

引用格式: Jiang Lingling, Zhao Dongzhi, Wang Lin, *et al.* Methods and Research Progress on Backscattering Coefficient in the Water[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2013, 28(1): -. [姜玲玲, 赵冬至, 王林, 等. 水体后向散射特性研究进展[J]. 遥感技术与应用, 2013, 28(1): -.]

水体后向散射特性研究进展

姜玲玲¹, 赵冬至², 王 林², 王 祥^{1,2}

(1. 大连海事大学环境科学与工程学院, 辽宁 大连 116026;

2. 国家海洋环境监测中心, 辽宁 大连 116023)

摘要: 后向散射系数是水体重要的固有光学量之一, 是水色反演半分析模型的重要输入参数, 与水体组分有着密切关系。回顾了近年来国内外有关水体后向散射特性的研究进展, 主要包括纯水、浮游植物和悬浮泥沙等无机颗粒物的后向散射特性, 以及不同颗粒物的后向散射光谱变化性等。此外, 还阐述了后向散射系数的理论基础和测量方法, 并探讨了影响水体后向散射特性的影响因子, 最后提出了水体后向散射的研究方向和发展前景。

关 键 词: 后向散射系数; 水色反演; 固有光学量; 水体组分

中图分类号: P 733. 3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2013)01-0-07

1 引 言

后向散射系数(b_b)是水色遥感的一个重要基础光学参数, 其大小只与水体中各组分的浓度有关, 是重要的固有光学量之一。水体的后向散射系数在光学遥感的海洋学应用方面具有重要作用。水体后向散射信息由颗粒群密度、粒径以及折射率决定, 通过颗粒物后向散射系数即可推导颗粒群的粒度分布和构成等相关信息^[1-3]; 另外, 其与水体的遥感反射率 $R(\lambda)$ 具有密切联系, 只要建立两者的关系模型, 便可通过 $R(\lambda)$ 直接反演水体组分, 为水色组分浓度的遥感反演奠定了基础^[4]。由此可见, 水体后向散射性质对于海洋光学研究、水色组分遥感研究以及海洋生物地球化学研究等均具有重要意义和价值。

2 后向散射系数的理论基础

后向散射系数是体散射函数 $\beta(\theta)$ 散射角 (θ) 对后向半球的积分, 依据积分中值定理, 有:

$$b_b = 2\pi \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} \beta(\theta) \sin(\theta) d\theta \quad (1)$$

Mie 散射理论是经典的光散射理论之一, 也是颗粒物散射和体散射函数研究的重要理论基础之一。Mie 理论为 1908 年德国科学家 G. Mie 基于麦克斯韦方程组和边界条件给出的球形颗粒散射的精确解, 在此基础上, 得出对于等粒径的多颗粒群而言, 颗粒群的体散射函数 $\beta(\theta)$ 可以表示为:

$$\beta(\theta) = \frac{N}{V} i(\theta) \frac{\lambda^2}{4\pi^2} \quad (2)$$

其中: V 为悬浮液体积, N 为等效颗粒数, $i(\theta)$ 为散射光强。而对于多分散性颗粒群的后向散射系数可表示为:

$$b_b = \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} Q_{bs}(\lambda, D, m) (\pi D^2 / 4) F(D) dD \quad (3)$$

其中: $Q_{bs}(\lambda, D, m)$ 为颗粒物后向散射效率(其中 D 为颗粒物几何粒径; 颗粒物复折射率 m 由实部和虚部构成, 可表示为: $m = n - in'$), $F(D)$ 为粒度分布函数^[5]。由于 Mie 理论建立的前提假定颗粒为均匀、球形, 而实际的颗粒, 如浮游植物细胞、有机颗粒物等不能满足均匀球形的条件, 为此分层颗粒的散射模型在此基础上得到很大发展, 如 Aden-KerKer

收稿日期: 2012-01-30; 修订日期: 2012-09-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(40876091), 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2011QN143)资助。

