

文章编号: 0253-2239(2010)09-2478-08

内陆湖泊富营养化水体散射系数模型研究

施 坤 李云梅 王 桥 杨 煜 金 鑫 王彦飞 尹 斌 张 红

(南京师范大学教育部虚拟地理环境重点实验室, 江苏 南京 210046)

摘要 2008年11月、2009年4月、2009年6月分别对太湖水体56,31个样点、巢湖水体30个样点进行野外实验。对散射系数与总悬浮物浓度之间的关系进行分析,建立不同季节、不同湖泊散射系数与总悬浮物浓度之间的关系模型,得到比散射系数;建立了不同季节和湖泊的散射系数光谱模型;运用生物光学模型,估算出后向散射概率,并讨论其波谱的依赖性。结论为:1)太湖水体不同季节以及巢湖水体的散射系数与总悬浮物浓度具有较为稳定的线性关系;2)太湖水体不同季节以及巢湖水体具有较为稳定的比散射系数,其值约为 $0.63 \text{ m}^2/\text{g}$;3)太湖不同季节的水体、巢湖水体的散射系数具有较为稳定的光谱模型;4)太湖不同季节的水体、巢湖水体的后向散射概率并无光谱依赖性。

关键词 海洋光学;散射模型;生物光学;后向散射概率

中图分类号 X524 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103009.2478

Study of Scattering Coefficients Model in Inland Eutrophic Lake

Shi Kun Li Yunmei Wang Qiao Yang Yu Jin Xin Wang Yanfei
Yin Bin Zhang Hong

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

Abstract In November 2008, April and June 2009, field experiments were conducted with 56 and 31 water samples in Taihu Lake and 30 samples in Chaohu Lake. Then the relation between scattering coefficient and total suspended matter concentrations is analyzed. The scattering model for different seasons and different lakes is developed, and the stable specific scattering coefficient of different seasons and lakes is obtained. Stable scattering coefficient spectral model for different lakes and different seasons is established. Then bio-optical model is used to estimate backscattering ratio, then its spectral dependence is discussed. It can be concluded 1) scattering coefficient of Taihu Lake in different seasons and in Chaohu Lake has stable linear relation with total suspended matter concentrations; 2) Taihu Lake in different seasons and Chaohu Lake have a stable specific scattering coefficient, which is about $0.63 \text{ m}^2/\text{g}$; 3) Scattering coefficient of Taihu Lake and Chaohu Lake has relatively stable spectral model; 4) Backscattering ratio of Taihu Lake in different seasons and Chaohu Lake is independent on spectrum.

Key words ocean optics; scattering model; bio-optics; backscattering ratio

1 引 言

生物光学模型将水体的散射系数、吸收系数等固有光学量与遥感反射率联系在一起,从而为利用遥感技术反演水体的生物参数提供理论依据。国内

外已经做了大量的关于吸收和散射特性的研究^[1~9]。Z. P. Lee等^[10]利用生物光学模型,提出了固有光学特性的反演模型,在特定的区域取得了较好的效果。乐成峰等^[11]利用Z. P. Lee的方法反

收稿日期: 2009-11-16; 收到修改稿日期: 2009-12-30

基金项目: 国家自然科学基金(40971215)、国家科技重大专项(2009ZX07527-006),江苏省研究生培养创新工程项目(CX10B-392Z)和南京师范大学优秀博士研究生学位论文培育项目(20106S0036)资助课题。

作者简介: 施 坤(1985—),男,博士研究生,主要从事水体光学特性方面的研究。E-mail: ahnushikun@yahoo.com.cn

导师简介: 李云梅(1966—),女,博士,教授,主要从事水环境遥感方面的研究。

E-mail: liyunmei@njnu.edu.cn(通信联系人)

演了太湖水体后向散射系数,并建立了后向散射系数与总悬浮物浓度之间关系的模型。R. W. Gould Jr. 等^[12]通过对一类水体与二类水体散射系数的光谱特性进行分析,以 555 nm 作为参考波段,建立不同类型水体的散射系数线性参数化模型。O. V. Kopelevich 等^[13]分大小 2 种颗粒物建立了水体散射的光谱模型。H. R. Gordon 等^[14], M. Babin 等^[15], A. Morel^[16]、宋庆君等^[17]和孙德勇等^[18]对其各自的研究区得到不同的比散射系数。然而,目前针对内陆富营养化湖泊水体散射系数的统一特征研究尚为缺乏。

水体悬浮物的后向散射概率 $b'(\lambda) = b_{bp}(\lambda)/b_p(\lambda)$ 包含了水体中总悬浮物的种类、大小分布等各种信息,对卫星所接受的水体的离水辐射信息起着重要的作用,是生物光学模型中非常重要的参数之一^[19]。由前人的研究可知总悬浮物的后向散射概率是总悬浮物粒径分布、折射指数的函数。通常与总悬浮物的粒径成反比关系,总悬浮物粒径越小,往往后向散射概率越大,并随着水体中总悬浮物浓度中高折射性悬浮物比例的增加而增加。因此,总悬浮物的后向散射概率是反映总悬浮物物理、化学性质非常重要的光学参数之一^[18]。许多学者对水体后向散射概率进行了研究^[19~23],并给出了大洋一类水体、近海岸水体、以及富营养化内陆水体的后向散射概率的变化范围。而对后向散射概率波长的依赖性,不同学者给出了不同的结论。E. Aas 等^[24]的研究结果认为,后向散射概率与波长成乘幂关系,可表示为 λ^{-n} ;而 A. L. Whitmore 等^[25]的研究结果认为,后向散射概率是不随波长变化的。D. G. Bowers 等^[26], M. Chami 等^[19]都得到后向散射概率与波长的依赖性较弱的结论。可见在不同的研究区域,不同的研究者对后向散射概率的大小及影响因子给出了不同的结论。

