

巢湖水体散射和后向散射特性研究

孙德勇, 李云梅*, 王桥, 吕恒, 乐成峰, 杨煜, 金鑫, 王彦飞

(南京师范大学教育部虚拟地理环境重点实验室, 南京 210046)

摘要:湖泊水体散射特性的研究对湖泊水色要素遥感反演模型的发展具有重要的意义. 本研究利用 AC-S 和 ECO-BB9 实测了巢湖水体的散射系数和后向散射系数, 在分析光谱变化特性的基础上, 构建了悬浮颗粒物散射系数和后向散射系数的幂函数光谱模型, 获得的光谱指数分别为 0.86 和 3.24. 研究发现悬浮颗粒物散射系数与 TSM 和 ISM 都存在较好的线性函数关系, 进而提出水体中总悬浮颗粒物的比散射系数为 $0.6364 (10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{mg}^{-1})$, 无机悬浮颗粒物的比散射系数为 $0.9108 (10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{mg}^{-1})$. 同时, 分析了悬浮颗粒物后向散射率和折射指数的变化, 其变化范围分别为 0.003~0.026 和 1.02~1.06.

关键词: 巢湖; 散射特性参数; 光谱特性; 悬浮颗粒物浓度

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2010)06-1428-07

Scattering and Backscattering Characteristics of Lake Chaohu

SUN De-yong, LI Yun-mei, WANG Qiao, LÜ Heng, LE Cheng-feng, YANG Yu, JIN Xin, WANG Yan-fei

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

Abstract: Lake scattering characteristics are of great significance for remotely-sensed retrieval model development. In this study, scattering and backscattering coefficients of Lake Chaohu were observed through AC-S and ECO-BB9 meters, and their spectral properties were correspondingly analyzed. Then Power function is utilized to model particulate scattering and backscattering spectra, and spectral slope parameters obtained by simulation are 0.86 and 3.24, separately. The proposed scattering and backscattering models present relatively low predicative errors. Particulate scattering coefficients are closely related to TSM and ISM, with corresponding correlative coefficients of 0.91 and 0.94. Their relationships can be simulated well through linear function, and further specific scattering coefficients of TSM and ISM were proposed to be $0.6364 (10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{mg}^{-1})$ and $0.9108 (10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{mg}^{-1})$. In addition, particulate backscattering ratio in Lake Chaohu has a variation range of 0.003-0.026, and refractive index varies from 1.02 to 1.06, which displays no large variation spans when compared with that in previous studies.

Key words: Lake Chaohu; scattering property parameters; spectral characteristic; suspended particulate concentrations

光在水体中传播主要发生 2 种物理过程, 即被吸收或散射, 它们是影响水色信息变化的根本因素. 水体的吸收特性和散射特性主要可以由吸收系数、散射系数、后向散射系数、体散射函数、散射相函数等进行表征, 这些参数只依赖于水体中介质的变化而变化, 与外界环境的光场变化无关, 所以被称为水体的固有光学特性^[1]. 近年来, 国内开展了较多的湖泊水体吸收特性的研究, 而对散射特性的研究则相对较为缺乏, 这在一定程度上阻碍了湖泊水色遥感分析模型的发展, 主要归因于 2 个方面: ① 散射作用是水体遥感光学信号产生的源动力, 水体中光子经散射作用朝向各个方向, 其中上行散射光子形成上行辐亮度, 上行辐亮度透过水面形成离水辐亮度, 进而被传感器接收记录为水体遥感光学信号^[2]; ② 后向散射系数表征了水体组分将光能散射到出水方向的能力, 它是遥感反演分析模型构建中最直接利用的固有光学量之一^[3,4]. 因此, 开展湖泊水体散射特性研究对深入理解湖泊水色信息的内在变化机制及水色要素遥感反演模型的发展都具有积

极的意义.

国外诸学者开展了较多的水体散射特性研究, 关注的内容主要包括散射特性参数的光谱特性、散射特性参数与水体组分浓度的关系、悬浮颗粒物后向散射率的变化特性等, 但这些研究主要针对的是大洋及海岸带水体^[5~7]. 在内陆的混浊湖泊水体中, 水体组成较海洋水体的复杂, 相应地, 其散射特性也可能与海洋水体有所差异, 从而针对特定的复杂湖泊水体, 需提出相应的散射特性的参数化模式.