作者简介: 姜玲玲(1980—), 女, 吉林白山人, 讲师, 博士研究生, 主要从事海洋生态遥感研究。E-mail: jll5@163.com。

通讯作者: 赵冬至(1964—), 男, 辽宁辽阳人, 研究员, 主要从事赤潮、溢油、水质和海洋生态环境的水色卫星遥感与 GIS 相关技术研究。

E-mail: dzzhao@nmemc.gov.cn。

两层球形模型、三层球形模型等^[6-8],并广泛应用于藻类光学特性的模拟研究中。

3 后向散射系数的测量方法

后向散射光的测量是在小角度前向散射光测量的基础上发展起来的,随着后向散射特性研究的深入和测量技术的发展,后向散射测量的仪器也逐渐增多,主要分为多角度后向散射测量和固定角度后向散射测量。

3.1 多角度后向散射测量

多角度散射测量仪器早期是由 Tyler 和 Richardson 于 1958 年发明的,该仪器可以测量得到 $20^\circ \sim 170^\circ$ 的体散射函数。随后 Jerlov、Petzold 和 Kulenberg 设计出了可以测量 $10^\circ \sim 165^\circ$ 、 $10^\circ \sim 170^\circ$ 和 $8^\circ \sim 160^\circ$ 的多角度散射光的测量仪器^[9]。其测量原理是通过调整发射器和接收器的相对角度完成不同角度体散射函数 $\beta(\theta)$ 的测量。但是其仪器的接收器只能接收到一小部分水体散射的平行光束,而且角度不同,所接收的光的量也不同,因此在实际应用中测量误差相对较大;同时由于前人设计的仪器设备庞大,并且具有能耗高、获取同步测量数据时间长等缺点,很难用于现场测量。进入 21 世纪,随着海洋光学的发展和测量技术的提高,多角度散射测量仪器得到了快速发展,主要有两种类型:一种是多光谱体散射函数测量仪(MVSM),可测得多个波段 $0.6^\circ \sim 177.9^\circ$ 的散射光,其测量原理不同于传统的多角度散射测量仪器,其发光源和接收器是固定的,测量角度的变化是通过调整潜望棱镜的角度来实现;另一种是固定波段多角度散射测量仪器(MASCOT),可获得某个固定波段 $10^\circ \sim 170^\circ$ 的散射光,上述仪器测量的数据通过曲线拟合并外推至整个后半球范围进行积分(式 1),便可计算得到后向散射系数 b_b ^[10]。这两种仪器的问世开启了多角度散射测量的新纪元,并且近年来成功应用于后向散射的现场测量研究。

3.2 固定角度后向散射测量

为了直接获得后向散射系数,固定角度后向散射测量得到了较快的发展。目前,商业化程度较高的是美国 Hobilabs 公司生产的 6 通道后向散射仪(HydroScat-6 Spectral Backscattering Sensor, HS-6)和 Wetlabs 公司的散射仪 ECO-BB3(3 个光谱通道)、ECO-BB9(9 个光谱通道)。它们的测量原理基本相同,如图 1 所示^[11],但是 HS-6 测量的是 140° 的

散射光,而 BB3 和 BB9 测量的是 117° 的散射光,测得的值通过式(4)计算求得体散射函数 $\beta(\theta)$ 。

$$\phi_\beta = \phi_0 g_\beta \int_0^\infty \beta(\lambda, \theta) W(z, c) dz \quad (4)$$

其中: ϕ_β 为接收到的光的通量, ϕ_0 为发射窗口的光的通量, g_β 为增益率, W 为权函数,只与仪器结构(含仪器的电路结构)有关,由式(4)可以看出, g_β 和 W 可以通过对仪器定标获得, g_β 和 W 可以通过对仪器定标获得,通过测得的 ϕ_β 和 ϕ_0 就可以得到 $\beta(\theta)$,再通过式(5)得到水体后向散射系数 b_b ^[12]。

$$b_b(\lambda) = 2\pi\chi_p(\theta)\beta_p(\lambda, \theta) \quad (5)$$

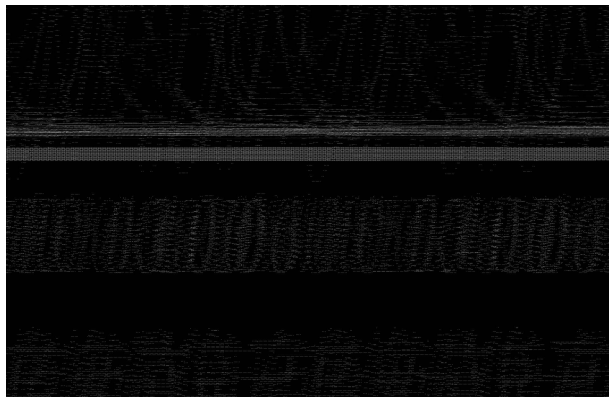


图 1 固定角度后向散射测量仪器测量原理
Fig. 1 Optical geometry for a generic fixed-angle backscattering sensor