太湖水体、巢湖水体都是浑浊度较高的富营养化二类水体,光学特性具有一定的相似性,在构建这两个区域的生物光学模型时,散射系数的参数化、比散射系数是否具有区域性和季节性,以及后向散射概率是否具有光谱依赖性都是必须要考虑的问题。本文对不同季节的太湖、巢湖水体的散射系数进行测量,分析各自的散射系数与总悬浮物浓度之间的关系,试图建立两者之间不同季节和区域的关系模型;分析各自的散射特性,试图建立不同季节和区域的参数化模型;运用生物光学模型,估算后向散射概

率,并讨论后向散射概率随波长的变化。

2 材料与方法

2.1 野外实验概述

2008 年 11 月、2009 年 4 月、2009 年 6 月分别对太湖水体 56,31 个样点、巢湖水体 30 个样点进行野外实验,实测了水体的遥感反射率、散射系数、吸收系数,并在室内对总悬浮物浓度、无机悬浮物浓度进行了测量。

太湖是我国五大淡水湖之一,位于经济发达的上海经济圈,湖面面积、平均海拔和平均水深分别为 2338.1 km², 3.33 m, 1.9 m, 是典型的大型浅水湖泊^[27]。巢湖也为我国的五大淡水湖之一,位于长江与淮河之间的安徽省中部,湖面面积为太湖的 1/3 左右,其平均水深为 3 m^[28]。

2.2 参数的测定

运用 Wetlabs 公司的光谱吸收和衰减仪(AC-S)在野外实测太湖水体总悬浮物的散射系数、吸收系数,为了得到更为精确的散射系数数据,需对其进行校正^[29]。总悬浮物、无机悬浮物浓度的测量采用较为常规的方法^[18]。

光谱测量采用美国 ASD 公司生产的 ASD FieldSpec Pro 便携式光谱辐射计,其测量的波段范围为 350~1050 nm。提取遥感反射率必须要观测的数据有:标准灰板(其反射率小于 0.3)、天空光和水体等的光谱辐亮度信息,每个对象都要采集 10 条以上的光谱数据,剔除异常光谱数据,剩余数据做均值处理。

为了避免水体对太阳的直射反射和船体阴影等对光场的干扰作用,采用一定的观测角度进行光谱测量,仪器观测平面与太阳入射平面的夹角 $90^\circ < \phi_v < 145^\circ$, 仪器与海面法线方向的夹角 $10^\circ < \phi_s < 30^\circ$ 。天空光在水面的反射是不可避免的,因此,在仪器面向水体进行测量后,将仪器在观测平面内向上旋转一个角度,使得观测方向的天顶角与 θ_v 相同,测量天空光的辐射亮度。遥感反射率的提取使用文献^[30]中的方法。

在获得各个样点的水体遥感反射率后,观察光谱特征的变化,剔除光谱特征变化异常的数据。刚好处于水面以下的遥感反射率

$$R(0^-) = \frac{R_{rs}Q}{[1 - r(\theta_v)] \times [1 - r(\theta_s)] / 1.34 + \rho_w QR_{rs}}, \quad (1)$$

式中 R_{rs} 是通过实测水面以上的遥感反射率; θ_v 是观测天顶角; $r(\theta_v)$ 是水-气界面的反射率, $r(\theta_s)$ 是气-水界面的反射率, 可以由菲涅耳公式计算得到; θ_s 是采样时的太阳天顶角, 可以根据采样的时间和样点的经纬度计算得到; ρ_w 是水下上行辐照度被水面反射的比例系数, 一般取 0.05^[31]; Q 是依赖于水体光场分布的参数, 理论上在 1.7~7 之间变化, 本文选取 1.7, 因为此时得到的遥感反射率较为合理。

2.3 后向散射概率的估算

根据生物光学模型^[32], $R(0^-)$ 可以由水体的固有光学量来表示:

$$R(0^-) = f \frac{b_b}{a + b_b}, \quad (2)$$

式中 f 是一个系数, 本文取 0.33^[31]; a 是水体的总吸收, 等于纯水的吸收、黄色物质的吸收、有机悬浮物的吸收、无机悬浮物的吸收系数之和; b_b 是水体总的后向散射系数, 等于纯水的后向散射系数 b_{bw} 与总悬浮物的后向散射系数 b_{bp} 之和, 即

$$b_b = b_{bw} + b_{bp}. \quad (3)$$

悬浮物的后向散射系数 $b_{bp}(\lambda)$ 可以根据散射系数 $b_p(\lambda)$ 与后向散射概率 $b'(\lambda)$ 得到

$$b_{bp}(\lambda) = b_p(\lambda)b'(\lambda), \quad (4)$$

式中 λ 为波长。

散射系数 $b_p(\lambda)$ 又可以表达为

$$b_p(\lambda) = b_p(\lambda_0) \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^n = T_{SM} \bar{b}_p(\lambda_0) \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^n, \quad (5)$$

式中 λ_0 为参考波长, 本文取 532 nm; n 为散射系数的光谱指数; $\bar{b}_p(\lambda_0)$ 为参考波长的比散射系数; T_{SM} 为总悬浮物浓度。所以总悬浮物的后向散射系数为

$$b_{bp}(\lambda) = T_{SM} \bar{b}_p(\lambda_0) \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^n b'(\lambda). \quad (6)$$

由于在 750 nm 以后, 黄色物质的吸收、有机悬浮物、无机悬浮物的吸收几乎为零, 因此生物光学模型可以简化为^[33]

$$R(\lambda)(0^-) = f \frac{b_{bw}(\lambda) + b_{bp}(\lambda)}{a_w(\lambda) + b_{bw}(\lambda) + b_{bp}(\lambda)}, \quad (7)$$