本研究以内陆湖泊巢湖为例, 在实测散射系数和后向散射系数的基础上, 首次建立了巢湖水体散射特性参数的光谱变化模型, 分析了散射特性参数与水体组分浓度之间的关系, 并探讨了巢湖水体中悬浮颗粒物的后向散射率、折射指数和粒径大小分

收稿日期: 2009-08-03; 修订日期: 2009-10-14

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2008BAC34B05); 国家自然科学基金青年基金项目 (40701136); 江苏省 2008 年度普通高校研究生科研创新计划项目 (CX08B_015Z); 南京师范大学研究生优秀学位论文培育计划项目 (181200000220)

作者简介: 孙德勇 (1984 ~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为水环境遥感, E-mail: sundeyong1984@163.com

* 通讯联系人, E-mail: liyunmei@njnu.edu.cn

布参数的变化特征,以期为我国内陆湖泊水体散射特性变化的量化表达研究奠定基础。

1 材料与方法

1.1 研究区

本研究区为巢湖,其位于安徽省境内,属长江下游左岸水系,东西长 54.5 km,南北平均宽度 15.1 km,平均水深 4.5 m,面积约 820 km²[8]。近年来,随着沿湖经济的发展,工、农业及生活污水的排放,导致巢湖水体污染日益严重,已直接影响到人们正常的生产与生活[9]。本研究所采集的 23 个样点的分布如图 1 所示,在测量水体光学特性参数的同时,采集水样放入冷藏箱,并于当日送回实验室进行水体组分浓度的分析。

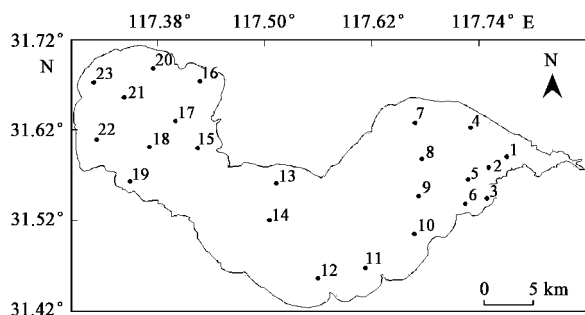


图 1 巢湖采样点分布

Fig. 1 Station distribution in Lake Chaohu

1.2 参数的测定

本研究所利用的参数包括:悬浮颗粒物的散射系数、悬浮颗粒物的后向散射系数、叶绿素 a 浓度、总悬浮颗粒物、无机悬浮颗粒物和有机悬浮颗粒物浓度。其中散射系数和后向散射系数分别通过 AC-S 和 ECO-BB9 (Wetlabs 公司生产)测得。具体仪器介绍及相应数据预处理方法可参见文献[10],在此不予赘述。

总悬浮颗粒物浓度的测量利用的是 0.45 μm 的 GF/F 滤膜,先进行烧膜处理,烧完后进行冷却。将冷却后的膜进行称重,将称重好的膜用来过滤水样,量取一定体积的水样,利用过滤器进行过滤,残留在膜上的物质就是总悬浮颗粒物,再进行烘干称重,用含有总悬浮颗粒物的膜的重量减去膜重就得到了总悬浮颗粒物的重量,利用总悬浮颗粒物的重量除以水样的体积,便得到了总悬浮颗粒物的浓度。对于有机悬浮颗粒物和无机悬浮颗粒物浓度采用常规的干燥、烘烤、称重的方法测定[11]。

叶绿素 a 浓度的测定采用热乙醇萃取分光光度法[12],用 GF/C 滤膜过滤水样,将滤膜置于冰箱中冷冻 48 h 以上,取出用 90% 的热乙醇萃取,然后在岛津 UV2401 分光光度计上测定 665、750 nm 处的吸光度,并加入 1 滴 1% 稀盐酸酸化,计算得到叶绿素 a 浓度。