由图 1 可以看出,HS-6 和散射仪关于后向散射测量角度是有差异的,这也是许多学者近年来探讨的热点,但是 Boss 和 Pegau 通过 Mie 散射计算发现,如果去除水体的后向散射, $110^\circ \sim 150^\circ$ 之间任何角度的 $\beta(\theta)$ 都可以准确地估算颗粒物后向散射系数,并且估算误差不超过 10%^[13],因此在测量结果上二者差异并不大。

4 水体的后向散射特点及影响因子关系研究

通常自然水体的后向散射表示为:

$$b_b(\lambda) = b_{bw}(\lambda) + b_{bp}(\lambda) \quad (6)$$

其中: $b_b(\lambda)$ 为后向散射系数,下标 w 、 p 分别代表纯水和颗粒物。

可见,水体的后向散射系数是由纯水后向散射系数 $b_{bw}(\lambda)$ 和颗粒物后向散射系数 $b_{bp}(\lambda)$ 构成的。

4.1 纯水的后向散射特性

Morel 和 Shifrin 最早对纯海水(盐度为 35‰ ~ 39‰)的后向散射系数进行了理论计算,结果表明

其后向散射比率 $b'_{bw}(\lambda) = b_{bw}/b_w = 0.5$ (其中 b_w 为水分子总散射系数), 并且 $b_{bw}(\lambda)$ 可以通过 $\lambda^{-4.32}$ 直接估测。Morel、Smith 和 Baker 还列表给出了不同波段纯海水的后向散射系数值, 如 $b_{bw}(\lambda)$ 在 400 nm 为 0.0038 m^{-1} , 而在 700 nm 则降为 0.00035 m^{-1} , 并且该研究成果一直沿用至今^[13]。尽管后来 Bu-iteveld 等重新计算了纯水的后向散射系数, 但由于没有考虑盐分的影响, 所以并没有得到广泛的应用。由此后来人们普遍认为纯水的后向散射为常数且相对较小, 对自然水体总后向散射系数的变化影响较小。因此, 研究人员将更多的目光集中在水体颗粒物后向散射特性研究上。

4.2 水体颗粒物后向散射特性

4.2.1 水体悬浮颗粒物后向散射特性

悬浮颗粒物作为海水的主要组成成分对海水的光学特性有着重要作用, 因此为了更清楚地认识其后向散射特性, 学者们普遍基于 Mie 理论针对不同粒径、不同折射率的悬浮颗粒物的后向散射特性进行了模拟, 如 Stramski 和 Kiefer^[5]通过对均匀球形颗粒物后向散射特性模拟研究发现, 粒径小且折射率高的颗粒物对后向散射的贡献相对较大; 我国学者周雯等^[14]在对海水中矿物颗粒物的后向散射特性模拟研究中得到了相似的结论, 并认为颗粒群中小于 $1 \mu\text{m}$ 的粒子是主要的后向散射源; 此外, Stramski^[15]对水体总悬浮颗粒物的后向散射特性进行了理论模拟, 结果发现矿物颗粒物的平均后向散射系数值是有机颗粒物的 30 倍之多。可见, 悬浮泥沙等无机颗粒物是水体后向散射的主要来源, 而且水体后向散射特征随颗粒群构成的不同而改变。

与此同时, 国外许多学者分别对悬浮颗粒物后向散射系数的光谱特性进行了模拟研究, 并普遍认为悬浮颗粒物后向散射系数光谱模型满足如下一种指数关系^[16-18]:

$$\frac{b_{bp}(\lambda)}{b_{bp}(\lambda_0)} = \left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right)^n \quad (7)$$

其中: λ_0 为参考波长, 实验结果表明, 在 550 nm 处, 颗粒物的吸收很弱, 并且可以被忽略, 因此通常取 550 nm 作为参考波长; n 为散射波长变化的指数, 与水体中悬浮颗粒物浓度及组成成分有关。

