

基于生物光学模型的巢湖后向散射概率估算

刘忠华, 李云梅*, 吕恒, 徐祎凡, 徐昕, 黄家柱

(南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 南京 210046)

摘要:后向散射概率是水面光谱的重要影响因素。利用 2009 年 6 月巢湖实测数据, 基于生物光学模型在近红外波段的简化原理, 通过 2 个近红外波段构建巢湖后向散射概率估算模型。结果表明, 巢湖后向散射概率最大值为 0.059, 最小值为 0.0014, 均值为 0.0236, 巢湖西部后向散射概率总体上大于东部, 并且西部的空间差异性要大于东部。此外, 利用后向散射概率计算出各样点的颗粒物折射指数, 根据折射指数的变化范围划分巢湖水体颗粒物的主导因子。结果表明, 74% 的样点属于无机颗粒物主导型, 18.5% 的样点属于藻类颗粒物和无机颗粒物共同主导型, 而藻类颗粒物主导的样点仅占总样点的 7.4%, 说明巢湖水体的后向散射特性主要受无机颗粒物影响, 而藻类颗粒物的影响相对较小。

关键词:后向散射概率; 生物光学模型; 折射指数; 单位散射系数; 巢湖

中图分类号: X524; X87 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)02-0464-08

Estimating of Backscattering Rate in Lake Chaohu Based on Bio-optical Model

LIU Zhong-hua, LI Yun-mei, LÜ Heng, XU Yi-fan, XU Xin, HUANG Jia-zhu

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

Abstract: Backscattering rate is the important factor of above water spectra. A bio-optical model simplified in near-infrared bands was constructed to estimate backscattering rate in Lake Chaohu by using the *in-situ* data measured in June 2009. The results show that the maximum value of backscattering rate in Lake Chaohu is 0.059, the minimum value is 0.0014 and the mean value is 0.0236. Backscattering rate and spatial differences in the west of Lake Chaohu are all greater than that in the east. In addition, particle refractive index of each sampling site was calculated by using backscattering rate. The dominant factors of in-water particles were determined according to the change scopes of refractive index. The results show that 74% of all sampling sites are dominated by inorganic particles, 18.5% of all sampling sites are dominated by both phytoplankton and inorganic particles, and the rest of sampling sites which accounts only for 7.4% of all sampling sites are dominated by phytoplankton. This indicates that backscattering character of Chaohu Lake is mainly affected by inorganic particles, while the effect of algae particle is relatively small.

Key words: backscattering rate; bio-optical model; refractive index; specific scattering coefficient; Lake Chaohu

相对于开阔大洋等一类水体而言, 二类水体具有非常复杂的光学性质, 水体的后向散射强烈影响着水体的光学性质^[1]。卫星遥感具有快速、宏观监测的特点, 是湖泊水色遥感的实用平台。水体辐射传输是水色遥感的基础理论之一, 其核心是生物光学模型^[2]。后向散射概率是生物光学模型的重要输入参数, 被定义为后向散射系数与总散射系数的比值, 也有学者将其定义为悬浮物的后向散射系数与悬浮物的总散射系数的比值^[3]。后向散射概率决定了水面以上最终能够被遥感传感器接收的信息的大小, 因此, 是遥感反演水质参数的主要因素。在开阔大洋等一类水体中, 后向散射概率 (b_b/b) 基本稳定, HS-6 将其默认为 0.015^[4]; 然而对于光学性质复杂的沿岸和中浑浊水体, Kirk^[5]认为后向散射概率 (b_b/b) 取 0.019 较为合适; Whitlock 等^[6]认为浑浊水体的后向散射概率 (b_b/b) 约为 0.059; 马荣华等^[3]通过现场实地测量, 结合优化算法计算出太湖水体的后向散射概率在 400 ~ 900 nm 范围内的均值为

为 0.041 ± 0.03 , 400 ~ 700 nm 范围内的均值为 0.030 ± 0.015 , 并且认为太湖水体颗粒物后向散射概率不是定值, 而是波长的二次函数; Aas 等^[7]认为颗粒物后向散射概率 (b_{bp}/b_p) 是波长的幂函数, 可通过 λ^{-n} 来估测, 其值的大小与颗粒物的大小有关, 颗粒越小, b_{bp}/b_p 越大, 一般在 0.017 ~ 0.029 之间变化, 上限为 0.5; Petzold^[8]研究认为圣地亚哥港湾的浑浊水体的后向散射概率为 0.019, 沿海海域水体为 0.013; David 等^[9]认为爱尔兰海水的后向散射概率约在 0.005 ~ 0.050 之间变化; 孙德勇等^[10]利用实测的太湖散射系数和后向散射系数计算得到太湖水体的后向散射概率在 0.002 ~ 0.031 之间, 均值为 0.011 ± 0.0057 。

收稿日期: 2010-03-18; 修订日期: 2010-04-27

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2008BAC34B05); 国家自然科学基金项目 (40971215); 江苏省研究生培养创新工程项目 (CX10B_392Z)

作者简介: 刘忠华 (1987 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水环境遥感, E-mail: liuzhonghua1987@yeah.net

* 通讯联系人, E-mail: liyunmei@nynu.edu.cn

根据前人的研究成果可以看出,不同水体的后向散射概率具有很大的差异性.巢湖是我国五大淡水湖之一,但对于巢湖后向散射概率的研究至今鲜有报道.本研究试图利用巢湖实测的固有光学量和表观光学量数据,基于生物光学模型在近红外波段的简化条件,利用 2 个近红外波段来估算出巢湖水体的后向散射概率,以期为准确计算巢湖水体的后向散射系数以及提高巢湖水体水质参数的反演提供理论基础.