式中 a_w 为纯水的吸收系数。根据(6), (7)式便可以得到

$$b'(\lambda) = \frac{[R(\lambda)(0^-)/f] \times [a_w(\lambda) + b_{bw}(\lambda)] - b_{bw}(\lambda)}{T_{SM} \bar{b}_p(\lambda_0) (\lambda_0/\lambda)^n [1 - R(\lambda)(0^-)/f]}. \quad (8)$$

选用 750~800 nm 的 $R(0^-)$ 来估算后向散射概率, 探讨后向散射概率随波长的变化。

3 结果与分析

3.1 散射系数的参数化模型

由于太湖、巢湖水体悬浮物浓度较高, 导致测量时部分样点在短波波段的散射系数发生溢出现象, 通过对实测数据的观测发现在 500 nm 以后的散射系数基本上稳定, 因此, 将波段范围限定为 500~750 nm。在该波段范围内, 太湖、巢湖水体散射系数的光谱如图 1 所示, 光谱特征较为单一, 不存在明显的峰值和谷值, 太湖水体的秋季和春季的散射光谱较为一致。太湖秋季水体 532 nm 波长处的散射系数在 2.2~44.2 m^{-1} 之间, 平均值为 $(19.8 \pm 10.4) m^{-1}$; 太湖春季水体 532 nm 的散射系数在 10~55.9 m^{-1} 之间, 平均值为 $(28.9 \pm 11) m^{-1}$; 巢湖夏季水体 532 nm 的散射系数在 11.9~55.6 m^{-1} 之间, 平均值为 $(28.7 \pm 11.9) m^{-1}$ 。可见太湖水体不同季节以及太湖、巢湖水体的散射系数的大小并无太大的差异, 太湖秋季的水体总悬浮物的散射系数要略小于春季的, 这主要是由于太湖水体秋季的总悬浮物浓度要低于春季的, 太湖秋季水体总悬浮物浓度的平均值为 31 mg/L, 而春季悬浮物浓度平均值为 41 mg/L, 巢湖水体夏季的总悬浮物浓度与太湖春季的悬浮物浓度近似相等。

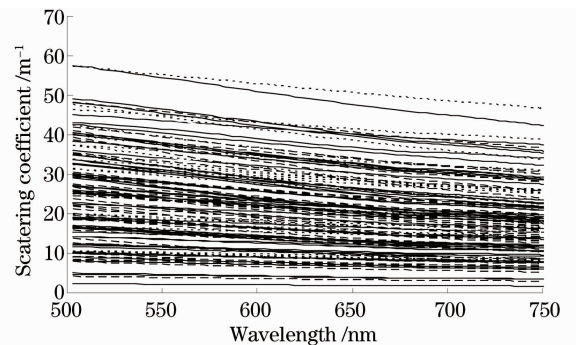


图 1 太湖、巢湖水体散射系数光谱

Fig. 1 Spectrum of scattering coefficient in Taihu and Chaohu Lake

532 nm 波长处的散射系数与其他波段的散射系数具有较好的相关关系, 几乎与所有的波段相关系数都在 0.95 以上, 因此采用该波段作为参考波段来模拟其他波段的散射系数, 其具体的参数化模型为 $b_p(\lambda) = b_p(\lambda_0) (\lambda_0/\lambda)^n$, 具体步骤见文献[18], 太湖秋季水体总悬浮物散射系数 n 为 0.93, 春季 n 为 0.82, 巢湖夏季 n 为 0.85, 太湖、巢湖水体总悬浮物散射系数 n 为 0.83, A. Morel 等^[1]对黄色物质主导

的二类水体的研究表明 n 为 0.6 左右。表 1 对不同的 n 值对模型拟合的效果进行了比较[运用(10)式平均相对误差绝对值],从表 1 中看到, n 值的不同对模型的整体预测精度影响较小,因此, n 值取 0.83 对四个波段的预测值与实测值的误差最小。太湖、巢湖水体的不同波段处的散射系数为

$$b_p(\lambda) = b_p(532) \left(\frac{532}{\lambda} \right)^{0.83} \quad (9)$$

$$E = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left| \frac{y_i - y'_i}{y_i} \right|, \quad (10)$$

式中 m 为样本数量; y_i 为第 i 个样本的实测值; y'_i 为第 i 个样本的预测值。

表 1 不同 n 值对模型预测精度影响分析

Table 1 Forecast precision of scattering coefficient spectral model for different n values

n	$E(503 \text{ nm})$	$E(677 \text{ nm})$	$E(702 \text{ nm})$	$E(750 \text{ nm})$
0.93	0.01	0.04	0.05	0.06
0.85	0.01	0.04	0.04	0.06
0.83	0.01	0.04	0.04	0.05
0.6	0.01	0.08	0.08	0.08

图 2 显示了该模型在 503, 677, 702 和 750 nm 四个波长处, 预测值与实测值之间的关系, 预测值和实测值基本上分布在 $y = x$ 直线的两侧, 该模型的预测效果较好。

