

# 内陆水体后向散射系数模拟研究

张红, 李云梅\*, 黄家柱, 刘忠华, 徐祎凡, 徐昕, 郭宇龙, 檀静

(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: 在利用半分析方法结合光学闭合原理模拟水体后向散射系数的过程中, 参考波长的选择对最终结果有较大影响. 为了得出最佳参考波长的影响因子, 利用太湖、巢湖和滇池的野外实测数据, 对后向散射系数进行模拟, 进而分析水体的最佳参考波长与其对应的水质参数浓度之间的变化规律. 同时, 建立了太湖、巢湖和滇池水体的后向散射系数曲线的幂函数光谱模型, 获得的光谱指数分别为  $2.643 \pm 0.317$ 、 $2.719 \pm 0.242$ 、 $1.638 \pm 0.534$ . 结果表明: ①以整个湖泊为研究对象时, 最佳参考波长随着湖泊水体中总颗粒物浓度  $c_{\text{SPM}}$ 、有机颗粒物浓度  $c_{\text{SPOM}}$  和叶绿素浓度  $c_{\text{CHL}}$  平均值的增大而向长波方向移动, 太湖、巢湖和滇池水体的最佳参考波长分别为 695、720 和 730 nm; ②以单个湖泊的各个样点为研究对象时, 由于内陆湖泊光学特性的复杂性, 最佳参考波长的影响因子存在一定差异, 但  $c_{\text{SPM}}$  是一个共同的影响因子. 此外, 过高的  $c_{\text{CHL}}$  将削弱水质参数浓度与最佳参考波长间的规律性; ③在以无机颗粒物为主的水体中, 后向散射系数与总颗粒物浓度之间存在更好的相关性, 如在太湖水体中,  $R^2$  达到 0.852.

关键词: 半分析方法; 光学闭合原理; 后向散射系数; 最佳参考波长; 影响因子

中图分类号: X87 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)09-2522-09

## Simulation of Backscattering Coefficients of Inland Waters

ZHANG Hong, LI Yun-mei, HUANG Jia-zhu, LIU Zhong-hua, XU Yi-fan, XU Xin, GUO Yu-long, TAN Jing

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

**Abstract:** When we simulated backscattering coefficients ( $b_{\text{bp}}$ ) using quasi-analytical algorithm and optical closure theory, it was found that the position of reference wavelength ( $\lambda_0$ ) had great impact on final results. In order to identify influence factors of the optimum  $\lambda_0$ , datasets of Lake Taihu, Lake Chaohu and Lake Dianchi were used. After simulating of  $b_{\text{bp}}$ , the relationship between optimum  $\lambda_0$  and associated water quality parameters were analyzed. Meanwhile, power functions were utilized to model  $b_{\text{bp}}$  spectra, and spectral slope parameters of Lake Taihu, Lake Chaohu and Lake Dianchi were  $2.643 \pm 0.317$ ,  $2.719 \pm 0.242$ ,  $1.638 \pm 0.534$ , respectively. The results indicate that: ①When the whole lakes are taken as objects of study, the  $\lambda_0$  should be changed to longer wavelength with the increasing of total suspended particle matter concentration ( $c_{\text{SPM}}$ ), suspended organic particle matter concentration ( $c_{\text{SPOM}}$ ) and chlorophyll a concentration ( $c_{\text{CHL}}$ ). The optimum location of  $\lambda_0$  of Lake Taihu is 695 nm, Lake Chaohu is 720 nm and Lake Dianchi is 730 nm; ②When the samples in lakes are taken as objects of study, the influence factors are different due to the complexity of optical properties of inland waters. But it is to be noted that,  $c_{\text{SPM}}$  is a key factor in common. Besides, the regularity mentioned above should be weakened with high  $c_{\text{CHL}}$ . ③The relationship between  $b_{\text{bp}}$  and  $c_{\text{SPM}}$  is much stronger in the waters with suspended particles dominated by inorganic particles, in Lake Taihu, for example, relationship between these two variables is strong with  $R^2 = 0.852$ .