1 材料与方法

1.1 采样时间与点位

巢湖位于安徽省中部,属长江下游左岸水系,东西长 54.5 km,南北宽 21 km,平均水深 4.5 m,水域面积约 750 km²,是安徽省境内最大的湖泊,为我国五大淡水湖之一.于 2009 年 6 月 13~16 日对巢湖 32 个样点进行固有光学量和表观光学量的测量,样点分布如图 1.

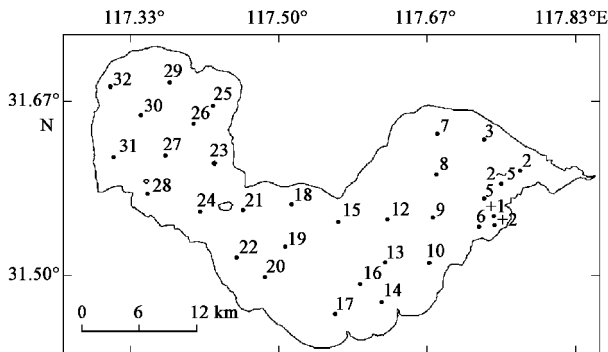


图 1 巢湖样点分布示意

Fig. 1 Sampling sites of Lake Chaohu

1.2 数据的获取

水面的反射光谱采用美国 ASD 公司生产的 ASD FieldSpec Pro 便携式光谱辐射计测量,其波段范围为 350~1050 nm,光谱分辨率为 2 nm.为减少水体镜面反射和船体阴影的影响,更好地提取出反映水体信息的离水辐亮度 L_w 和遥感反射率 R_{rs} ,测量时采用唐军武等^[11]提出的关于内陆二类水体水面以上光谱测量的方法.测量时,天空晴朗无云,湖面平静,待船停稳后,在甲板开阔处(距水面 1 m 左右)分别测量标准灰板、遮挡标准灰板、水体和天空光的光谱信息,以上 4 个参数各测量 10 条光谱曲线,在测量水面反射光谱的同时记录各测点的 GPS 坐标和当时的风速、风向以及时间.遥感反射率一般

通过下面 3 个公式提取^[12]:

$$R_{rs} = L_w / E_d(0^+) \quad (1)$$

$$L_w = L_{sw} - rL_{sky} \quad (2)$$

$$E_d(0^+) = L_p^* \pi / \rho_p \quad (3)$$

式中 R_{rs} 为遥感反射率, L_w 为离水辐亮度, $E_d(0^+)$ 为水面入射总辐照度, L_{sw} 为总的辐亮度, L_{sky} 为天空漫散射光,不带有任水体信息, r 参照唐军武等^[11]的研究取值为 0.025, L_p^* 为标准灰板实测值, ρ_p 为参考板的反射率.

水体颗粒物的散射系数采用 Wetlabs 公司的光谱吸收和衰减仪 (AC-S) 测量得到^[13].由 AC-S 直接测得的是水体的吸收系数 $a(\lambda)$ 和衰减系数 $c(\lambda)$,为了得到更为精确的吸收系数数据,需要对吸收系数作温度、盐度和散射纠正^[14](巢湖为淡水湖,盐度纠正可以忽略).经过纠正后的吸收和衰减系数是水体中颗粒物和黄质共同作用的结果,但黄质对光只具有单一的吸收作用^[15],所以衰减系数和吸收系数之差即水体中颗粒物的散射系数.

在光谱测量的同时采集表层水样,低温冷藏带回实验室测量悬浮物的浓度.总悬浮物浓度采用常规的干燥、烘烧、称重法 (GB 11901-89 标准) 测定.

总悬浮物的吸收采用定量滤膜技术 (QFT) 进行测定,用直径 47 mm 的 GF/F 滤膜过滤 200~400 mL 水样,用分光光度计测定滤膜上颗粒物的吸光度,用同样湿润程度的空白滤膜做参比,并且以 750 nm 处的吸光度为零点进行校正得到总悬浮物吸收系数;利用 NaClO₃ 对总悬浮物颗粒物进行漂白处理得到非色素颗粒物,用同样的方法测定非色素颗粒物吸收系数;总悬浮物吸收系数减去非色素颗粒物吸收系数得到色素颗粒物吸收系数;黄色物质 (CDOM) 吸收系数的测定采用 0.22 μm 的 Millipore 滤膜过滤已经过滤除去总悬浮物的水样,得到 CDOM 水样,利用分光光度计测量 CDOM 的吸光度,计算各波长的吸收系数,并以 750 nm 的吸光度作散射校正^[16].

1.3 数据的处理

对于各种参数的处理(包括计算最大值、最小值、均值以及数据的拟合等)利用 SPSS 11.5 完成,对后向散射概率的插值及等值线的生成利用 ArcGIS 9.2 完成.