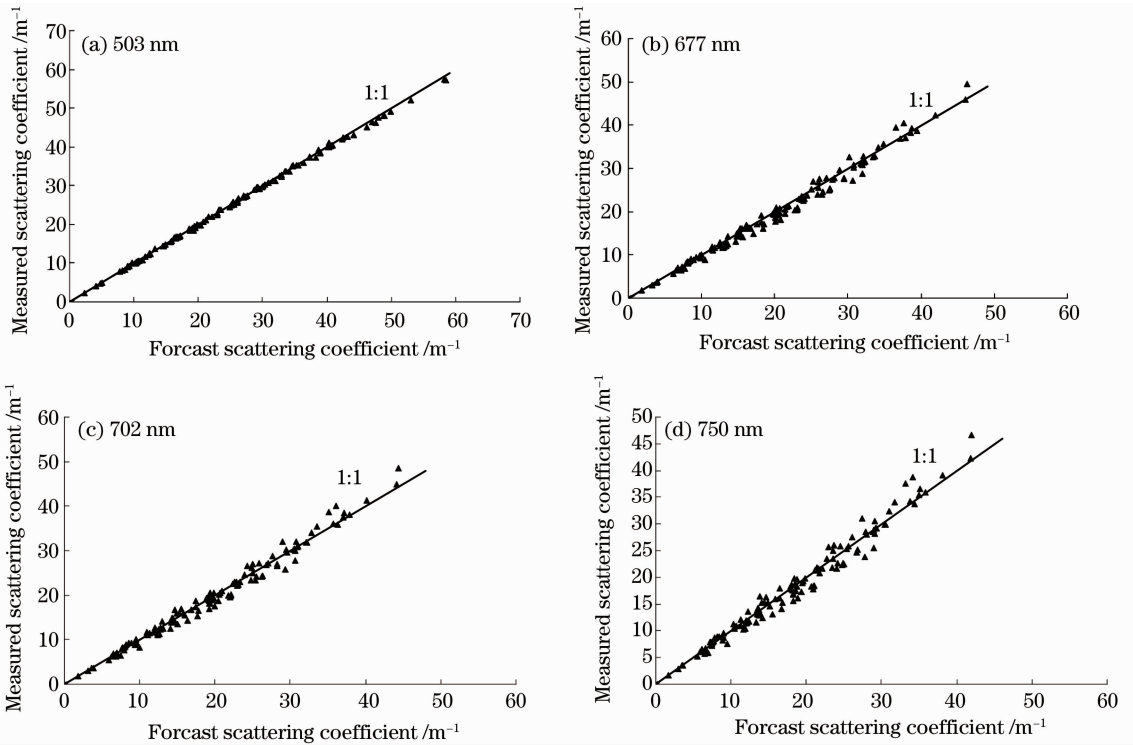


图 2 不同波长下散射系数预测值与实测值之间的关系

Fig. 2 Relation between forecast scattering coefficient and measured at different wavelength

表 2 散射系数光谱模型在 4 个波段的预测精度分析

Table 2 Forecast precision of scattering coefficient spectral model at four bands

	$E(503 \text{ nm})$	$E(677 \text{ nm})$	$E(702 \text{ nm})$	$E(750 \text{ nm})$
Autumn in Taihu Lake	0.01	0.05	0.05	0.07
Spring in Taihu Lake	0.01	0.03	0.04	0.05
Summer in Chaohu Lake	0.01	0.05	0.03	0.04
All datas	0.01	0.04	0.04	0.05

运用平均相对误差绝对值(10)式对此光谱模型进行验证,太湖秋季水体、春季水体以及巢湖水体在 503, 677, 702 和 750 nm 四个波段处的模拟误差见表 2, 可见在各个波段处的模拟误差都比较低, 在 0.04 左右, 结合图 2 可知该光谱模型的整体预测性较好, 精度较高。

3.2 散射系数与总悬浮物浓度的关系模型

水体总悬浮物的散射系数与总悬浮物浓度之间的关系往往因水体不同而变化, 对特定水体需要建立特定的区域模式, 本文针对太湖水体、巢湖水体, 探讨总悬浮物浓度与散射系数在太湖和巢湖水体的

区域差异性和季节差异性。发现不管是巢湖水体还是太湖不同季节的水体,总悬浮物、无机悬浮物浓度都与散射系数具有较好的相关性,相关系数都在 0.85 以上,而有机悬浮物与散射系数的相关性却不好,所以太湖不同季节的水体、巢湖水体总悬浮物的散射主要受无机悬浮物的控制,这与 D. G. Bowers 等^[26]的研究结果一致。实验采样太湖秋季水体无机悬浮物占总悬浮物的平均比例为 63%;春季水体无机悬浮物占总悬浮物的平均比例为 76%;巢湖水体的无机悬浮物占总悬浮物的平均比例为 66%,可见无机悬浮物是总悬浮物的主要成分。

建立参考波长 532 nm 的散射系数与总悬浮物浓度之间的关系,考虑模型的稳定性和精度,选择线性模型建立两者之间的关系。

由图 3,4 可知太湖水体不同季节的总悬浮物浓

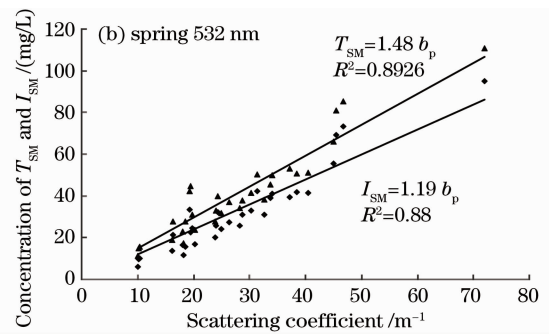
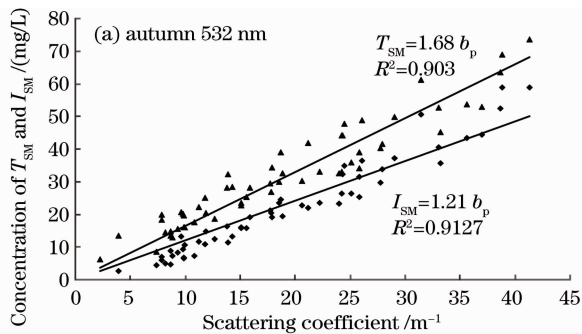


图 3 太湖秋季 b_p 与 T_{SM} , I_{SM} 之间的关系

Fig. 3 Relation between b_p and T_{SM} , I_{SM} of Taihu Lake in autumn and spring