1.3 悬浮颗粒物后向散射率、粒径大小分布参数和折射指数的计算

悬浮颗粒物后向散射率 $\bar{b}_{bp}$ 定义为其后向散射系数 b_{bp} 与散射系数 b_p 的比率,后向散射系数和散射系数可以通过仪器直接测得。悬浮颗粒物粒径大小分布参数 ξ 可以通过如式(1)进行计算[13]:

$$\xi = \gamma + 3 - 0.5 \exp(-6\gamma) \quad (1)$$

式中 γ 为悬浮颗粒物光束衰减系数 c_p 的光谱指数,具体可以通过式(2)模拟 c_p 光谱进行获取。

$$c_p(\lambda) = A\lambda^{-\gamma} \quad (2)$$

式中 A 为经验系数。值得说明的是, c_p 是通过 AC-S 实测的衰减系数减去黄质的吸收系数(通过室内分光光度计测得)获得的。

悬浮颗粒物折射指数 $\bar{n}_p$ 根据 Twardowski 提出的计算模型进行获取[14],具体如式(3):

$$\bar{n}_p = 1 + \bar{b}_{bp}^{0.5377 + 0.4867(\xi-3)^2} \cdot [1.4676 + 2.2950(\xi-3)^2] + 2.3113(\xi-3)^4 \quad (3)$$

1.4 数据分析方法

采用统计学软件 SPSS13.0 对各种参数进行描述性统计分析,包括计算最大值、最小值、均值、标准差、变异系数等,同时各参数之间的相关性分析、线性和非线性拟合、误差计算等也都由该软件参与完成。

2 结果与分析

2.1 悬浮颗粒物散射系数和后向散射系数的光谱特性

巢湖水体中悬浮颗粒物的散射系数光谱从短波到长波呈逐渐下降的趋势,光谱形状近似倾斜的直线(图 2),在 676 nm 附近散射系数出现略微的凹陷,此处对应着浮游植物色素的吸收峰位置。分别以蓝、绿和红光波段范围的代表波长 440、532 和 676 nm 为例,定量分析散射系数的变化。蓝光 $b_p(440)$ 的变化范围为 18.2 ~ 45.0 m⁻¹,平均值为 (31.5 ± 9.2) m⁻¹;绿光 $b_p(532)$ 的变化范围为 15.6 ~ 42.2 m⁻¹,平均值为 (27.6 ± 8.4) m⁻¹;红光 $b_p(676)$ 的变化范围为 11.6 ~ 35.7 m⁻¹,平均值为 (21.7 ± 7.0)

m^{-1} . 相比于散射系数, 水体中悬浮颗粒物的后向散射系数光谱从短波到长波呈现更为强烈的下降趋势 (图 3), 这可以通过下面光谱模型中的指数参数加以体现, 同时后向散射系数光谱在短波各样点呈现出一定的变化, 而在长波则表现得较为集中. 蓝光 $b_{bp}(440)$ 的变化范围为 $0.41 \sim 0.52 \text{ m}^{-1}$, 平均值为 $(0.45 \pm 0.03) \text{ m}^{-1}$; 绿光 $b_{bp}(532)$ 的变化范围为 $0.22 \sim 0.25 \text{ m}^{-1}$, 平均值为 $(0.23 \pm 0.01) \text{ m}^{-1}$; 红光 $b_{bp}(676)$ 的变化范围为 $0.11 \sim 0.11 \text{ m}^{-1}$, 平均值为 $(0.11 \pm 0.001) \text{ m}^{-1}$.