在此基础上, 我国学者对不同水体中的悬浮颗粒物后向散射系数光谱模型进行了相关研究, 宋庆君等^[19]对黄东海海区后向散射特性研究时, 得到光谱模型平均指数 n 在 0.61 ~ 1.99 之间变化, 平均值

大约为 1.146, 且在低悬浮物浓度情况下, n 值与悬浮物浓度具有很好的指数关系, 而当悬浮物浓度大于 3.4 mg/L 时, n 值趋向稳定, 该模型在东海赤潮高发区的色素浓度反演中得到了应用。孙德勇等^[20-21]分别对太湖水体和巢湖水体进行了研究, 得到的指数分别为 3.06 和 3.24, 明显高于前者, 主要是由于内陆水体的悬浮物浓度要高于黄东海海域导致的。可见, 不同水体中后向散射系数光谱模型的斜率指数 n 是存在较大变化的, 这主要是由于水体中颗粒物的组成相异造成的。通过 n 值, 就可建立水体中颗粒物后向散射系数的光谱模型, 通过该模型即可反演水体的悬浮颗粒物分布情况。上述研究在一定程度上促进了我国沿海和内陆湖泊水体散射特性的参数化进展, 同时也为推断水体组分浓度分布提供了重要的科学依据。

4.2.2 水体悬浮颗粒物后向散射比率研究

颗粒物后向散射比率 b'_{bp} 是颗粒物后向散射系数 b_{bp} 与散射系数 b_p 的比值 (即 $b'_{bp} = b_{bp}(\lambda)/b_p(\lambda)$), 在海洋光学研究中发挥着重要作用, 一方面是由于后向散射比率估算的颗粒散射相函数是水体辐射传输方程的关键输入参量之一; 另外, 后向散射比率的变化还包含了水体颗粒的组分及级级信息, 如 Ulloa 等^[1]基于 Mie 理论分析提出后向散射比率取决于颗粒群中大粒子和小粒子的相对比例, 即小粒径颗粒所占的比例越大, 后向散射比率就越大; Stramski 和 Kiefer^[5]通过模拟得出了相同的结论, 同时发现该值随着水中高折射性颗粒物比例的增加而增大; Twardowski 等^[3]基于后向散射比率和粒径分布建立了折射率估算模型。由此, 水体后向散射比率研究得到越来越多的关注。因此, 许多研究人员拟通过后向散射比率的变化范围来确定水体的颗粒物组成, 但是由于水体类型多样、水体构成复杂, 研究方法和测量方法存在差异, 因此目前尚无统一论。

此外, 有关后向散射比率的光谱变化一直是学者们关注的重点。早期研究人员认为后向散射比率是一定值, 如 Petzold^[22]对几种典型水体的后向散射率进行研究发现, 圣地亚哥港湾的混浊水体结果为 0.019, 沿海海域水体为 0.013, 清洁的开阔海洋水体为 0.044。后来, MacDonald 等^[23]通过实测数据发现, California 湾水体的颗粒后向散射比率波长间变化不到 10%; Chami 等^[24]采用固定平台获取的实测数据, 发现黑海水体在 443、490 和 555 nm 波段

的后向散射比率变化不到 4%;而 Aas 等^[25]对奥斯陆海湾研究发现后向散射比率在 412~665 nm 波段间的取值范围为 0.018~0.022,并认为后向散射比率是波长的幂函数,可以通过 λ^{-n} 来估测。鉴于人们对颗粒物后向散射比率的研究结论存在分歧,Whitmire 等^[26]基于 5 个航次的数据进行分析,并且该数据覆盖了不同的水体类型,结果发现各航次的后向散射比率光谱形状存在一定差异,但后向散射比率光谱变化性并不明显,变化范围介于 4%~10%之间,这与 MacDonald 和 Chami 研究结论基本吻合。而我国学者近年来也做了大量相关研究工作,如李铜基等^[27]通过对黄东海实验研究得出黄东海海区总悬浮颗粒物后向散射比率 b'_{bp} 介于 0.01~0.05 之间,对波长的依赖性很小;周雯等^[28]通过对大亚湾水体后向散射比率研究得出: b'_{bp} 在 660 nm 的变化范围在 0.0040~0.0245 之间,且实测的后向散射比率光谱波段间相对变化约为 15%;而孙德勇、马荣华等^[20-21,29]则在太湖和巢湖水体研究中发现,后向散射比率可通过波长的幂函数来表示,该结论恰又与 Aas 等的研究结论相似。到目前为止,不同学者关于后向散射比率光谱变化性仍无统一论,为了解决这个矛盾,还需要大量的现场实测数据对颗粒物后向散射比率光谱变化进行深入研究。