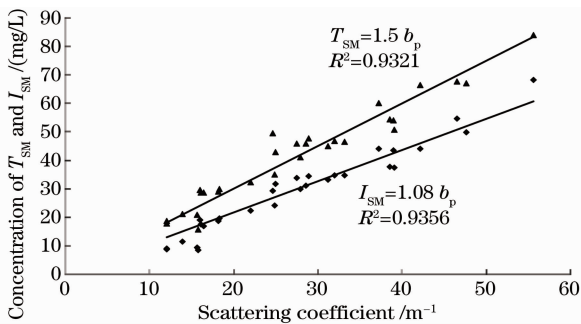


图 4 巢湖夏季 b_p 与 T_{SM} , I_{SM} 之间的关系

Fig. 4 Relation between b_p and T_{SM} , I_{SM} in Chaohu Lake

孙德勇等^[18]建立了无机悬浮物与 550 nm 散射系数之间的乘幂关系,其乘幂的指数为 1.33(接近 1),因此其模型基本接近线性模型,其无机悬浮物浓度与散射系数的比值为 1.35 与本文的 1.16 较为接近,两者之间的差异可能是由于选择不同波段的散射系数所产生的。太湖水体秋季和春季、巢湖水体总悬浮物浓度、无机悬浮物浓度与散射系数之间的关系变化不大,基本可以利用一个稳定的关系模型

度、无机悬浮物浓度与散射系数之间的关系变化并不大,秋季总悬浮物浓度与散射系数之间的斜率为 1.68,春季的为 1.48;秋季无机悬浮物浓度与散射系数的斜率为 1.22,春季的为 1.19,太湖水体、巢湖水体的总悬浮物浓度、无机悬浮物浓度与散射系数的关系变化也不大,巢湖水体总悬浮物浓度与散射系数之间的斜率为 1.5,无机悬浮物浓度与散射系数的斜率为 1.08。因此,可以根据图 5 建立太湖水体、巢湖水体总悬浮浓度 T_{SM} 、无机悬浮物浓度 I_{SM} 与散射系数 b_p 之间的模型关系:

$$T_{SM} = 1.54b_p, \quad (11)$$

$$(R^2 = 0.9, P < 0.0001, N = 117)$$

$$I_{SM} = 1.168b_p, \quad (12)$$

$$(R^2 = 0.9, P < 0.0001, N = 117)$$

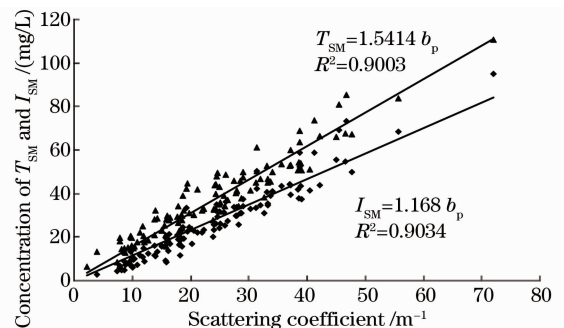


图 5 太湖、巢湖水体 b_p 与 T_{SM} , I_{SM} 之间的关系

Fig. 5 Relation between b_p and T_{SM} , I_{SM} in Taihu and Chaohu Lake

来表达。

比散射系数为散射系数与总悬浮物浓度的比值,是生物光学模型非常重要的参数之一,张兵等^[34]建立太湖水体的比散射系数的数据库,并以此为参数,建立生物光学模型,反演太湖水体的水质参数。由于太湖水体、巢湖水体的总悬浮物浓度与 532 nm 的散射系数之间存在较为稳定的关系,因此

对太湖不同季节的水体、巢湖水体的比散射系数进行研究,探讨太湖水体、巢湖水体比散射系数的特征。

图 6 显示了太湖水体秋季、春季以及巢湖水体总悬浮物的 532 nm 比散射系数的变化,太湖水体秋季、春季水体以及巢湖水体的总悬浮物比散射系数变化并不大,太湖秋季水体的比散射系数在 $0.29 \sim 0.7 \text{ m}^2/\text{g}$ 之间变化,平均值为 $(0.58 \pm 0.1) \text{ m}^2/\text{g}$; 春季水体的总悬浮物比散射系数在 $0.43 \sim 0.78 \text{ m}^2/\text{g}$ 之间变化,平均值为 $(0.7 \pm 0.1) \text{ m}^2/\text{g}$; 巢湖夏季水体的总悬浮物比散射系数在 $0.49 \sim 0.7 \text{ m}^2/\text{g}$ 之间变化,平均值为 $(0.66 \pm 0.09) \text{ m}^2/\text{g}$,太湖、巢湖水体的总悬浮物比散射系数在 $0.29 \sim 0.78 \text{ m}^2/\text{g}$ 之间变化,平均值为 $(0.63 \pm 0.1) \text{ m}^2/\text{g}$ 。M. Babin 等^[15]对不同类型水体的比散射系数进行研究,得到其变化范围为 $0.2 \sim 1 \text{ m}^2/\text{g}$ 之间;宋庆君等^[17]对东海海区的比散射系数也进行了研究得到其变化范围为 $0.25 \sim 0.46 \text{ m}^2/\text{g}$ 之间。本文比散射系数的范围基本上落在前人的研究范围之内。