2 后向散射概率生物光学反演模型

2.1 生物光学模型基础

内陆水体最常用的生物光学模型为^[17]:

$$R(0^-)(\lambda) = f \frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda) + b_b(\lambda)} \quad (4)$$

式中, $R(0^-)(\lambda)$ 为刚好位于水面以下遥感辐照度比, f 是一个与光场有关的参数, 取值范围为 0.2 ~ 0.56^[18], $a(\lambda)$ 为水体总的吸收系数, $b_b(\lambda)$ 为水体总的后向散射系数.

水体的吸收主要受纯水、叶绿素、黄色物质和悬浮物的影响, 因此水体总的吸收系数可表示为 4 种物质吸收系数的线性和:

$$a(\lambda) = a_w(\lambda) + a_{chl}(\lambda) + a_{cdom}(\lambda) + a_{tsm}(\lambda) \quad (5)$$

式中, $a_w(\lambda)$ 、 $a_{chl}(\lambda)$ 、 $a_{cdom}(\lambda)$ 、 $a_{tsm}(\lambda)$ 分别为纯水、叶绿素、黄色物质和悬浮物的吸收系数.

由于叶绿素和黄色物质的后向散射非常微弱, 常常忽略不计, 因此 $b_b(\lambda)$ 可表示为:

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

$$r_{rs}(\lambda) = \frac{R_{rs}(\lambda)}{[1 - r(\theta_v)] \times [1 - r(\theta_s)] / n^2} = \frac{f}{Q} \times \frac{b_{bw}(\lambda) + b_{bp}(\lambda)}{a_w(\lambda) + a_{chl}(\lambda) + a_{cdom}(\lambda) + a_{tsm}(\lambda) + b_{bw}(\lambda) + b_{bp}(\lambda)} \quad (8)$$

式中, $r_{rs}(\lambda)$ 为水面以下遥感反射率, 而各物质的吸收和后向散射系数又可以写成各自的单位吸收系数、单位后向散射系数与相应物质浓度的乘积.

2.2 后向散射概率生物光学反演模型的建立

一般认为, 当波长超过 750 nm 时, 叶绿素、悬浮物和黄色物质的吸收系数都降至 0, 而纯水在近红外波段的散射也降至很小, 因此式(8)可简化为:

$$r_{rs}(\lambda) = \frac{f}{Q} \frac{b_{bp}(\lambda)}{a_w(\lambda) + b_{bp}(\lambda)} \quad (9)$$

悬浮物的后向散射系数可以改写为悬浮物浓度(TSM)、单位后向散射系数 [$b_{bp}^*(\lambda)$] 和后向散射概率 [$\bar{b}_{bp}(\lambda)$] 三者的乘积, 即:

$$b_{bp}(\lambda) = TSM \times b_{bp}^*(\lambda) \times \bar{b}_{bp}(\lambda) \quad (10)$$

将式(10)带入到式(9)中可以得到:

$$r_{rs}(\lambda) = \frac{f}{Q} \times \frac{TSM \times b_{bp}^*(\lambda) \times \bar{b}_{bp}(\lambda)}{a_w(\lambda) + TSM \times b_{bp}^*(\lambda) \times \bar{b}_{bp}(\lambda)} \quad (11)$$

式中, $a_w(\lambda)$ 、 $b_{bw}(\lambda)$ [$b_{bw}(\lambda) = 0.5 \times b_w(\lambda)$] 可

$$\bar{b}_{bp} = \frac{r_{rs}(\lambda_1) \times a_w(\lambda_1) \times b_{bp}^*(\lambda_2) - r_{rs}(\lambda_2) \times a_w(\lambda_2) \times b_{bp}^*(\lambda_1)}{TSM \times b_{bp}^*(\lambda_1) \times b_{bp}^*(\lambda_2) \times [r_{rs}(\lambda_2) - r_{rs}(\lambda_1)]} \quad (12)$$

式中, λ_1 和 λ_2 为选择的 2 个波段, 其它参数意义同上.

式中, $b_{bw}(\lambda)$ 、 $b_{bp}(\lambda)$ 分别为纯水和悬浮物的后向散射系数.

刚好位于水面以下遥感辐照度比 $R(0^-)(\lambda)$ 可以由遥感反射率 R_{rs} 计算得到:

$$R(0^-)(\lambda) = \frac{R_{rs}(\lambda) \times Q}{[1 - r(\theta_v)] \times [1 - r(\theta_s)] / n^2} \quad (7)$$

式中, θ_v 是观测天顶角, 在测量水面的反射光谱时即仪器与水面法线方向的夹角, 一般将其设置为 30° ~ 45°; θ_s 是采样时的太阳天顶角, 可以通过采样的时间和样点的经纬度计算得到; $r(\theta_v)$ 是水-气界面的反射率, $r(\theta_s)$ 为气-水界面的反射率, 均可以通过 Fresnel 公式计算得到; n 为水体的折射指数, 一般取值为 1.34; Q 为依赖于水体光场分布的参数, 受不同的水体、太阳角度、观测角度的影响, 一般取值在 1.7 ~ 7 之间^[19].

由式(4) ~ (7)可以得到:

$$b_{bw}(\lambda) + b_{bp}(\lambda) \quad (8)$$

以从文献[20]中查到, TSM、 $b_{bp}^*(\lambda)$ 分别是实测的悬浮物浓度和由实测散射系数拟合得到的单位散射系数.