**Key words:** quasi-analytical algorithm; optical closure theory; backscattering coefficients; the optimum reference wavelength; influence factors

光线进入水体后, 受到吸收和散射 2 种作用的影响, 可用吸收系数、散射系数、后向散射系数、体散射函数和散射相函数等进行表征. 这些参数的光学特性和外界光场变化无关, 只和水体组分的浓度与成分有关, 因此被称为固有光学参数<sup>[1]</sup>. 它是生物光学模型的重要输入参数, 对它的光学特性的研究是进行水色遥感的基础. 2002 年 Lee 等<sup>[2]</sup>提出了一种基于辐射传输原理估算水体吸收和后向散射系数的半分析方法, 国内外已有诸多学者利用该算法开展了研究<sup>[3-12]</sup>, 主要包括对算法的检验、应用和改进, 对研究区域固有光学特性的分析等. 但需注意的是, 各学者在模拟不同水体的后向散射系数时往往

采用不同的参考波长, Le 等<sup>[12]</sup>指出在应用半分析方法时, 需根据不同水体的光学特性及其时空变化特征, 选用不同的参考波长, 如 Lee 等<sup>[2]</sup>采用了 555 nm 和 640 nm 作为参考波长, 其中 640 nm 对应的是高吸收水体, Lubac 等<sup>[6]</sup>则以 532 nm 和 650 nm 作为参考波长, 乐成峰等<sup>[3]</sup>根据太湖水体的吸收特性, 将参考波段确定为 715 nm. 虽然目前普遍认为,

收稿日期: 2010-10-11; 修订日期: 2010-11-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(40971215); 高分水环境遥感监测示范关键技术研究项目(E0203/1112-07)

作者简介: 张红(1987-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水质遥感, E-mail: zhanghong1987@hotmail.com

\* 通讯联系人, E-mail: liyunmei@njnu.edu.cn

在高吸收水体中,参考波长的选择需要向长波方向移动从而获得更好的反演结果<sup>[2,3]</sup>,但是有关参考波长的影响因子以及针对特定湖泊该如何确定最佳参考波长却鲜有报道.因而,本研究利用太湖、巢湖、滇池的野外实测数据,对各湖泊水体的后向散射系数进行模拟,尝试分析最佳参考波长的影响因子,并对以上3个湖泊水体后向散射系数的光学特性进行分析,以期为我国内陆湖泊水体后向散射系数的模拟和研究提供方法参考和数据基础.

## 1 材料与方 法

### 1.1 采样时间与点位

2009年6月、2009年9月、2010年5月分别对巢湖、滇池和太湖进行野外观测,测量的参数包括水

面以上的遥感反射率  $R_{rs}$ 、总颗粒物吸收系数  $a_p$ 、有色可溶性有机物(CDOM)吸收系数  $a_g$ 、总颗粒物浓度  $c_{SPM}$ 、有机颗粒物浓度  $c_{SPOM}$ 、无机颗粒物浓度  $c_{SPIM}$ 、叶绿素 a 浓度  $c_{CHL}$  等.图1为太湖(32个样点)、巢湖(32个样点)、滇池(25个样点)的野外实验的样点分布图.

### 1.2 水质参数的测定

利用表层水测量方法采集的水样立即被保存在低温条件下(2~4℃),并于当天内将水样运送到实验室进行分析.总颗粒物吸收系数采用定量滤膜技术(QFT)测定,仪器型号为岛津UV-2401PC,光谱范围和采样间隔分别为350~800nm和1nm,最后利用Cleveland等<sup>[13]</sup>提出的公式进行放大因子校正和计算.CDOM的光谱吸收系数的测定先用0.22μm