4.3 浮游植物的后向散射特性

颗粒物的后向散射大部分是由小尺寸的有机碎屑和矿物颗粒物产生的,仅有一小部分是浮游植物和微生物产生的。但是对于以浮游植物为后向散射主体的富营养水体和赤潮水体而言,情况则大不相同。因此浮游植物后向散射特性也备受国内外学者的关注,基于 Mie 理论的研究发现,浮游植物的粒径大小、细胞色素组分及浓度等都会显著影响其后向散射特性^[30-31],后来学者们又发现细胞结构也是影响浮游植物光学特性的重要因素之一,并基于两层、三层球形模型对藻细胞的后向散射特性进行模拟^[7,32]。由于理论推导往往存在一定的局限性,近些年,随着散射测量仪器的发展,许多学者通过大量现场试验获得浮游植物细胞的后向散射光谱,如 Volten 等^[33]对 15 种沿岸和内陆水体浮游植物在 633 nm 处的体散射相函数进行了详细的测量,结果发现 120°处后向散射值最小。Vaillancourt 等^[34]测量了 12 个藻属类别的 29 种海洋浮游藻类的后向散射系数,并针对每个藻种绘制了后向散射光谱变化图;Whitmire 等^[26]利用 HS-6 和 AC9(9 通道双光

路吸收系数与光束衰减系数测量仪)对 3 个藻属类别的 15 种藻类的后向散射光谱和吸收光谱进行测量,发现每种藻类具有独特的后向散射光谱,且后向散射光谱曲线变化平缓,同时发现鞭毛藻类与沟鞭藻类在蓝光波段的后向散射光谱与吸收光谱有很强相关性(相关系数分别为 $R^2 = 0.93$ 和 $R^2 = 0.99$),即鞭毛藻类的后向散射系数曲线斜率随吸收的增强而增大,而沟鞭藻类则与其相反;对于硅藻类而言,其后向散射光谱曲线和吸收系数光谱曲线几乎没有相关性($R^2 = 0.25$)。这个结论颠覆了人们一致认可的颗粒物的后向散射系数变化斜率与吸收系数变化斜率密切相关的想法,可见关于藻类的后向散射特性,尤其是藻类后向散射特性与其吸收特性的关系还需要大量的现场实验数据来确定。

上述研究为探寻富营养水体和赤潮水体的后向散射特性提供了理论依据,并为日后赤潮水体的遥感反演和藻种识别奠定了良好的理论基础。

4.4 水体颗粒物后向散射与叶绿素浓度关系研究

在开阔大洋的水体中,叶绿素 a 是海洋中重要的水色组分之一,而后向散射系数与水色组分有着密切联系,因此许多学者开始研究颗粒物后向散射系数和叶绿素浓度之间的关系,试图通过叶绿素浓度建立后向散射系数的遥感反演算法。如 Morel 和 Maritorena^[2]得出大洋一类水体,后向散射比率变化不大,并且与叶绿素浓度存在如下关系:

$$b'_{bp} = 0.002 + 0.01(0.50 - 0.25 \lg[\text{Chl}]) \quad (8)$$

其中:叶绿素浓度变化范围为 $0.01 \sim 10 \text{ m} \cdot \text{gm}^{-3}$;而 Whitmire 等^[26,35]通过对一类水体的研究分别得出 $b'_{bp}(532) = 0.0096[\text{Chl}]^{-0.253}$ 和 $b'_{bp}(555) = 0.0074[\text{Chl}]^{-0.042}$,结果表明后向散射比率对叶绿素并没有很强的依赖性;而 Stramska 等^[36]在对北太平洋的研究中发现,后向散射比率随叶绿素浓度的增加而增大,并认为两者之间的关系随着季节变化而不断变化。从中发现,尽管都是一类大洋水体,但是它们的关系并不确定,这主要是由于上述研究中颗粒物的后向散射特性都是基于 Mie 理论估算而来,并且对叶绿素浓度的要求也比较严格,因此得出的结论具有一定的局限性,鉴于此,Huot 和 Morel 对南太平洋的东部 8 000 km 长海域进行跟踪监测和研究,并采用 HS-6 对大洋的后向散射系数测量,得出如下结果:

$$b_{bp}(\lambda) = \alpha(\lambda)[\text{Chl}]^{\beta(\lambda)} \quad (9)$$

其中:

$$\alpha(\lambda) = 0.005049 - 5.058E - 6\lambda$$

$$\beta(\lambda) = 0.283 + 0.000434\lambda$$

波长范围在 420~650 nm 之间^[37],通过现场实验测量发现,一类水体中颗粒物的后向散射系数和叶绿素浓度之间存在一定的相关性,但是该结论并没有得到广泛的应用和证明,因此为了更准确地建立二者的关系还需要大量的现场实验和测量。

5 结 语

综上所述,国内外相关领域学者对颗粒物的后向散射特性研究做了很多工作,为海洋光学发展做出了巨大贡献,使颗粒物后向散射系数成为揭示水体颗粒物浓度分布及组成的重要途径,然而关于颗粒物后向散射贡献方面仍存在一些亟待解决的问题。

(1) 目前,关于悬浮泥沙等无机颗粒物的后向散射特性研究已趋于成熟,而关于浮游藻类的后向散射光谱特性研究还非常有限,由于近年来国内外近岸赤潮频发,赤潮藻类丰富多样,而且水体后向散射与水体组分又具有密切联系,因此探寻浮游藻类的后向散射特性可为赤潮藻种的遥感识别及两类水体水色算法精度提高提供依据。

(2) 在研究颗粒物后向散射概率光谱变化时,许多学者持有不同观点,一方面是由于研究方法不同;另一方面,目前许多学者根据实测数据的研究结果不能覆盖各种水体类型,导致他们的研究结论存在分歧。因此在研究后向散射概率光谱变化时,还需要大量的实测数据、模型方法,为日后通过颗粒物后向散射概率反演颗粒物粒径分布奠定了基础。

(3) 在研究水体后向散射与叶绿素浓度关系时,研究人员把焦点都集中在一类水体当中,但是在以浮游藻类为后向散射主体的富营养水体和赤潮水体中,后向散射和叶绿素浓度之间是否存在联动制约关系,目前还尚无定论,因此今后还需要进行更深入的研究,以期对赤潮水体的遥感反演奠定良好的理论基础。

随着遥感技术的不断发展,光学测量仪器不断进步,以及相应的有关水色组分后向散射遥感模型的不完善,后向散射在水色组分反演中将会具有更广阔的应用前景。

参考文献 (References):

[1] Ulloa O, Sathyendranath S, Platt T. Effect of the Particle-size

Distribution on the Backscattering Ratio in Seawater[J]. Applied Optics, 1994, 33(30): 7070-7077.