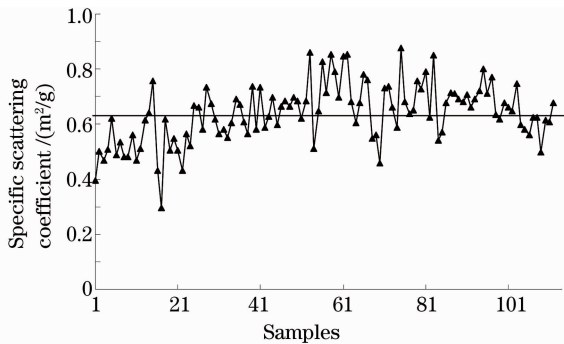


图 6 太湖、巢湖水体比散射系数

Fig. 6 Specific scattering coefficient in Taihu and Chaohu Lake

D. Doxaran 等^[35]认为比散射系数的主要影响因素是悬浮物粒径分布函数的斜率 j , 并且认为在总悬浮物中无机悬浮物比例较高的水体中 $j = t + 3$, t 为散射系数的光谱斜率。太湖春季、秋季和巢湖水体, j 为 3.82, 3.93, 3.85, 太湖春季、秋季以及巢湖水体总悬浮物的粒径分布函数的斜率差别并不大,因此,太湖秋季、春季以及巢湖夏季的比散射系数的平均值、标准差、范围等变化较小,具有较为稳定的比散射系数,太湖秋季、春季水体以及巢湖夏季水体的比散射系数可以取 $0.63 \text{ m}^2/\text{g}$ 。

3.3 后向散射概率的变化特征

运用生物光学模型,建立后向散射概率的估算模型,计算后向散射概率,并讨论太湖秋季与春季、巢湖

夏季水体后向散射概率大小的变化以及后向散射概率随波长的变化。当波长大于 750 nm 时,根据(8)式来计算后向散射概率,其中 $\bar{b}_p(\lambda_0)$ 取: 532 nm 总悬浮物比散射系数的平均值 0.63, n 值取结果: 0.83。图 7 显示了太湖秋季、春季水体,巢湖水体后向散射概率随着波长的变化,由此可知,太湖水体、巢湖水体的总悬浮物后向散射概率在 750~800 nm 几乎不随波长变化而变化。各个样点不同波长处后向散射概率的标准偏差仅为 0.0009,后向散射概率随波长变化较小,各个波长所有样点的平均值在 0.0300~0.0294 之间变化,这与 D. G. Bowers 等^[26], M. Chami 等^[19]的研究结果一致。由于后向散射概率随波长的变化不大,因此可以将各个波长处的后向散射概率的平均值作为该样点的后向散射概率。太湖秋季水体的后向散射概率为 0.013~0.058,平均值为 0.028 ± 0.01 ,太湖春季水体的后向散射概率为 0.013~0.052,平均值为 0.02 ± 0.01 ,巢湖夏季水体的后向散射概率为 0.018~0.065,平均值为 0.03 ± 0.01 ,太湖、巢湖水体后向散射概率为 0.013~0.065,平均值为 0.029 ± 0.01 ,太湖水体不同季节的后向散射概率、巢湖水体的后向散射概率基本上是一致的,但是略有差异。T. J. Petzold^[20]对几种典型水体的后向散射概率进行了研究,其中圣地亚哥港湾的浑浊水体后向散射概率为 0.019,沿海海域水体后向散射概率为 0.013,清洁的开阔大洋水体为 0.044;大洋水体中后向散射概率基本上稳定于 0.015;J. T. O. Kirk^[21]认为对于中等浑浊水体后向散射概率取 0.019 较合适;孙德勇等^[18]利用实测的散射系数和后向散射系数计算得到太湖水体后向散射概率的变化范围为 0.002~0.031。本文得到的后向散射概率与这些学者所得到的结果略有差异,这可能是由于不同水体,或者同一水体不同时间,其光学特性差异所致。

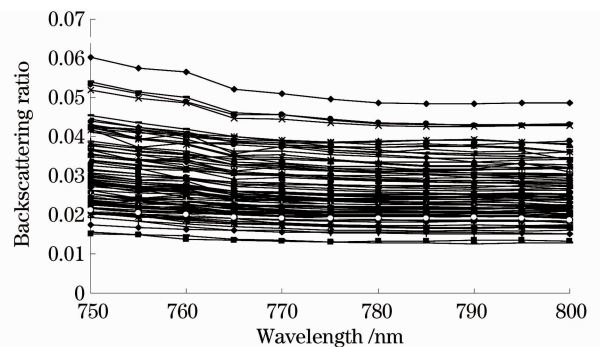


图 7 太湖、巢湖水体后向散射概率

Fig. 7 Backscattering ratio in Taihu and Chaohu Lake

由于散射系数、后向散射系数都无明显的峰值和谷值^[25],在各个波段的变化较为一致,因此可以推测后向散射概率在其他波段不具有波长依赖性,为了验证本推测的正确性,根据生物光学模型(13)式推算出太湖秋季、春季、巢湖夏季水体的 400, 450, 500, 550, 600, 650 和 700 nm 波长的后向散射概率。

当波长 $\lambda < 750$ nm 时,由于黄色物质、总悬浮物的吸收不能忽略,(8)式演化为

$$b'(\lambda) = \frac{[R(\lambda)(0^-)/f] \times [a_w(\lambda) + a_{t-w} + b_{bw}(\lambda)] - b_{bw}(\lambda)}{T_{SM} \bar{b}_p(\lambda_0) (\lambda_0/\lambda)^n [1 - R(\lambda)(0^-)/f]} \quad (13)$$