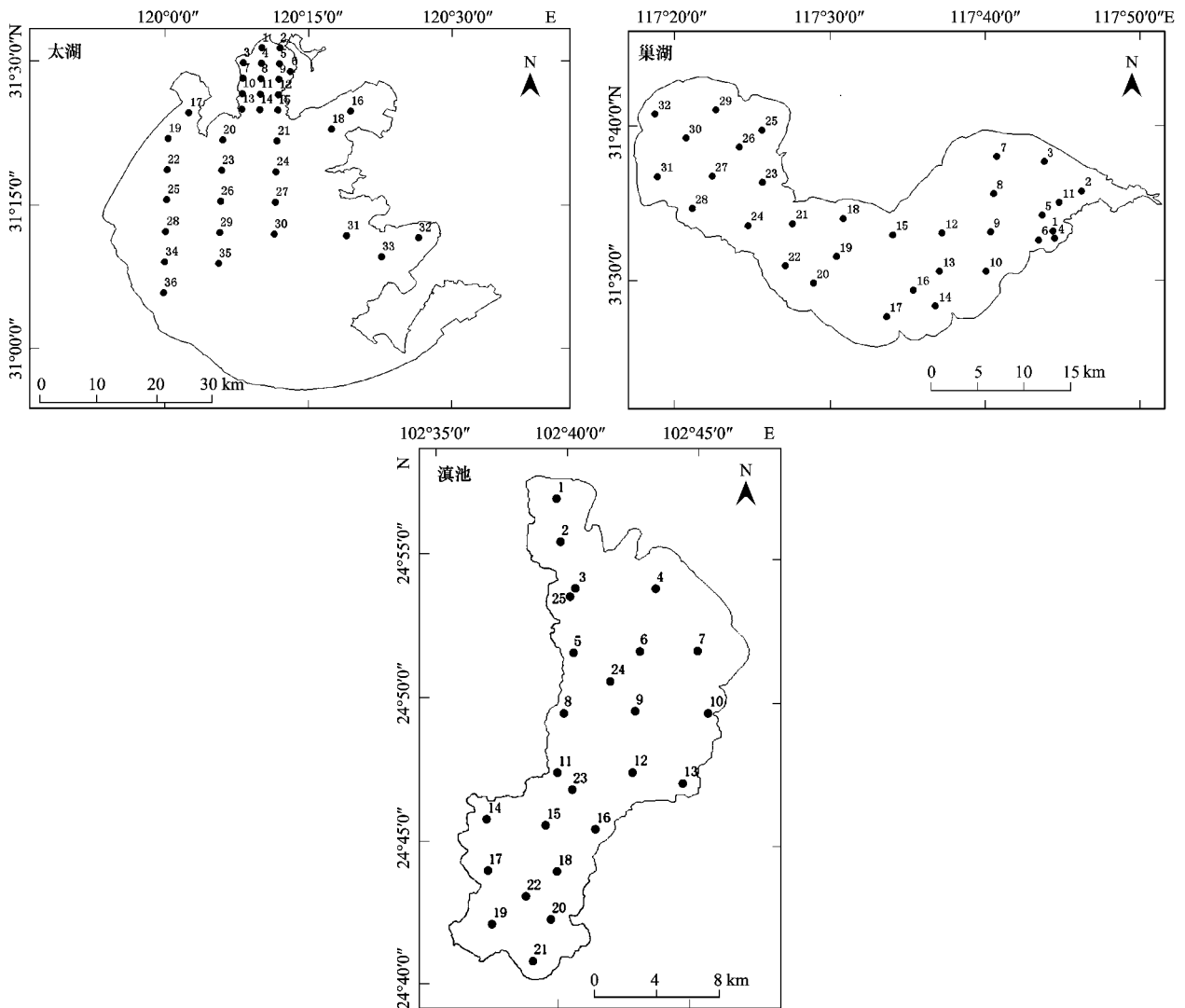


图1 太湖、巢湖、滇池采样站点分布

Fig.1 Spatial distribution of samples in Lake Taihu ,Lake Chaohu and Lake Dianchi

的 Millipore 膜过滤得到 CDOM 水样,再利用岛津 UV-2401PC 测定其吸光度,光谱范围为 240 ~ 800 nm,采样间隔为 1 nm,然后根据 Bricaud 等<sup>[14]</sup>的方法进行散射效应的校正并计算得到  $a_g$ .

总颗粒物浓度、无机颗粒物浓度和有机颗粒物浓度的测定采用常规的 GB 11901-89 烘干称重法,叶绿素 a 浓度的测定采用陈宇炜等<sup>[15]</sup>的“热乙醇法”进行萃取,然后用 90% 的乙醇作为参比液测定其吸光度,最后利用 Lorenzen<sup>[16]</sup>提出的方法计算得到  $c_{CHL}$ .