Ulloa 等^[21]假设指数为常数, 从理论上推导出悬浮颗粒物后向散射概率与波长无关; Twardowski 等^[22]利用现场测量数据得出悬浮颗粒物后向散射概率对波长的依赖性很弱; 刘炜等^[23]对于黄东海的研究结论表明悬浮颗粒物后向散射概率较为稳定; Tzortziou 等^[24]根据 Chesapeake 湾的实测数据得出颗粒物后向散射概率具有较弱的波长依赖性. 本研究根据前人的研究结果, 将后向散射概率视为一个波长依赖性很弱的固有光学量 [将各样点的悬浮物后向散射概率视为一个常量, 即 $\bar{b}_{bp} = \bar{b}_{bp}(\lambda)$] 来进行悬浮颗粒物后向散射概率的反演. 方程(11)中只有 3 个未知量: f 、 Q 和 \bar{b}_{bp} , 而 \bar{b}_{bp} 是最终所要求的未知量, 因此, 只要利用 2 个波段的实测数据来消除中间量 f 和 Q 就可以求出每个样点的后向散射概率 \bar{b}_{bp} , 由此可以得到颗粒物后向散射概率 (\bar{b}_{bp}) 的生物光学反演公式:

由于上述颗粒物后向散射概率的估算模型是基于生物光学模型在近红外波段的简化原理建立的,

模型中去除了叶绿素、悬浮物和黄色物质吸收的影响,总的吸收系数仅取决于纯水的吸收,因此,波段 λ_1 和 λ_2 均应在近红外波段选取.图2给出了巢湖实测叶绿素、悬浮物、黄色物质的平均吸收系数以及纯水的吸收系数,通过对实测吸收系数的观察可以看出,叶绿素吸收系数在730 nm以后下降为0,黄色物质的吸收系数在650 nm以后下降为0,悬浮物吸收系数在775 nm以后下降为0,而纯水在775 nm以后吸收明显增强,所以波段 λ_1 和 λ_2 的选择范围应为775 nm以后的近红外波段,具体波段的选择参照文献[25]中的方法进行选择.

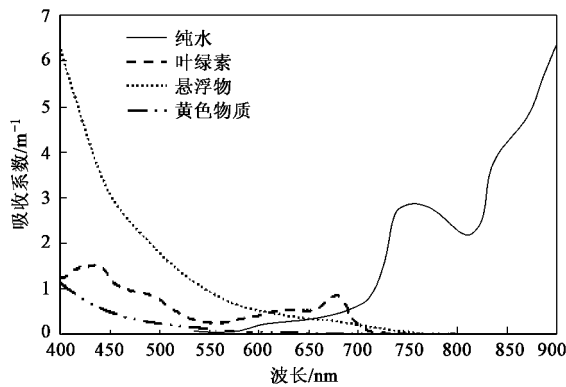


图2 水体各组分吸收系数

Fig. 2 Absorption coefficient of different components in water

3 结果与分析

3.1 巢湖水体反射光谱特征

对计算得到的遥感反射率光谱曲线进行筛选,去除阴天光照条件差时测量的数据以及异常的数据,最终选取27个样点的数据进行后向散射概率的估算.图3为巢湖水体27个样点400~900 nm范围内的实测反射光谱曲线,可以看出其光谱特征具有典型的内陆二类水体特征:在400~500 nm范围内由于叶绿素a和黄色物质在该范围内的强烈吸收使得水体的反射率较低;在550~580 nm范围内的反射峰是由于叶绿素和胡萝卜素的弱吸收以及细胞的散射作用形成的;在625 nm左右由于藻蓝蛋白的吸收出现一小的反射谷;670 nm处由于叶绿素对红光的强烈吸收形成吸收谷;700 nm左右存在一明显的叶绿素荧光峰,其存在与否被认为是判定水体是否含藻类叶绿素的依据^[26];700 nm以后反射率迅速下降,直到808 nm左右又出现一反射峰,该反射峰可能是由于悬浮物的散射形成的.

3.2 巢湖水体悬浮物比散射系数光谱特征

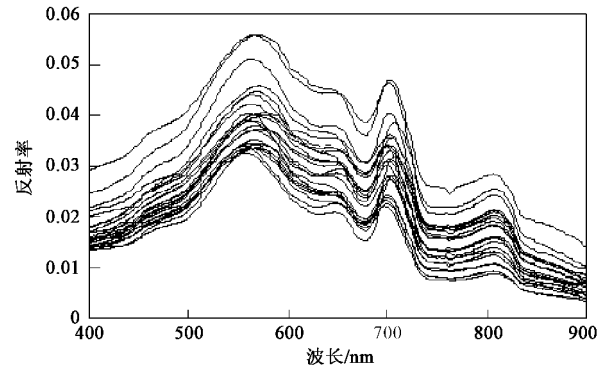


图3 巢湖水体反射光谱曲线

Fig. 3 Reflectance curves of water in Lake Chaohu

悬浮物的单位散射系数或比散射系数(b_p^*)被定义为悬浮物的散射系数与悬浮物浓度的比值(b_p/TSM).对于不同波段的悬浮物的单位散射系数,Herlevi^[27]认为其满足以下规律:

$$b_p^*(\lambda) = b_p^*(\lambda_0) \times \left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^n \quad (13)$$

式中, λ_0 为参考波段,一般取532 nm, n 为随波长变化的指数,且随不同水体而变化.