- [2] Morel A, Maritorena S. Bio-optical Properties of Oceanic Waters: A Reappraisal[J]. Journal of Geophysical Research, 2001, 106(C4): 7763-7780.
- [3] Twardowski M S, Boss E, Macdonald J B, *et al.* 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[J]. Journal of Geophysical Research, 2001, 106(C7): 14129-14142.
- [4] Budhiman S, Salama M S, Vekerdy Z, *et al.* Deriving Optical Properties of Mahakam Delta Coastal Waters, Indonesia Using in Situ Measurements and Ocean Color Model Inversion[J]. Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2012, 68(1): 157-169.
- [5] Stramski D, Kiefer D A. Light Scattering by Microorganisms in the Open Ocean[J]. Progress in Oceanography, 1991, 28(4): 343-383.
- [6] Quinby-Hunt M S, Hunt A J, Lofftus K, *et al.* Polarized-light Scattering Studies of Marine Chlorella[J]. Limnology and Oceanography, 1989, 34(8): 1587-1600.
- [7] Kitchen J C, Zaneveld R J V. A Three-layered Sphere Model of the Optical Properties of Phytoplankton[J]. Limnology and Oceanography, 1992, 37(8): 1680-1690.
- [8] Zhou Wen. Theoretical Modeling on Light Scattering Properties of Phytoplankton[D]. Guangzhou: Chinese Academy of Sciences, 2008. [周雯. 浮游植物光散射特性理论模拟[D]. 广州: 中国科学院南海海洋研究所, 2008.]
- [9] Kirk J T O. Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems[M]. New York: Cambridge University Press, 2011.
- [10] Li C, Cao W X, Yu J, *et al.* An Instrument for In-situ Measuring the Volume Scattering Function of Water: Design, Calibration and Primary Experiments[J]. Sensors, 2012, 12: 4514-4533.
- [11] Maffione R A, Dana D R. Instruments and Methods for Measuring the Backward-scattering Coefficient of Ocean Waters[J]. Applied Optics, 2007, 36(4): 6057-6067.
- [12] Gu Yanzhen, Liu Yuguang, Xiu Peng, *et al.* HydroScat-6 Spectral Backscattering Sensor[J]. Meteorological Hydrological and Marine Instruments, 2008, (2): 1-4. [顾艳镇, 刘玉光, 修鹏, 等. 6 通道后向散射仪[J]. 气象水文海洋仪器, 2008, (2): 1-4.]
- [13] Stramski D, Boss E, Bogucki D, *et al.* The Role of Seawater Constituents in Light Backscattering in the Ocean[J]. Progress in Oceanography, 2004, 61: 27-56.
- [14] 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.]
- [15] Stramski D, Bricaud A, Morel A. Modeling the Inherent Optical Properties of the Ocean based on the Detailed Composition of the Planktonic Community[J]. *Applied Optics*, 2001, 40: 2929-2945.
- [16] Kopelevich O V. Small-parameter Model of Optical Properties of Seawater[M]. Moscow: Nauka Pub, 1983.
- [17] Mobley C D. *Light and Water: Radioactive Transfer in Natural Waters*[M]. San Diego: Academic Press, 1994: 117-119.
- [18] Lee Z P, Carder K L, Arnone R A. Deriving Inherent Optical Properties from Water Color: A Multiband Quasi-analytical Algorithm for Optically Deep Waters[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(27): 5755-5772.
- [19] Song Qingjun, Tang Junwu. The Study on the Scattering Properties in the Huanghai Sea and East China Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2006, 28(4): 56-63. [宋庆君, 唐军武. 黄东海海区水体散射特性研究[J]. *海洋学报*, 2006, 28(4): 56-63.]
- [20] Sun Deyong, Li Yunmei, Le Chengfeng, *et al.* Scattering Characteristics of Taihu Lake and Its Relationship Models with Suspended Particle Concentration[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(12): 2688-2694. [孙德勇, 李云梅, 东成峰, 等. 太湖水体散射特性及其与悬浮物浓度关系模型[J]. *环境科学*, 2007, 28(12): 2688-2694.]
- [21] Sun Deyong, Li Yunmei, Wang Qiao, *et al.* Scattering and Backscattering Characteristics of Lake Chaohu[J]. *Environmental Science*, 2010, 31(6): 1428-1434. [孙德勇, 李云梅, 王桥, 等. 巢湖水体散射和后向散射特性研究[J]. *环境科学*, 2010, 31(6): 1428-1434.]
- [22] Petzold T J. *Volume Scattering Functions for Selected Ocean Waters*[M]. San Diego: Scripps Institution of Oceanography, 1972.
- [23] Macdonald J B, Twardowski M S, Pegau W S, *et al.* Characterization of Spectral Backscattering in the Gulf of California[J]. *AGU Publications*, 2000, 80: 24-28.
- [24] Chami M, Shybanov B, Churlova T Y, *et al.* Optical Properties of the Particles in the Crimea Coastal Waters (Black Sea)[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110(C11020): 1-17.
- [25] Aas E, Høkedal J, Sørensen K. Spectral Backscattering Coefficient in Coastal Waters[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2005, 26(2): 331-343.