利用 ASD FieldSpec Pro 便携式光谱辐射计(美国 ASD 公司生产)获得水面以上的遥感反射率,具体测量方法和数据处理流程参见唐军武等<sup>[17]</sup>的研究,在此不予赘述.

在获得各水质参数数据后,观察其数值范围和光谱特征变化,除了巢湖水体 22 号点和 25 号点的  $R_{rs}$  曲线存在异常外,其余数据均正常,最终共保留了 87 个样本用于数据的分析.

### 1.3 后向散射系数的模拟

Lee 等<sup>[2]</sup>提出了一种计算水体后向散射系数的半分析方法,它利用辐射传输方程的近似解构建遥感反射率与水体中各水色因子固有光学特性之间的关系模型.考虑到原算法在计算过程中引入了若干经验公式,不适合我国内陆的浑浊湖泊水体,因此本研究采用乐成峰等<sup>[3]</sup>模拟太湖水体后向散射系数时的算法.同时,为了得到适用于太湖、巢湖、滇池水体后向散射系数模拟的最佳参考波长,对该算法做出了一定调整.以太湖为例,具体算法流程见图 2 和图 3,其中  $P_d(i)$ 、 $P_d(\text{太湖})$  分别为太湖中样点  $i$  处水体的模拟总吸收和实测总吸收在可见光波段的平均相对误差、整个太湖中所有样点处水体的模拟总

吸收和实测总吸收在可见光波段的平均相对误差; $a$ 、 $a_w$ 、 $a_{\text{模拟}}$ 、 $a_{\text{实测}}$  分别为水体总吸收、纯水吸收、模拟的水体总吸收、实测的水体总吸收; $b_{bp}$ 、 $b_{bw}$  分别为颗粒物后向散射系数、纯水后向散射系数; $\lambda_0$ 、 $r_{rs}$ 、 $u$ 、 $Y$  分别为参考波长、水面以下的遥感反射率、后向散射系数与后向散射系数和总吸收系数之和的比例、幂函数的斜率.

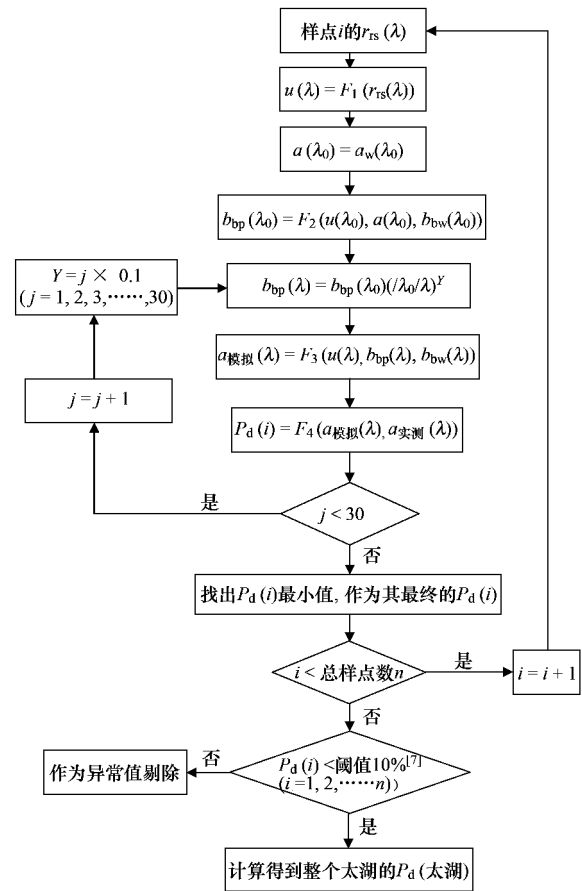


图 3 太湖水体后向散射系数的模拟误差的计算步骤

Fig. 3 Steps of calculation the average relative error in simulating backscattering coefficients of Lake Taihu