由于AC-S测得的散射系数最大波长为750.6 nm,而本研究中对巢湖后向散射概率的估算需要用到750 nm以后的近红外波段的单位散射系数,因此采用式(13)对各个样点的单位散射系数进行拟合,从而得到各样点400~900 nm范围的单位散射系数.

利用AC-S实测悬浮颗粒物散射系数与实测悬浮物浓度之比得到各样点400~750 nm范围内颗粒物的单位散射系数,然后在SPSS软件中对式(13)中的指数 n 进行拟合.拟合结果显示,除12号样点的拟合精度稍低($R^2 = 0.855$)外,其余各点的拟合效果都很好, R^2 均在0.94以上,并且绝大部分样点的 R^2 都超过了0.98,说明利用该方法可以较为准确地得到400~900 nm范围内悬浮颗粒物单位散射系数.利用公式(13),选择532.5 nm作为参考波段,根据上述拟合得到的 n 值计算各样点400~900 nm范围颗粒物单位散射系数.图4给出了27个样点的颗粒物的单位散射系数光谱曲线,可以看出,与悬浮物的散射系数特征类似,悬浮物的单位散射系数光谱形态单一,悬浮物单位散射系数大致随波长的增加而减小.不同样点间悬浮物单位散射系数光谱形状大致相似,但单位散射系数值差别较大,并且波长越短,差别相对越大,随波长的增加,差别逐渐减小,蓝光波段440 nm处的最大值为 $0.882 \text{ m}^2/\text{g}$,

最小值为 $0.385 \text{ m}^2/\text{g}$, 均值为 $0.682 \text{ m}^2/\text{g}$; 绿光波段 532 nm 处的最大值为 $0.797 \text{ m}^2/\text{g}$, 最小值为 $0.332 \text{ m}^2/\text{g}$, 均值为 $0.604 \text{ m}^2/\text{g}$; 红光波段 676 nm 处的最大值为 $0.663 \text{ m}^2/\text{g}$, 最小值为 $0.257 \text{ m}^2/\text{g}$, 均值为 $0.479 \text{ m}^2/\text{g}$; 近红外波段 800 nm 处的最大值为 $0.621 \text{ m}^2/\text{g}$, 最小值为 $0.229 \text{ m}^2/\text{g}$, 平均值为 $0.449 \text{ m}^2/\text{g}$.

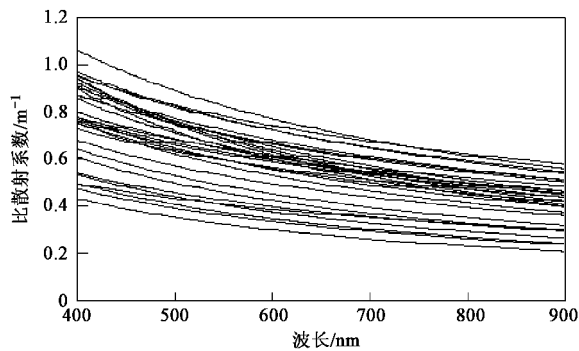


图4 悬浮物单位散射系数曲线

Fig. 4 Specific scattering coefficient curves of TSM

3.3 巢湖水体后向散射概率及其分布

从图3中可以看出, 水体反射光谱在 850 nm 后迅速下降, 当遥感反射率的值较小时, 数据的信噪比将会降低, 从而会对估算的结果产生较大的误差^[25]. 结合2.2节中的论述, 本研究选取 $775 \sim 850 \text{ nm}$ 范围内的波段的遥感反射率来估算巢湖后向散射概率. 在利用上述建立的模型估算悬浮物的后向散射概率时, 需要选择近红外波段的2个波长处的遥感反射率作为输入. 本研究参照文献[25]中的方法选择 $775 \sim 850 \text{ nm}$ 范围内水体反射光谱的极值点和拐点处的遥感反射率作为输入. 为了更准确地找出光谱曲线中极值点和拐点所在的波段, 对光谱曲线进行一阶微分, 一阶微分为正值表示光谱曲线上升, 一阶微分为负值表示光谱曲线下降, 一阶微分为0的点对应原始光谱曲线中的极值点, 一阶微分中的极大值或极小值意味着原始光谱曲线中相邻波段遥感反射率变化最大(即拐点). ASD野外光谱辐射仪采集的是离散型数据, 因此光谱数据一阶微分可用公式(14)近似计算:

$$R(\lambda_i)' = \frac{R(\lambda_{i+1}) - R(\lambda_{i-1})}{\lambda_{i+1} - \lambda_{i-1}} \quad (14)$$

式中, λ_{i+1} 、 λ_i 、 λ_{i-1} 为相邻波长, $R(\lambda_i)'$ 为波长 λ_i 的一阶微分反射光谱. 计算得到的遥感反射率一阶微分光谱曲线如图5所示.