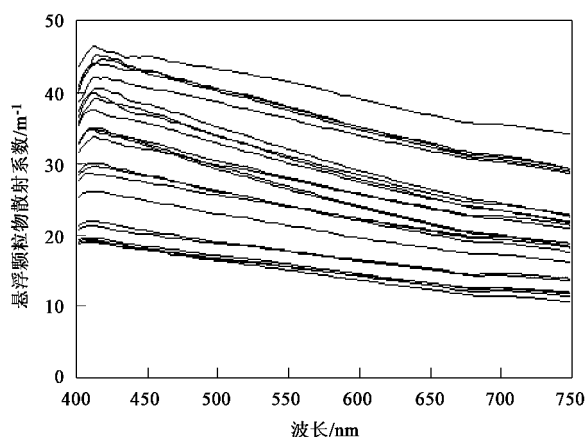


图 2 巢湖水体中悬浮颗粒物的散射系数光谱

Fig. 2 Particulate scattering spectra in Lake Chaohu

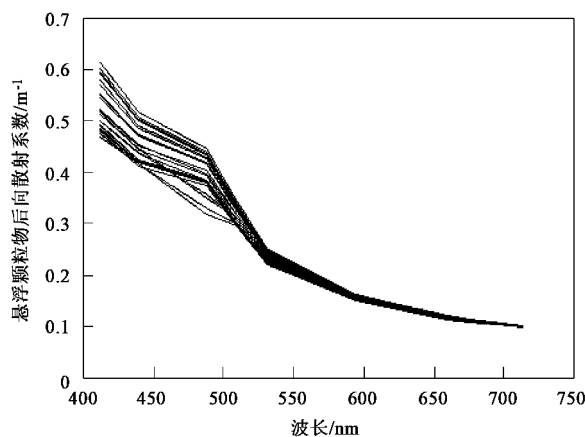


图 3 巢湖水体中悬浮颗粒物的后向散射系数光谱

Fig. 3 Particulate backscattering spectra in Lake Chaohu

为了模型化悬浮颗粒物的散射系数和后向散射系数光谱, 本研究以 532 nm 为参考波长, 首先用散射系数 $b_p(\lambda)$ 与 $b_p(532)$ 进行线性拟合, 拟合关系式为: $b_p(\lambda) = A(\lambda)b_p(532)$, 各波长拟合的决定系数 $R^2 \geq 0.997$, 然后利用获得的系数值 A 与波长

比值 λ/λ_0 进行幂函数拟合, 得到的指数为 -0.860 ($R^2 = 0.977$), 最终得到巢湖水体中悬浮颗粒物散射系数的光谱模型如式 (4). 通过相似的方法, 对悬浮颗粒物后向散射系数光谱进行模拟, 各波长线性拟合的 $R^2 \geq 0.997$, 幂函数拟合的 $R^2 = 0.968$, 得到的巢湖水体中悬浮颗粒物后向散射系数的光谱模型如式 (5). 利用平均相对误差绝对值 [MAPE, 公式 (6)] 对这 2 个光谱模型进行误差精度验证, 如图 4 所示, 后向散射系数光谱模型的最大 MAPE 为 21.9% , 出现在 488 nm , 其余波长都在 15% 以下; 散射系数光谱模型的 MAPE 绝大部分波长处均小于 10% . 由此可见, 这 2 个光谱模型整体上具有较低的预测误差, 可以较好地模拟巢湖水体散射系数和后向散射系数的光谱变化.

$$b_p(\lambda) = b_p(532) \left[\frac{\lambda}{532} \right]^{-0.86} \quad (4)$$

$$b_{bp}(\lambda) = b_{bp}(532) \left[\frac{\lambda}{532} \right]^{-3.24} \quad (5)$$

$$\text{MAPE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - y'_i}{y_i} \right| \quad (6)$$

式中, n 表示样本数量, y_i 为样本实测数值, y'_i 为样本预测数值.

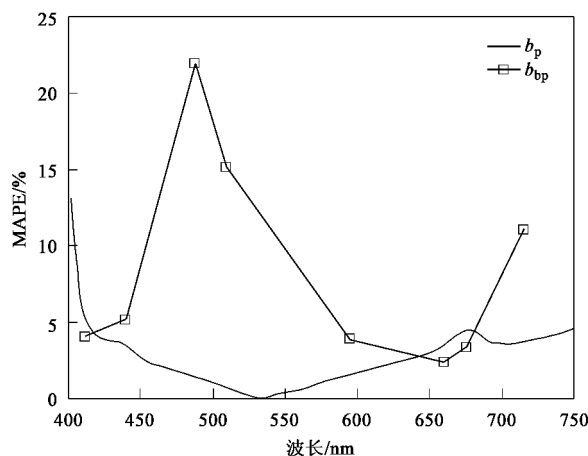


图 4 散射和后向散射系数光谱模型的误差验证

Fig. 4 Error analysis of scattering and backscattering models

诸多学者对不同水体中悬浮颗粒物后向散射系数光谱模型作过研究, 如宋庆君等^[15]对黄东海海区后向散射特性研究时, 得到的光谱模型的平均指数为 1.146 , 变化范围为 $0.61 \sim 1.99$; 孙德勇等^[10]对太湖水体研究时得到的指数为 3.06 ; 黄妙芬等^[16]对石油类污染水体的后向散射系数进行模拟时, 获得的平均指数为 0.87 , 变化范围为 $0.45 \sim 1.39$. 可见, 不同水体中后向散射系数光谱模型的斜率指数是存

在较大变化的,值得注意的是,内陆湖泊水体的指数相对较高,通常在 3.0 以上. 相比于悬浮颗粒物后向散射系数,构建散射系数光谱模型的研究并不多见,本研究利用幂函数模拟了巢湖水体中悬浮颗粒物散射系数光谱的变化,并取得了较好的模拟效果,这一定程度上促进了我国内陆湖泊水体散射特性的参数化进展.

