Light Scattering Reviews*. Berlin, Heidelberg: Springer: 445-486 [DOI: 10.1007/3-540-37672-0_10]
- Harrison V G W. 1946. The light-diffusing properties of magnesium oxide. *Proceedings of the Physical Society*, 58(4): 408-419 [DOI: 10.1088/0959-5309/58/4/309]
- Hodkinson J R. 1963. Light scattering and extinction by irregular particles larger than the wavelength. *Ices Electromagnetic Scattering*. Postdam: Milton Kerer: 87-100
- Højerslev N K. 1994. A history of early optical oceanographic instrument design in Scandinavia//Spinrad R W, Carder K L, Perry M J, eds. *Ocean Optics*. Oxford: Oxford University Press: 118-147
- Hu L B, Zhang X D, Xiong Y H and He M X. 2019. Calibration of the

- LISST-VSF to derive the volume scattering functions in clear waters. *Optics Express*, 27(16): A1188-A1206 [DOI: 10.1364/oe.27.0a1188]
- Jerlov N G. 1961. Optical measurements in the eastern North Atlantic. ("Discovery II" expedition of August and September 1959). *Meddelanden från Oceanografiska Institutet i Göteborg*, 30. 22-32
- Krishnan K S. 1925. LXXV. *On the molecular scattering of light in liquids*. *Philosophical Magazine*, 50(298): 697-715 [DOI: 10.1080/14786442508634789]
- Kullenberg G. 1968. Scattering of light by sargasso sea water. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, 15(4): 423-432 [DOI: 10.1016/0011-7471(68)90050-8]
- Kullenberg G. 1978. Light-scattering observations in frontal zones. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 83(C9): 4683-4690 [DOI: 10.1029/JC083iC09p04683]
- Kullenberg G. 1984. Observations of light scattering functions in two oceanic areas. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 31(3): 295-316 [DOI: 10.1016/0198-0149(84)90106-7]
- Lee M E and Lewis M R. 2003. A new method for the measurement of the optical volume scattering function in the upper ocean. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 20(4): 563-571 [DOI: 10.1175/1520-0426(2003)20<563:anmftm>2.0.co;2]
- Lee Z P, Carder K L and Arnone R A. 2002. Deriving inherent optical properties from water color: a multiband quasi-analytical algorithm for optically deep waters. *Applied Optics*, 41(27): 5755-5772 [DOI: 10.1364/ao.41.005755]
- Li C, Cao W X and Yang Y Z. 2012. Optical scattering property: spatial and angle variability in Daya Bay. *Chinese Optics Letters*, 10 (S2): S20101 [DOI: 10.3788/col201210.s20101]
- Li C, Cao W X, Yang Y Z and Xu Z T. 2015. The optical scattering property: spatial and angle variability in Northern South China Sea//*Proceedings Volume 9449, The International Conference on Photonics and Optical Engineering*. Xi'an: SPIE [DOI: 10.1117/12.2075865]
- Maffione R A, Dana D R and Honey R C. 1991. Instrument for underwater measurement of optical backscatter//*Proceedings Volume 1537, Underwater Imaging, Photography, and Visibility*. San Diego: SPIE: 173-184 [DOI: 10.1117/12.48882]
- Maffione R A and Dana D R. 1997. Instruments and methods for measuring the backward-scattering coefficient of ocean waters. *Applied Optics*, 36(24): 6057-6067 [DOI: 10.1364/AO.36.006057]
- Martin W H and Lehrman S. 1922. The scattering of light by dust-free liquids. II. *The Journal of Physical Chemistry*, 26(1): 75-88 [DOI: 10.1021/j150217a006]
- McLeroy-Etheridge S L and Roesler C S. 1998. Are the inherent optical properties of phytoplankton responsible for the distinct ocean colors observed during harmful algal blooms?//*Ocean Optics XIV*. Kailua-Kona, Hawaii: [s.n.]
- Mobley C D, Sundman L K and Boss E. 2002. Phase function effects on oceanic light fields. *Applied Optics*, 41(6): 1035-1050 [DOI: 10.1364/ao.41.001035]
- Moore C, Twardowski M S and Zaneveld J R V. 2000. The ECO VSF: a multiangle scattering sensor for determination of the volume scattering function in the backward direction. *Ocean Optics XV*, Monaco
- Oishi T. 1990. Significant relationship between the backward scattering coefficient of sea water and the scatterance at 120°. *Applied Optics*, 29(31): 4658-4665 [DOI: 10.1364/ao.29.004658]
- Pak H, Zaneveld J R V and Beardsley G F. 1971. Mie scattering by suspended clay particles. *Journal of Geophysical Research*, 76(21): 5065-5069 [DOI: 10.1029/JC076i021p05065]
- Pettersson H. 1934a. Scattering and extinction of light in sea-water. [s.l.]: Elanders Boktryckeri Aktiebolag
- Pettersson H. 1934b. A transparency-meter for sea-water. [s.l.]: Elanders Boktryckeri Aktiebolag
- Pettersson H. 1936. Transparency of sea-water. *Nature*, 137(3454): 68 [DOI: 10.1038/137068a0]
- Pettersson H. 1939. *Oceanografi: vetenskapen om havet*. Stockholm: Albert Bonniers Förlag
- Petzold T J. 1972. *Volume Scattering Functions for Selected Ocean Waters*. Scripps Institution of Oceanography
- Preston J S. 1929. The reflection factor of magnesium oxide. *Transactions of the Optical Society*, 31(1): 15-35 [DOI: 10.1088/1475-4878/31/1/303]
- Raman C V and Rao K S. 1923. LXIII. *On the molecular scattering and extinction of light in liquids and the determination of the Avogadro constant*. *Philosophical Magazine*, 45(267): 625-640 [DOI: 10.1080/14786442308634152]
- Rehm E and McCormick N J. 2011. Inherent optical property estimation in deep waters. *Optics Express*, 19(25): 24986-25005 [DOI: 10.1364/oe.19.024986]
- Ryde J W. 1931. The scattering of light by turbid media. - Part I. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 131(817): 451-464 [DOI: 10.1098/rspa.1931.0064]
- Slade W H and Boss E S. 2006. Calibrated near-forward volume scattering function obtained from the LISST particle sizer. *Optics Express*, 14(8): 3602-3615 [DOI: 10.1364/oe.14.003602]
- Smith R C and Baker K S. 1982. Oceanic chlorophyll concentrations as determined by satellite (Nimbus-7 Coastal Zone Color Scanner). *Marine Biology*, 66(3): 269-279 [DOI: 10.1007/bf00397032]
- Sokolov A, Chami M, Dmitriev E and Khomenko G. 2010. Parameterization of volume scattering function of coastal waters based on the statistical approach. *Optics Express*, 18(5): 4615-4636 [DOI: 10.1364/OE.18.004615]
- Spilhaus A F. 1968. Observations of light scattering in seawater. *Limnology and Oceanography*, 13(3): 418-422 [DOI: 10.4319/lo.1968.13.3.0418]
- Sullivan J M and Twardowski M S. 2009. Angular shape of the ocean-