从图5中可以看出, $775 \sim 850 \text{ nm}$ 水体反射光

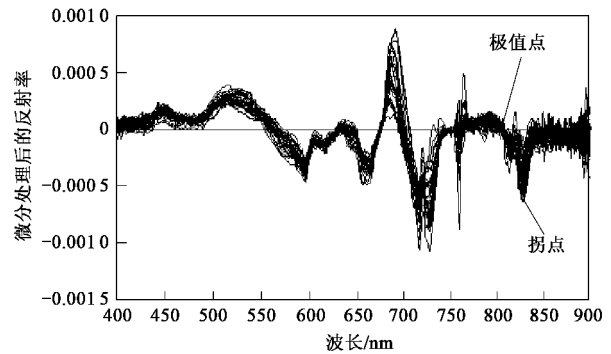


图5 巢湖水体反射光谱一阶微分曲线

Fig. 5 First-order differential curves of reflectance spectrum in Lake Chaohu

谱的一阶微分存在一个明显的一阶微分值为0的波段(808 nm) 和一个一阶微分值最小的波段(827 nm), 这2个波段分别对应水体反射光谱曲线中的峰值点和拐点, 因此选择 808 nm 和 827 nm 来估算巢湖水体的后向散射概率. 本研究中波段的选择与Zhang等^[25]利用生物光学模型估算太湖悬浮物浓度时所选取的波段(814 nm 和 828 nm)相似, 尤其是第二波段(827 nm 和 828 nm)的选择基本一致, 第一波段(808 nm 和 814 nm)的差别相对于第二波段较大, 其原因可能是巢湖和太湖悬浮物的浓度及其组成不同导致反射光谱曲线中峰值的位置不同.

图6为巢湖各后向散射概率区间内样点的个数的统计, 从中可以看出, 巢湖后向散射概率空间差异性较大, 27个样点后向散射概率最大值为0.059(出现在6号点), 最小值为0.0014(出现在7号点), 均值为0.0236, 该平均值高于Kirk^[5]、Petzold^[8]和孙德勇等^[10]的研究结果, 而低于马荣华^[3]和Whitlock^[6]等的研究结果, 原因是不同学者研究的湖区及采样的时间不同, 而不同湖区及不同

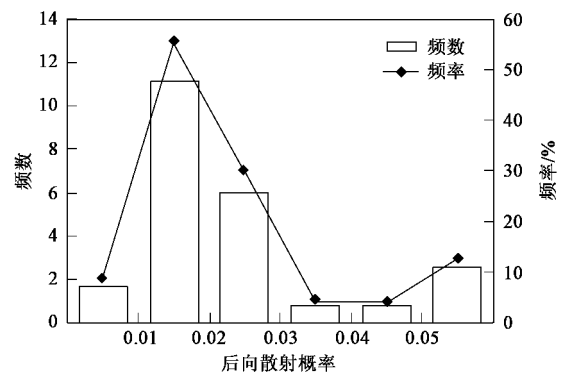


图6 后向散射概率统计

Fig. 6 Statistics of backscattering rate

季节悬浮颗粒物的浓度、粒径大小及颗粒物的组成可能存在较大的差别,从而导致不同湖区悬浮物后向散射概率有所不同.后向散射概率最为集中的区间为 0.01~0.02,有 13 个样点,有 81.48% 的样点的后向散射概率 < 0.03,仅有 2 个样点的后向散射概率位于 0.03~0.05 之间,而后向散射概率较高 (> 0.05) 的点有 3 个,分别位于 6、20 和 32 号点,这 3 个点均位于巢湖的边缘.

在 ArcGIS 9.2 中对计算得到的 27 个样点的后向散射概率进行反距离权重插值,然后做后向散射概率分布的等值线图,结果如图 7.

从总体上来看,巢湖水体颗粒物后向散射概率空间分布差异性较大,巢湖西部水体颗粒物后向散射概率大于巢湖东部,大致以巢湖中心区域为边界线.而无论是巢湖东部湖区还是西部湖区,颗粒物后向散射概率分布的等值线均是沿岸较为密集,湖心相对稀疏,其原因主要是沿岸区域相对于湖心区域而言有机颗粒物和无机颗粒物的浓度较高,物质组成更为复杂,悬浮颗粒物分布的空间差异性更大;巢湖东部除东南部沿岸部分区域外,大部分区域的后向散射概率 < 0.02,并且其空间分布的差异性较小;相比于巢湖东部,巢湖西部后向散射概率的空间分布的差异性较大,除部分较小的区域外,大部分区域的后向散射概率 > 0.02,该区域涵盖了巢湖中后向

散射概率最大 (> 0.05) 的 2 个区域,该湖区后向散射概率取值区间为 0.01~0.06,几乎覆盖了巢湖后向散射概率取值的全部区间;巢湖中有 3 个后向散射概率相对较高 (> 0.05) 的区域,分别位于巢湖的西北部沿岸、南部沿岸和东南部沿岸,对照巢湖流域图可以看出,这 3 个区域均位于河流入湖口,其后向散射概率较大的原因可能是由于入湖河流带来大量的颗粒物以及水流的冲击作用使得该区域的颗粒物粒径较小,从而导致相应区域的后向散射概率较大.水体颗粒物后向散射概率主要受颗粒物的组成、粒径大小、悬浮物浓度等影响,一般来说有机颗粒物的后向散射小于无机颗粒物,粒径越小,后向散射概率越大,巢湖水体颗粒物以无机颗粒物为主导,绝大部分样点无机颗粒物所占比例在 60% 以上,因此,巢湖水体颗粒物后向散射概率要大于以藻类等有机颗粒物占主导的水体.巢湖悬浮泥沙的主要来源于各入湖河流所挟带的泥沙,巢湖湖盆本身所形成的泥沙一般来说为量不大,但在局部地区由于风浪、湖流冲击产生崩岸以及泥沙被搅拌时,悬浮泥沙含量会显著增加,而巢湖多数湖岸属于砂土质湖岸,这类湖岸土质疏松,易发生崩岸,这也是造成巢湖水体颗粒物后向散射概率在巢湖内部空间差异相对较小,而在巢湖沿岸尤其是入湖河流河口空间差异性较大的原因之一.