2.2 散射特性参数与水体组分浓度的关系

表 1 列出了巢湖水体中悬浮颗粒物散射特性参数与水体组分浓度的相关系数. 由表 1 可知,散射系数 $b_p(532)$ 与 TSM 和 ISM 都存在很好的相关关系,相关系数 R 分别达到 0.91 和 0.94,而与 OSM 和 Chla 浓度则并不存在很高的相关性. 利用线性函数分别对散射系数与 TSM 和 ISM 之间的关系进行拟合,如图 5 所示,两组函数都获得了显著的拟合效果,得到如下的关系式:

$$b_p(532) = 0.6364 \text{ TSM} \tag{7}$$

$$(R^2 = 0.824, p < 0.001, n = 23)$$
$$b_p(532) = 0.6364 \text{ TSM} \tag{8}$$
$$(R^2 = 0.824, p < 0.001, n = 23)$$

因此,可以认为巢湖水体中总悬浮颗粒物的比散射系数为 $0.6364 (10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{mg}^{-1})$,无机悬浮颗粒物的比散射系数为 $0.9108 (10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{mg}^{-1})$. 相比之下,后向散射系数与悬浮颗粒物浓度并不存在较好的相关关系,其与 TSM 的相关性最大, R 为 0.53. 后向散射率与水体组分浓度都呈现出负相关关系,与 TSM 和 ISM 都存在较为显著的线性函数关系[图 6、式(9)和式(10)]. 同时发现后向散射率与 Chla 浓度不存在很好的相关性,这与之前的研究相一致^[6,17,18].

$$\bar{b}_{bp}(532) = -0.0002 \text{ TSM} + 0.0184 \tag{9}$$
$$(R^2 = 0.782, p < 0.001, n = 23)$$

$$\bar{b}_{bp}(532) = -0.0002 \text{ ISM} + 0.0176 \tag{10}$$
$$(R^2 = 0.874, p < 0.001, n = 23)$$

表 1 散射特性参数与水体组分浓度的相关系数

Table 1 Correlations between scattering parameters and water component concentrations

	$b_p(532)$	$b_{bp}(532)$	$\bar{b}_{bp}(532)$	TSM	ISM	OSM	Chla
$b_p(532)$	1						
$b_{bp}(532)$	0.53	1					
$\bar{b}_{bp}(532)$	-0.95	-0.36	1				
TSM	0.91	0.53	-0.88	1			
ISM	0.94	0.51	-0.94	0.97	1		
OSM	0.50	0.41	-0.45	0.74	0.55	1	
Chla	0.29	0.30	-0.29	0.57	0.39	0.86	1

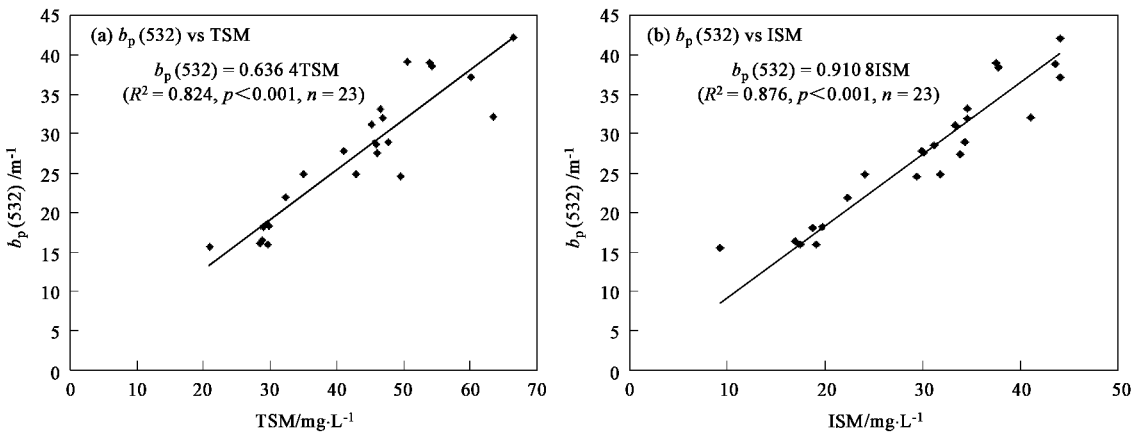


图 5 巢湖水体中悬浮颗粒物散射系数与悬浮颗粒物浓度的关系
Fig. 5 Relationships between particulate scattering coefficient and TSM, ISM