- ic particulate volume scattering function in the backward direction. *Applied Optics*, 48(35): 6811-6819 [DOI: 10.1364/ao.48.006811]
- Tan H, Doerffer R, Oishi T and Tanaka A. 2013. A new approach to measure the volume scattering function. *Optics Express*, 21(16): 18697-18711 [DOI: 10.1364/oe.21.018697]
- Tan H, Oishi T, Tanaka A and Doerffer R. 2015. Accurate estimation of the backscattering coefficient by light scattering at two backward angles. *Applied Optics*, 54(25): 7718-7733 [DOI: 10.1364/ao.54.007718]
- Tan H, Oishi T, Tanaka A, Doerffer R and Tan Y. 2017. Chlorophyll-a specific volume scattering function of phytoplankton. *Optics Express*, 25(12): A564-A573 [DOI: 10.1364/oe.25.00a564]
- Twadowski M, Zhang X D, Vagle S, Sullivan J, Freeman S, Czerski H, You Y, Bi L and Kattawar G. 2012. The optical volume scattering function in a surf zone inverted to derive sediment and bubble particle subpopulations. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(C7): C00H17 [DOI: 10.1029/2011jc007347]
- Twadowski M S, Boss E, Macdonald J B, Pegau W S, Barnard A H and Zaneveld J R V. 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: Oceans*, 106(C7): 14129-14142 [DOI: 10.1029/2000jc000404]
- Twadowski M S, Claustre H, Freeman S A, Stramski D and Huot Y. 2007. Optical backscattering properties of the “clearest” natural waters. *Biogeosciences*, 4(6): 1041-1058 [DOI: 10.5194/bg-4-1041-2007]
- Tyler J E and Richardson W H. 1958. Nephelometer for the measurement of volume scattering function *in situ*. *Journal of the Optical Society of America*, 48(5): 354-357 [DOI: 10.1364/josa.48.000354]
- Wyatt P J. 1993. Light scattering and the absolute characterization of macromolecules. *Analytica Chimica Acta*, 272(1): 1-40 [DOI: 10.1016/0003-2670(93)80373-s]
- Xu C H and Li C. 2019. Progress of measurement technology and application of general-angle Volume Scattering Function of water. *Journal of Remote Sensing*, 23(6): 1078-1090 (徐聪辉, 李彩). 2019. 广角水体体散射函数测量技术及其应用研究进展. *遥感学报*, 23(6): 1078-1090 [DOI: 10.11834/jrs.20198078]
- Zhang X D, Lewis M, Lee M, Johnson B and Korotaev G. 2002. The volume scattering function of natural bubble populations. *Limnology and Oceanography*, 47(5): 1273-1282 [DOI: 10.4319/lo.2002.47.5.1273]
- Zhou W, Wang G F, Sun Z H, Cao W X, Xu Z T, Hu S B and Zhao J. 2012. Variations in the optical scattering properties of phytoplankton cultures. *Optics Express*, 20(10): 11189-11206 [DOI: 10.1364/oe.20.011189]