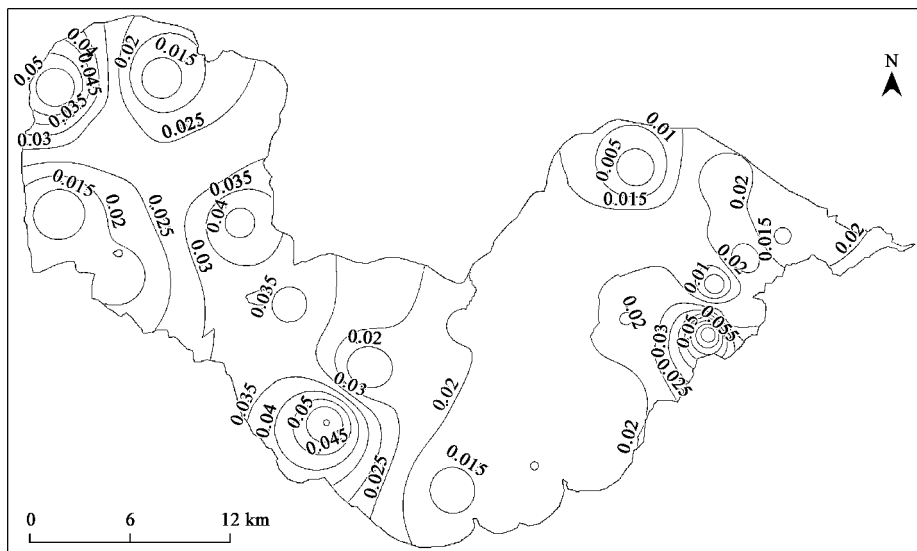


图 7 巢湖后向散射概率分布

Fig. 7 Distribution of backscattering rate in Lake Chaohu

3.4 巢湖水体颗粒物主导因子

颗粒物折射指数取决于后向散射概率和颗粒物大小分布的双曲坡度,而颗粒物大小分布的双曲坡

度 ε 可以根据 $\gamma = \varepsilon - 3$ 的关系由颗粒物的衰减光谱 γ 估算出来,水中颗粒物折射指数和后向散射概率之间的关系可被描述为^[22]:

$$n_p = 1 + 1.671 \times \bar{b}_{bp}^{0.582} \quad (15)$$

式中, n_p 是水中颗粒物折射指数, \bar{b}_{bp} 是水体颗粒物的后向散射概率。

Morel 等^[28]认为以藻类颗粒物为主导的一类水体的后向散射概率要低于黄质控制的二类水体, \bar{b}_{bp} 分别为 0.008 和 0.0125, 说明黄质控制的水体的微小颗粒物的相对富集程度要高于以藻类颗粒物为主导的二类水体。从上述对巢湖后向散射概率分布的分析可以看出, 巢湖后向散射概率的变化范围相对较大, 其分布的空间差异性较大, 其原因可能是由于不同区域水体中颗粒物的主导因子不同, 因此采用颗粒物的折射指数对颗粒物主导因子进行量化。一般来说, 浮游植物的折射指数较低, 大致在 1.01 ~ 1.09 之间, 无机颗粒物及碎屑的折射指数相对较高, 一般在 1.15 ~ 1.20 之间, 折射指数在 1.09 ~ 1.15 范围内变化的为两者共同主导^[29]。据此将水中颗粒物的主导因子分为 3 类, ①浮游植物主导型 ($n_p < 1.09$); ②无机颗粒物主导型 ($n_p > 1.15$); ③两者共同主导型 ($1.09 < n_p < 1.15$)。27 个样点中折射指数最大值为 1.322, 最小值为 1.037, 均值为 1.181, 部分样点的折射指数 > 1.20 , 大于 Mobley-Curtis 等^[29]的研究结果, 其原因可能是由于不同的采样时间以及不同的湖区颗粒物的浓度及其组成不同所致。所有样点中有 74% 的样点 (20 个) 的折射指数 > 1.15 , 其水体的散射特性由无机颗粒物主导, 18.5% 的样点折射指数介于 1.09 ~ 1.15 之间, 其散射特性由无机颗粒物和藻类颗粒物共同主导, 仅有 2 个样点的颗粒物折射指数 < 1.09 , 占总样点的 7.4%。由上述分析可以看出, 巢湖绝大部分水域水体的散射特性取决于无机颗粒物, 有部分水域的散射特性是由无机颗粒物和藻类颗粒物共同主导的, 而单纯由藻类颗粒物主导的水域非常少, 由此可认为巢湖水体的散射特征主要取决于无机颗粒物, 而藻类颗粒物影响相对较小。

4 结论

(1) 巢湖水体颗粒物后向散射概率介于 0.0014 ~ 0.056, 平均值为 0.0236。

(2) 巢湖水体颗粒物后向散射概率空间分布的差异性较大, 总体而言, 巢湖西部大于东部, 相对于巢湖东部, 巢湖西部水体颗粒物的后向散射概率分布的空间差异性更大, 此外, 水体颗粒物后向散射概率在巢湖沿岸分布的差异性要大于巢湖内部, 后向散射概率较大值均分布在巢湖沿岸入湖河流的河口