式中 a_{t-w} 为除纯水的总吸收,包括无机悬浮物、有机悬浮物、黄色物质的吸收。

太湖秋季水体在 400, 450, 500, 550, 600, 650 和 700 nm 波长处的后向散射概率基本上不随波长的变化而变化,所有样点在不同波长处后向散射概率的标准偏差在 0.0006~0.0008,不同波长的后向散射概率偏差较小,把所有波长的平均值作为该样点的后向散射概率,所有样点的后向散射概率在 0.014~0.065,平均值为 0.028±0.01。400~700 nm 波长区太湖秋季水体后向散射概率与 750~800 nm 波长区的后向散射概率的范围基本一致,其平均值较为接近;春季水体所有样点的后向散射概率在 0.012~0.055,平均值为 0.023±0.03。400~700 nm 波长区太湖春季水体后向散射概率,与 750~800 nm 波长区的后向散射概率的范围基本上一致,其平均值较为接近。巢湖水体所有样点的后向散射概率在 0.017~0.062,平均值为 0.029±0.02。400~700 nm 波长区巢湖水体后向散射概率,与 750~800 nm 波长区的后向散射概率的范围基本上一致,其平均值较为接近。因此可以认为太湖不同季节的水体、巢湖水体的后向散射概率随波长几乎没有变化。A. L. Whitmire 等^[25]的研究结果认为,后向散射概率是不随波长变化的,本文结果与此一致。

乐成峰等^[11]利用 Z. P. Lee 等^[10]的方法反演了太湖水体后向散射系数,并建立了后向散射系数与总悬浮物浓度之间的关系:

$$b_{bp}(550) = 0.0257 T_{SM} \quad (14)$$

式中 $b_{bp}(550)$ 为在波长 550 nm 处后向散射系数, T_{SM} 为总悬浮物浓度。

由散射系数与总悬浮物浓度之间的关系模型(11)式与太湖、巢湖水体的平均后向散射概率,可以

得到 532 nm 处后向散射系数与总悬浮物浓度之间的关系:

$$b_{bp} = 0.03b_p = (1/1.54) T_{SM} \times 0.029 = 0.0194 T_{SM} \quad (15)$$

(15)式与乐成峰等^[11]利用 Z. P. Lee^[10]的方法建立的后向散射系数与总悬浮物浓度之间的关系差别并不大,两者具有相对的一致性。从而证明了后向散射概率以及散射系数与总悬浮物浓度之间的关系模型(11)式具有一定的合理性。

4 结 论

根据太湖秋季、春季以及巢湖夏季的水体的散射系数的光谱特征,建立了相应的参数化模型;根据总悬浮物浓度与散射系数之间的关系,建立总悬浮物浓度与散射系数之间的关系模型;对不同季节和区域的比散射系数进行研究;根据生物光学模型,得到后向散射概率的估算模型,并分析后向散射概率的区域和季节的变化,得出以下结论:

- 1) 太湖水体不同季节以及巢湖水体的散射系数与总悬浮物浓度具有较为稳定的线性关系;
- 2) 太湖水体不同季节以及巢湖水体具有较为稳定的比散射系数,约为 0.63 m²/g,太湖秋季的比散射系数要略大于春季的,巢湖夏季的要略小于太湖秋季的,但略大于太湖春季的,比散射系数的季节的差异要大于不同湖泊的;
- 3) 太湖不同季节的水体、巢湖水体的散射系数具有较为稳定的光谱参数化模型,模型的预测精度较好;
- 4) 太湖不同季节的水体、巢湖水体的后向散射概率并无光谱依赖性,后向散射概率几乎不随波长变化。

参 考 文 献

- 1 A. Morel, B. Gentili, M. Chami *et al.*. Bio-optical properties of high chlorophyll case 1 waters and of yellow-substance dominated case 2 water[J]. *Deep-Sea Research I*, 2006, **53**(9): 1439~1459
- 2 A. Hommersom, S. Peters, M. R. Wernand *et al.*. Spatial and temporal variability in bio-optical properties of the wadden sea [J]. *Estuar Coast Shelf S*, 2009, **83**(3): 360~370
- 3 S. E. Lohrenz, A. D. Weldemann, M. Tuel. Phytoplankton spectral absorption as influenced by community size structure and pigment composition[J]. *J. Plankton Res*, 2003, **25**(1): 35~61
- 4 Cui Tingwei, Zhang Jie, Ma Yi *et al.*. Backscattering coefficient retrieval model for nearshore area of bohai sea[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(11): 2041~2045
- 崔廷伟,张杰,马毅等.渤海近岸水体后向散射系数反演模型[J]. *光学学报*, 2008, **28**(11): 2041~2045
- 5 E. J. Rochelle-Newall, T. R. Fisher. Chromophoric dissolved organic matter and dissolved organic carbon in Chesapeake Bay