- [26] Whitmire A L, Boss E, Cowles T J, *et al.* Spectral Variability of the Particulate Backscattering Ratio[J]. *Optics Express*, 2007, 15: 7019-7031.
- [27] Liu Wei, Li Tongji, Zhu Jianhua, *et al.* Study of Scattering Properties of Total Suspended Matter in the Yellow Sea and East China Sea[J]. *Ocean Technology*, 2007, 26(2): 42-46.
- [刘炜, 李铜基, 朱建华, 等. 黄东海海区总悬浮物散射特性研究[J]. *海洋技术*, 2007, 26(2): 42-46.]
- [28] Zhou Wen, Cao Wenxi, Yang Yuezhong, *et al.* Spectral Variability of Particulate Backscattering Ratio in the Daya Bay[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2010, 29(2): 39-45. [周雯, 曹文熙, 杨跃忠, 等. 大亚湾水体后向散射比率的光谱变化[J]. *热带海洋学报*, 2010, 29(2): 39-45.]
- [29] Ma Ronghua, Song Qingjun, Li Guoyan, *et al.* Estimation of Backscattering Probability of Lake Taihu Waters[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2008, 20(3): 375-379. [马荣华, 宋庆君, 李国砚, 等. 太湖水体的后向散射概率[J]. *湖泊科学*, 2008, 20(3): 375-379.]
- [30] Zhou Wen, Cao Wenxi, Li Cai. Light Absorption and Scattering Properties of Phytoplankton: A Theoretical Modeling[J]. *Optical Technique*, 2007, 33(2): 177-180. [周雯, 曹文熙, 李彩. 浮游植物的吸收和散射特性: 理论模型[J]. *光学技术*, 2007, 33(2): 177-180.]
- [31] Zhou Wen, Cao Wenxi, Li Cai, *et al.* Spectral Scattering Property of Phytoplankton Calculated by Absorption Coefficient and Size Distribution[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(8): 1429-1433. [周雯, 曹文熙, 李彩, 等. 由吸收系数和粒度分布计算浮游植物的散射光谱特征[J]. *光学学报*, 2008, 28(8): 1429-1433.]
- [32] Zhou Wen, Cao Wenxi, Li Cai, *et al.* Effects of Algal Cell Structure on the Optical Properties of Phytoplankton[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2010, 29(2): 33-38. [周雯, 曹文熙, 李彩, 等. 细胞结构对浮游植物光学特性的影响[J]. *热带海洋学报*, 2010, 29(2): 33-38.]
- [33] Volten H, De Haan J F, Hovenier J W, *et al.* Laboratory Measurements of Angular Distributions of Light Scattered by Phytoplankton and Silt[J]. *Limnology and Oceanography*, 1998, 43(6): 1180-1197.
- [34] Vaillancourt R D, Brown C W, Guillard R R, *et al.* Light Backscattering Properties of Marine Phytoplankton: Relationships to Cell Size Chemical Composition and Taxonomy[J]. *Journal of Plankton Research*, 2004, 26(2): 191-212.
- [35] Twardowski M S, Claustre H, Freeman S A, *et al.* Optical Backscattering Properties of the "Clearest" Natural Waters[J]. *Biogeosciences*, 2007, 4(6): 1041-1058.
- [36] Stramska M, Stramski D, Kaczmarek S, *et al.* Seasonal and Regional Differentiation of Bio-optical Properties within the North Polar Atlantic[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111(C08003): 1-16.
- [37] Huot Y, Morel Y, Twardowski M, *et al.* Particle Optical Backscattering Along a Chlorophyll Gradient in the Upper Layer of the Eastern South Pacific Ocean[J]. *Biogeosciences*, 2008, 5: 495-507.

Methods and Research Progress on Backscattering Coefficient in the Water

Jiang Lingling^{1,2}, Zhao Dongzhi², Wang Lin², Wang Xiang^{1,2}

(1. *College of Environment Science and Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;*
2. *National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China*)

Abstract: The spectral backscattering coefficient is one of the important inherent optical properties, and also is an important input parameter of water color quasi-analytical inversion model. It is highly related to the concentration of water constituents in the water. This study reviews the progress in the water backscattering that includes the backscattering properties of water, various phytoplankton and other suspended inorganic particles, at the same time, this paper also discusses the backscattering spectral variation of the different particles. Otherwise, this study describes the theoretical basis and the way how to achieve the backscattering coefficient, systematically analyzes the variation characteristics of particulate backscattering coefficient and backscattering ratio, and finds that particle-size distribution and average particle refractive index are the main influencing factors. In order to know if the chlorophyll concentration influence the water backscattering properties, the relationship between them is discussed in the paper. Finally, the future development perspective and research fields are proposed.

Key words: Backscattering coefficient; Water inversion model; Inherent optical properties; Water constituents