区域。

(3) 巢湖水体的散射特性主要取决于无机颗粒物, 藻类颗粒物的影响相对较小。

致谢: 感谢施坤博士、金鑫硕士在论文的写作与修改过程中给予的指导和帮助, 感谢所有参加巢湖实验工作人员的辛勤工作。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 马荣华, 唐军武, 段洪涛, 等. 湖泊水色遥感研究进展[J]. 湖泊科学, 2009, 21(2): 143-158.
- [3] 马荣华, 宋庆君, 李国砚, 等. 太湖水体后向散射概率[J]. 湖泊科学, 2008, 20(3): 375-379.
- [4] HOBI-labs Inc. Backscattering sensor calibration manual [EB/OL]. <http://www.hobilabs.com> 2003-07-24.
- [5] Kirk J T O. Estimation of the scattering coefficient of natural waters using underwater irradiance measurements [J]. Australian Journal of Marine and Freshwater Research, 1981, 32: 533-539.
- [6] Whitlock C H, Pool L R, Usry J W, et al. Comparison of reflectance with backscatter and absorption parameters for turbid waters [J]. Applied Optics, 1981, 20: 517-522.
- [7] Aas E, Håkedal J, Sørensen K. Spectral backscattering coefficient in coastal waters [J]. International Journal of Remote Sensing, 2005, 26: 331-343.
- [8] Petzold T J. Volume scattering functions for selected ocean waters [M]. San Diego: Scripps Institution of Oceanography Ref, 1972. 72-78.
- [9] David M, Alex C. Identification and characterization of two optical water types in the Irish Sea from in situ inherent optical properties and seawater constituents [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2006, 68: 305-316.
- [10] 孙德勇, 李云梅, 乐成峰, 等. 太湖水体散射特征及其与悬浮物浓度关系模型[J]. 环境科学, 2007, 28(12): 2688-2694.
- [11] 唐军武, 田国良, 汪小勇, 等. 水体光谱测量与分析 I: 水面上测量法[J]. 遥感学报, 2004, 8(1): 37-44.
- [12] 唐军武. 海洋光学特性模拟与遥感模型[D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 1999.
- [13] Moore C, Barnard A, Hankins D, et al. Spectral Absorption and Attenuation Meter (ac-s) Use's Guide, Revision A [D]. America: WET Labs Inc, 2004.
- [14] Zaneveld J R V, Kitchen J C, Moore C C, et al. Scattering error correction of reflecting-tube absorption meters [A]. In: Proceeding of SPIE. Ocean Optics: X II [C]. Bellingham: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 1994. 44-45.
- [15] 俞宏, 蔡启铭, 吴敬祿. 太湖水体吸收系数与散射系数的特征研究[J]. 水科学进展, 2003, 14(1): 46-49.
- [16] Sun D Y, Li Y M, Wang Q, et al. Parameterization of water component absorption in an inland eutrophic lake and its seasonal variability: a case study in Lake Taihu [J]. International Journal of Remote Sensing, 2009, 30(13): 3549-3571.

- [17] Dekker A G. Detection of optical water quality parameters for eutrophic waters by high resolution remote sensing [D]. Amsterdam ,Netherlands:Vrije University ,1993.
- [18] 李云梅,黄家柱,陆皖宁,等. 基于分析模型的太湖悬浮物浓度遥感监测[J]. 海洋与湖沼, 2006, **37**(2): 171-177.
- [19] Gons H J. Optical Teledetection of Chlorophyll a in turbid Inland Waters[J]. Environment Science & Technolgy ,1999, **33**(7): 1127-1132.
- [20] Pope R M ,Fry E S. Absorption spectrum (380-700) of pure water II. Integrating cavity measurement [J]. Applied Optics , 1997, **36**(33): 8710-8723.
- [21] Ulloa O ,Sathyendranath S ,Platt T. Effect of the particle-size distribution on the backscattering ratio in seawater[J]. Applied Optics ,1994, **33**:7070-7077.
- [22] 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 Geophysical Research 2001, **106**(C7):14129-14142.
- [23] 刘炜,李铜基. 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.
- [24] Tzortziou M ,Herman J R ,Gallegos C L ,*et al.* Bio-optics of the Chesapeake Bay from measurements and radiative transfer closure [J]. Estuarine Coastal and Shelf Science, 2006, **68**:348-362.
- [25] Zhang B ,Li J S ,Shen Q ,*et al.* A bio-optical model based method of estimating total suspended matter of Lake Taihu from near-infrared remote sensing reflectance [J]. Environmental Monitoring and Assessment 2008, **145**:339-347.
- [26] 焦洪波,查勇,李云梅,等. 基于高光谱遥感反射比的太湖水体叶绿素 a 含量估算模型[J]. 遥感学报, 2006, **10**(2):242-248.
- [27] Herlevi A. Inherent and apparent optical properties in relation to water quality in Nordic Waters [M]. Report Series in Geophysics 2002.
- [28] Morel A ,Gentili B ,Chami M ,*et al.* Bio-optical properties of high chlorophyll case 1 waters and of yellow-substance-dominated case 2 waters [J]. Deep-Sea Research I 2006, **53**(9):1439-1459.
- [29] Mobley-Curtis D. light and Water: Radioactive transfer in Natural Waters [M]. San Diego:Academic Press ,1994. 117-119.