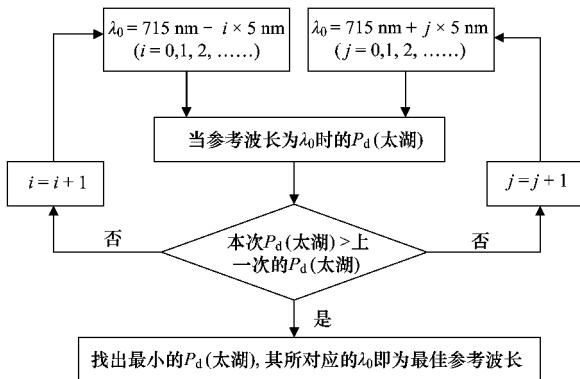


图 2 确定模拟太湖水体后向散射系数的最佳参考波长的步骤

Fig. 2 Steps of determination of the optimum reference wavelength in simulating backscattering coefficients of Lake Taihu

## 2 结果与分析

### 2.1 太湖、巢湖、滇池的遥感反射率光谱特征

图 4 是太湖、巢湖和滇池水体各样点的遥感反射率光谱曲线.从图 4 中可以看出,太湖水体的光学特性受非藻类颗粒物主导,遥感反射率光谱曲线在 675 nm 附近存在叶绿素的弱吸收峰,而 440 nm 附近的叶绿素吸收峰和 620 nm 附近的藻蓝蛋白吸收峰特征都被淹没在其它水色因子的光学信号中,几近消失;巢湖水体的遥感反射率曲线在 440、620 和 675 nm 附近的藻类色素

吸收峰和 700 nm 附近的叶绿素荧光峰特征都较为明显,同时,700 nm 附近的  $R_{rs}$  值大于或等于 650 nm 附近的  $R_{rs}$  值;相比巢湖水体,滇池水体的遥感反射率光谱曲线在 620 nm 附近的藻蓝蛋白吸收峰和 700 nm 附近的叶绿素荧光峰特征更为明显,除此之外,绝大部分样点在 700 nm 附近的  $R_{rs}$  值远大于 650 nm 附近的  $R_{rs}$  值,表现出浮游藻类主导型的遥感反射率光谱特征,这与其他学者的研究结果相一致<sup>[18]</sup>.

2.2 后向散射系数模拟中最佳参考波长的影响因子分析

2.2.1 以整个湖泊水体为研究对象的最佳参考波长影响因子分析

表 1 列出了太湖、巢湖、滇池水体在各参考波长处所对应的平均相对误差,表 2 列出了各湖泊的水质参数浓度平均值.由表 1 和表 2 可见:①太湖水体的最佳参考波长最小,为 695 nm,同时它的叶绿素浓度、总颗粒物浓度和有机颗粒物浓度是 3 个湖泊中最低的;②滇池水体的最佳参考波长最大,为 730 nm,而它的叶绿素浓度、总颗粒物浓度和有机颗粒物浓度也是 3 个湖泊中最高的;③除无机颗粒物浓度外,巢湖水体的各项水质参数浓度都处于中等水平,相对应地,它的最佳参考波长也位于太湖和滇池之间.由此来看,当以整个湖泊作为研究对象时,最佳参考波长随着水质参数浓度(总颗粒物浓度  $c_{SPM}$ 、有机颗粒物浓度  $c_{SPOM}$  和叶绿素浓度  $c_{CHL}$ ) 的增大而向长波方向移动.

2.2.2 以单个湖泊内各样点为研究对象的最佳参考波长影响因子分析

为了揭示出各湖泊最佳参考波长的影响因子是否存在差异,进一步将研究对象细化为样点,并对每个湖泊同一最佳参考波长所对应样点的水质参数浓度进行分析.结果显示,将研究对象细化为样点后,太湖、巢湖和滇池水体的模拟误差均有所减小,分别

从 9.496%、6.645%、8.140% 减少至 8.311%、5.076%、7.787%.表 3~5 列出了太湖、巢湖和滇池样点的最佳参考波长及其对应的水质参数浓度平均值.