2.3 悬浮颗粒物后向散射率、折射指数和粒径大小分布

表 2 列出了巢湖水体中各波长悬浮颗粒物后向

散射率的变化,从短波到长波其呈现出逐渐递减的趋势,平均值从 412 nm 的 0.017 降低到 715 nm 的 0.005,同时发现各样点在不同波长处呈现出相似的

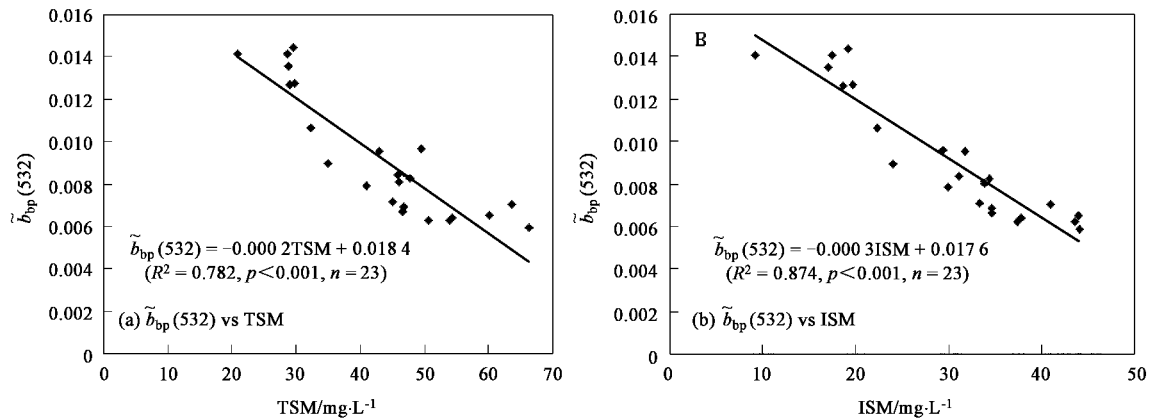


图 6 巢湖水体中悬浮颗粒物后向散射率与悬浮颗粒物浓度的关系
Fig. 6 Relationships between particulate backscattering ratio and TSM, ISM

表 2 巢湖水体中悬浮颗粒物后向散射率变化的描述性统计

Table 2 Descriptive statistics analysis of particulate backscattering ratios in Lake Chaohu

波长/nm	412	440	488	510	532	595	660	676	715
最小值	0.012	0.011	0.010	0.008	0.006	0.004	0.003	0.003	0.003
最大值	0.026	0.024	0.022	0.019	0.014	0.011	0.009	0.009	0.009
平均值	0.017	0.016	0.015	0.012	0.009	0.007	0.006	0.006	0.005
标准差	0.005	0.005	0.004	0.004	0.003	0.002	0.002	0.002	0.002
变异系数/%	29	30	27	32	32	33	34	34	34

变化幅度,各波长的变异系数均在 30% 附近. 根据上述开发的后向散射系数和散射系数光谱模型的比值,可以直接获得后向散射率的光谱模型,如式(11),各波长模拟误差 MAPE 都在 23% 以下.

$$\bar{b}_{bp}(\lambda) = \bar{b}_{bp}(532) \left[\frac{\lambda}{532} \right]^{-2.38} \quad (11)$$

式中, $\bar{b}_{bp}(\lambda)$ 为各波长处悬浮颗粒物的后向散射率, λ 为波长 (nm).

许多研究认为后向散射率是一定值,但最近研究表明它是具有一定波长依赖性的^[19],本研究通过实测数据分析也证实了这一点. 但不同学者利用不同函数形式对后向散射率的光谱变化进行模拟,如 Aas 等^[19]通过幂函数 $\lambda^{-\gamma}$ 进行模拟,马荣华等^[20]则利用二次函数模拟后向散射率的光谱变化. 本研究通过幂函数模拟巢湖水体中悬浮颗粒物后向散射率的光谱变化,获得的光谱曲线斜率参数为 2.38; Aas 等^[19]对斯卡格拉海峡研究获得的参数为 1.12; Sun 等^[21]对太湖水体进行研究时获得的参数为 2.34. 可见,不同水体中悬浮颗粒物后向散射率的光谱斜率参数是存在差异的,这是由不同颗粒物本质属性差别造成的^[19],因此,针对特定的水域需提出相应的悬浮颗粒物后向散射率的光谱斜率参数.