Research progress in the calibration method of the volume scattering function measurement technique

LIU Cong^{1,2}, LI Cai^{1,3}

1. State Key Laboratory of Tropical Oceanography, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510300, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 511458, China

Abstract: The Volume Scattering Function (VSF) is an important Inherent Optical Property (IOP) of seawater, which is a critical and fundamental parameter to describe the angular distribution of the scattering of incident light by water. In particular, the VSF has a significant importance in the field of ocean color remote sensing, atmosphere-sea interaction, eco-disaster alerting. Due to a strong directional distribution characterized by a large dynamic range in signal in the whole scatter directions and faint backscattering signal, the VSF measurement and calibration are complex and the research is still in the process of exploration and progress. In this paper, the research progress of calibration method and measurement technology of VSF has been summarized, and the development tendency of the VSF calibration method has been predicted.

Since the birth of the first backscattering *in situ* measurement instrument in the 1930s, the calibration methods of the VSF measurement improved gradually with the development of measurement techniques. There are three main methods for calibrating the VSF measurement: the first is based on the estimation of the scattering volume and the scattering flux, the second is based on a diffusing target throughout the sample volume to obtain the sensor response weighting function, and the third is based on the Mie theory and the standard solution or particles to obtain the sensor response weighting function. For the first calibration method, the scattering volume is generally calculated based on the optical and mechanical structures with the plausible assumptions, and the scattering flux can be obtained by the response of each scattering sensor to a Lambertian target as a function of distance, this method is limited in the range of angles due to the large error in the estimation of scattering volume of the forward small angle and the backward near 180°. For the second one, the core of this method is

the obtaining of the detector's weighting function, and it is not modeled by the structure parameters of the instrument, but accurately measured through the moving a diffusing target throughout the sample volume, this method can effectively solve the problems of difficult and inaccurate scatterer estimation, and it is more suitable for large backscattering with wide Field Of View (FOV). In addition, for the last one, based on standard materials with known physical features and Mie scattering or Rayleigh scattering, the scattering properties of standard materials can be calculated theoretically. The detector's weighting function or calibration coefficient is obtained by matching the measured original signals with the theoretical value. Using this method, the calibration process of the VSF measurement has been significantly simplified, and no longer constrained to the scattering angle range. It is clear that the precision of this method is positively related to the degree of perfection of the theoretical model and the parametric information of the standard substance.

With the gradual improvement in the understanding of the IOPs of water, and the increasing demand for in situ measurements, the VSF measurement technology and the calibrating precision are also constantly innovated and optimized. It can be anticipated that all above three main types of the VSF calibration methods or a variant combination of them will continue for a long period of time, while the calibration method based on standard matter and sensor response weighting function will play an important role in the future.

Key words: Volume Scattering Function (VSF), calibration techniques, Mie scattering, weighting function, Inherent Optical Property (IOP), ocean color remote sensing

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 41976181, 41976172, 41976170); Science and Technology Planning Project of Guangzhou City China (No. 201707020023); Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou) (No. GML2019ZD0305); Open Project Program of the State Key Laboratory of Tropical Oceanography (No. LTOZZ2003)