- [J]. *Mar. Chem.*, 2002, **77**(1): 23~41
- 6 Xu Feng, Cai Xiaoshu, Su Mingxu *et al.*. Study of independent model algorithm for determination of particle size distribution[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(2): 223~228
徐 峰, 蔡小舒, 苏明旭等. 独立模式算法求解颗粒粒径分布的研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(2): 223~228
- 7 A. V. Vähätalo, R. G. Wetzel, H. W. Paerl. Light absorption by phytoplankton and chromophoric dissolved organic matter in the drainage basin and estuary of the Neuse River, North Carolina (U. S. A)[J]. *Freshwater Biol.*, 2005, **50**(3): 477~493
- 8 H. Sasaki, T. Miyamura, S. I. Saitoh *et al.*. Seasonal variation of absorption by particles and colored dissolved organic matter (CDOM) in Funka Bay, southernwestern Hokkaido, Japan [J]. *Estuar Coast Shelf S.*, 2005, **64**(2-3): 447~458
- 9 C. Le, Y. Li, Y. Zha *et al.*. Specific absorption coefficient and the phytoplankton package effect in Lake Taihu, China [J]. *Hydrobiologia*, 2009, **619**(1): 27~37
- 10 Z. P. Lee, K. L. Carder, R. A. Arnone. Deriving inherent optical properties from water color: a multi-band quasianalytical algorithm for optically deep waters [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(27): 5755~5772
- 11 Le Chengfeng, Li Yunmei, Zha Yong *et al.*. Simulation of backscattering properties of Taihu Lake [J]. *Advance in Water Science*, 2009, **20**(5): 705~713
乐成峰, 李云梅, 查 勇等. 太湖水体后向散射特性模拟 [J]. *水科学进展*, 2009, **20**(5): 705~713
- 12 R. W. Gould Jr, R. A. Amone, P. M. Martinolich. Robert *et al.*. Spectral dependence of the scattering coefficient in case 1 and case 2 waters [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(12): 2377~2388
- 13 O. V. Kopelevich. Small-Parameter Model of Optical Properties of Seawater, Chapter 8 in Ocean Optics, vol 1; Physical Ocean Optics [M]. Moscow: Nauka Pub, 1983. 20~100
- 14 H. R. Gordon, A. Morel. Remote Assessment of Ocean Color for Interpretation of Satellite Visible Imagery: a Review [M]. New York: Springer Verlag, 1983. 114
- 15 M. Babin, A. Morel. Scattering properties of case 2 water particles [C]. Monaco: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2000
- 16 A. Morel. Diffusion de la lumière épar l'océan de mer: resultants experimentaux et approche théorique [J]. *AGARD Lect Ser.*, 1973, **61**: 3.1.1~3.1.76
- 17 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. 黄海、东海海区水体散射特性研究 [J]. *海洋学报*, 2006, **28**(4): 56~63
- 18 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, 乐成峰等. 太湖水体散射特性与其悬浮浓度关系模型 [J]. *环境科学*, 2007, **28**(12): 2688~2694
- 19 M. Chami, E. B. Shybanov, T. Y. Churilova *et al.*. Optical properties of the particles in the Crimea coastal waters (Black Sea) [J]. *J. Geophysical Research*, 2005, **110**: C11020
- 20 T. J. Petzold. Volume Scattering Functions for Selected Ocean Waters [M]. San Diego: Scripps Institution of Oceanography Ref, 1972. 72~78
- 21 J. T. O. Kirk. Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1994
- 22 E. Boss, W. S. Pegau, M. Lee, *et al.* Particulate backscattering ratio at LEO 15 and its use to study particle composition and distribution [J]. *J. Geophysical Research*, 2004, **109**: C01014
- 23 H. Loisel, X. Meriaux, J. F. Berthon *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**(2): 739~752
- 24 E. Aas, J. Høkedal, K. Sørensen. Spectral backscattering coefficient in coastal waters [J]. *International J. Remote Sensing*, 2005, **26**(2): 331~343
- 25 A. L. Whitmire, E. Boss, T. J. Cowles *et al.*. Spectral variability of the particulate backscattering ratio [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(11): 7019~7031
- 26 D. G. Bowers, E. G. Mitchelson-Jacob. Inherent optical properties of the Irish Sea determined from underwater irradiance measurements [J]. *Estuar Coast Shelf Sci.*, 1996, **43**(4): 433~447
- 27 Qin Boqiang, Hu Weiping, Chen Weiming. The Process and Mechanism of Water Environment Evolutionment in Taihu Lake [M]. Beijing: Science Press, 2004. 1~2
秦伯强, 胡维平, 陈伟民编著. 太湖水环境演化过程与机理 [M]. 北京: 科学出版社, 2004. 1~2
- 28 Wang Zhigang, Liu Wenqing, Li Hongbin. Analysis of CDOM spatial distributions variations in Chaohu Lake and its sources by three dimensional fluorescence excitation-emission matrix [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, **26**(2): 275~279
王志刚, 刘文清, 李宏斌等. 三维荧光光谱法分析巢湖 CDOM 的空间分布及其来源 [J]. *环境科学学报*, 2006, **26**(2): 275~279
- 29 C. Morre, A. Barnard, D. Hankins *et al.*. Spectral absorption and attenuation mater (ac-s) user' s guide, revision A [R]. American: WET Labs Inc, 2005. 2~13
- 30 Tang Junwu, Wang Xiaomei, Song Qingjun. Statistical inversion models for case 2 water color elements in the Yellow Sea and East china sea [J]. *Advance in Marine Science*, 2004, **22**(B10): 1~7
唐军武, 王晓梅, 宋庆君等. 黄、东海二类水体水色要素统计反演模式 [J]. *海洋科学进展*, 2004, **22**(B10): 1~7
- 31 Li Yunmei, Huang Jiazhu, Wei Yuchun *et al.*. Inversing chlorophyll concentration of taihu lake by analytic model [J]. *J. Remote Sensing*, 2006, **10**(2): 169~175
李云梅, 黄家柱, 韦玉春等. 用分析模型方法反演水体叶绿素的浓度 [J]. *遥感学报*, 2006, **10**(2): 169~175
- 32 H. R. Gordon, O. B. Brown, M. M. Jacobs. Computed relationships between the inherent and apparent optical properties of a flat homogeneous ocean [J]. *Appl. Opt.*, 1975, **14**(2): 417~427
- 33 I. J. Althuis, S. Shimwell. Modeling of remote sensing reflectance spectra for suspended matter concentration detection in coastal waters [J]. *EARSel Advances in Remote Sensing*, 1995, **4**(1): 53~59
- 34 Zhang Bing, Shen Qian, Li Junsheng *et al.*. Retrieval of three kinds of representative water quality parameters of Lake Taihu from hyperspectral remote sensing data [J]. *J. Lake Sciences*, 2009, **21**(2): 182~192
张 兵, 申 茜, 李俊生等. 太湖水体 3 种典型水质参数的高光谱遥感反演 [J]. *湖泊科学*, 2009, **21**(2): 182~192
- 35 D. Doxaran, K. Ruddick, D. McKee *et al.*. Spectral variations of light scattering by marine particles in coastal waters, from visible to near infrared [J]. *Limnol. Oceanogr.*, 2009, **54**(4): 1257~1271