尽管如此,巢湖水体中悬浮颗粒物后向散射率的变化范围为 0.003 ~ 0.026,其与之前的研究具有一定的可比性,如 Boss 等^[22]对新泽西海岸水体研究的范围为 0.005 ~ 0.035; Loisel 等^[6]对东英吉利海峡等水域的研究范围为 0.002 ~ 0.042; Snyder 等^[7]对美国海岸带水体研究提出的范围为 0.005 ~ 0.060; Sun 等^[21]对太湖水体研究时提出的范围为 0.005 ~ 0.027. 可见,巢湖水体中悬浮颗粒物后向散射率的变化跨度并不大,绝大部分变化都处在之前研究的范围之内.

为深入分析巢湖水体中悬浮颗粒物的本质属性,本研究计算了悬浮颗粒物的折射指数 $\bar{n}_p$ 和粒径大小分布参数 ξ . 结果显示:巢湖水体中悬浮颗粒物的折射指数 $\bar{n}_p$ 在 1.02 ~ 1.06 之间变化(图 7). 通常认为活体浮游植物、有机碎屑颗粒、异养细菌颗粒等物质由于体内高水分含量而具有相对低的折射指数,约在 1.02 ~ 1.07 之间,而悬浮泥沙等无机颗粒物的折射指数通常在 1.15 ~ 1.20 之间^[23-25]. 因而,这些有机颗粒可能是巢湖水体中悬浮颗粒物的主导成分. 从粒径分布上看,巢湖水体中悬浮颗粒物的 ξ 在 3.8 ~ 4.3 之间变化(图 7),而绝大多数(91%)样点都大于 4.0,这与对太湖水体的研究结果相

似^[21],而在海洋水体中 ξ 通常在3.5~4.0之间^[6,22,26],这体现了内陆水体中与海洋水体中悬浮颗粒物在本质属性上的差别之一。

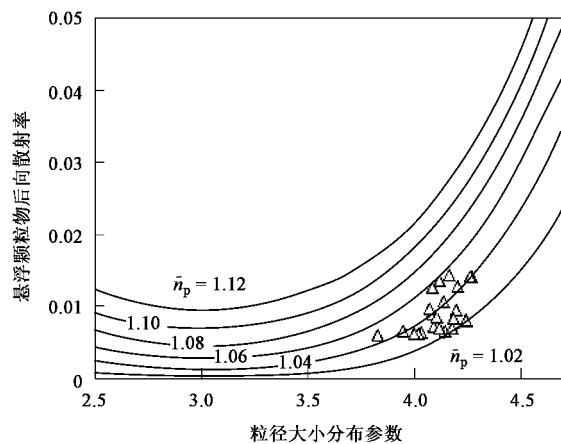


图7 巢湖水体中悬浮颗粒物后向散射率、折射指数和粒径大小分布参数

Fig.7 Variations of particulate backscattering ratio, refractive index and particulate size distribution parameters

3 结论

(1) 巢湖水体中悬浮颗粒物的散射系数和后向散射系数从短波到长波都呈逐渐的下降趋势,其光谱变化都可以通过幂函数模型进行模拟,获得的散射系数的光谱模型指数为0.86,后向散射系数的光谱模型指数为3.24,2个光谱模型在整个可见光光谱范围内都具有较低的预测误差。同时,悬浮颗粒物散射系数 $b_p(532)$ 与TSM和ISM之间都存在较好的线性函数关系,从而可以提出巢湖水体中总悬浮颗粒物的比散射系数为 $0.6364(10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{mg}^{-1})$,无机悬浮颗粒物的比散射系数为 $0.9108(10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{mg}^{-1})$ 。

(2) 巢湖水体中悬浮颗粒物后向散射率的变化范围为0.003~0.026,与之前研究相比,其变化跨度并不大,同时后向散射率呈现出一定的光谱依赖性,通过幂函数模型模拟获得的模型指数为2.38。此外,悬浮颗粒物的折射指数 $\bar{n}_p$ 在1.02~1.06之间变化,说明有机颗粒可能是巢湖水体中悬浮颗粒物的主导成分。

致谢:感谢中国科学院遥感所李俊生老师、吴远峰博士和宋阳在巢湖水体实验中所付出的辛勤劳动,感谢黄昌春、施坤、夏睿、尹兵和张红在野外实验和数据处理中所提供的帮助。

参考文献:

- [1] Mobley C D. Light and Water: Radiative Transfer in Natural Waters [M]. San Diego: Academic Press, 1994. 60-61.
- [2] Kirk J T O. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1983. 71.
- [3] Gordon H R, Brown O B, Evans R H, *et al.* A semi-analytic radiance model of ocean color [J]. Journal of Geophysical Research, 1988, **93**: 10909-10924.
- [4] Morel A, Gentili B. Diffuse reflectance of oceanic waters. II. Bidirectional aspects [J]. Applied Optics, 1993, **32**: 6864-6879.
- [5] Gould Jr R W, Arnone R A, Martinovich P M. Spectral dependence of the scattering coefficient in case I and case 2 waters [J]. Applied Optics, 1999, **38**: 2377-2383.
- [6] Loisel H, Mérieux X, Berthon J F, *et al.* Investigation of the optical backscattering to scattering ratio of marine particles in relation to their biogeochemical composition in the eastern English Channel and southern North Sea [J]. Limnol Oceanogr, 2007, **52**: 739-752.
- [7] Snyder W A, Arnone R A, Davis C O, *et al.* Optical scattering and backscattering by organic and inorganic particulates in U. S. coastal waters [J]. Applied Optics, 2008, **47**(5): 666-677.
- [8] 戴永宁,李素菊,王学军. 巢湖水体的表观光学特性测量与分析[J]. 中国环境科学, 2008, **28**(11): 979-983.
- [9] 王永华,钱少猛,徐南妮,等. 巢湖东区底泥污染物分布特征及评价[J]. 环境科学研究, 2004, **17**(6): 22-26.
- [10] 孙德勇,李云梅,乐成峰,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.
- [11] 黄祥飞. 湖泊生态系统调查观测与分析[M]. 北京: 中国标准出版社, 2000. 77-79.
- [12] 陈宇炜,陈开宁,胡耀辉. 浮游植物叶绿素a测定的“热乙醇法”及其测定误差的探讨[J]. 湖泊科学, 2006, **18**(5): 550-552.
- [13] Boss E, Twardowski M S, Herring S. Shape of the particulate beam attenuation spectrum and its relation to the size distribution of oceanic particles [J]. Applied Optics, 2001, **40**: 4885-4893.
- [14] 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.
- [15] 宋庆君,唐军武. 黄海、东海海区水体散射特性研究[J]. 海洋学报, 2006, **28**(4): 56-63.
- [16] 黄妙芬,宋庆君,唐军武,等. 石油类污染水体后向散射特性分析[J]. 海洋学报, 2009, **31**(3): 12-20.
- [17] Morel A, Maritorena S. Bio-optical properties of oceanic waters: A reappraisal [J]. Journal of Geophysical Research, 2001, **106**: 7763-7780.
- [18] Sullivan J M, Twardowski M S, Donaghay P L, *et al.* Use of optical scattering to discriminate particle types in coastal waters [J]. Applied Optics, 2005, **44**: 1667-1680.
- [19] Aas E, Høkedal J, Sørensen K. Spectral backscattering

- coefficient in coastal waters [J]. International Journal of Remote Sensing, 2005, **26**: 331-343.
- [20] 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.
- [21] Sun D Y, Li Y M, Wang Q, *et al.* Light scattering properties and their relation to the biogeochemical composition of turbid productive waters: a case study of Lake Taihu [J]. Applied Optics, 2009, **48**(11): 1979-1989.
- [22] Boss E, Pegau W S, Lee M, *et al.* Particulate backscattering ratio at LEO 15 and its use to study particle composition and distribution [J]. Journal of Geophysical Research, 2004, **109**, C01014doi: 10.1029/2002JC001514, 2004.
- [23] Ackleson S G, Spinrad R W. Size and refractive index of individual marine particulates: a flow cytometric approach [J]. Applied Optics, 1988, **27**: 1270-1277.
- [24] Aas E. Refractive index of phytoplankton derived from its metabolite composition [J]. Journal of Plankton Research, 1996, **18**: 2223-2249.
- [25] Stramski D, Bricaud A, Morel A. Modelling the inherent optical properties of the ocean based on the detailed composition of the planktonic community [J]. Applied Optics, 2001, **40**(18): 2929-2945.
- [26] Bader H. The hyperbolic distribution of particle sizes [J]. Journal of Geophysical Research, 1970, **75**: 2822-2830.