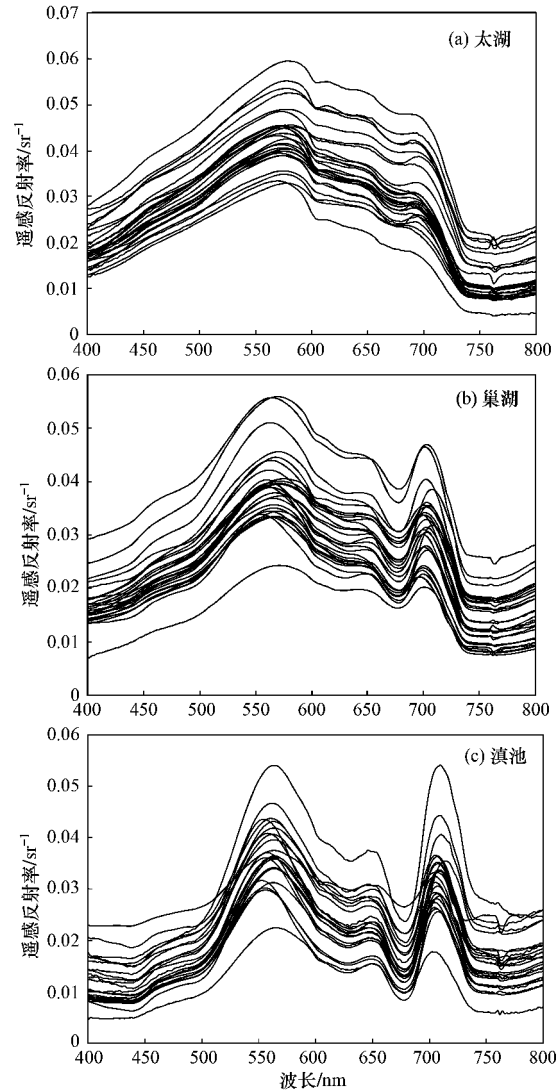


图 4 太湖、巢湖、滇池水体样点的实测遥感反射率光谱曲线  
Fig. 4 Remote sensing reflectance of Lake Taihu, Lake Chaohu and Lake Dianchi

表 1 在各参考波长情况下太湖、巢湖、滇池水体总吸收系数的平均相对误差

Table 1 Average relative errors of total absorption coefficients in Lake Taihu, Lake Chaohu and Lake Dianchi at different reference wavelengths

太湖		巢湖		滇池	
参考波长 /nm	平均相对误差 /%	参考波长 /nm	平均相对误差 /%	参考波长 /nm	平均相对误差 /%
690	9.505	710	7.685	710	11.766
695	9.496	715	7.258	715	10.218
700	9.633	720	6.645	720	9.575
705	9.633	725	7.533	725	8.271
710	9.758			730	8.140
715	10.512			735	9.299
720	11.661				

表 2 太湖、巢湖、滇池水体的水质参数浓度平均值

Table 2 Concentration of water quality parameters in Lake Taihu, Lake Chaohu and Lake Dianchi

参数	太湖	巢湖	滇池
最佳参考波长/nm	695	720	730
叶绿素浓度/ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	$5.578 \pm 5.023$	$62.433 \pm 43.167$	$97.300 \pm 35.278$
总颗粒物浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$29.744 \pm 18.639$	$43.613 \pm 17.079$	$44.972 \pm 9.875$
无机颗粒物浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$25.356 \pm 17.269$	$30.100 \pm 14.257$	$8.852 \pm 4.229$
有机颗粒物浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$4.389 \pm 1.472$	$13.513 \pm 5.227$	$36.120 \pm 8.458$

表 3 太湖水体不同样点的最佳参考波长及其对应的水质参数浓度平均值

Table 3 Optimum reference wavelength of Lake Taihu and associated concentration of water quality parameters

最佳参考波长/nm	样点数/个	叶绿素浓度/ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	总颗粒物浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	无机颗粒物浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	有机颗粒物浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
690	12	6.612	16.110	12.752	3.358
695	6	3.866	28.308	23.945	4.363
700	4	4.626	34.663	29.885	4.778
705	6	5.746	43.768	38.638	5.130
710	3	11.166	76.800	69.500	7.300
715	0	—	—	—	—
720	0	—	—	—	—

表 4 巢湖水体不同样点的最佳参考波长及其对应的水质参数浓度平均值

Table 4 Optimum reference wavelength of Lake Chaohu and associated concentration of water quality parameters

最佳参考波长/nm	样点数/个	叶绿素浓度/ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	总颗粒物浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	无机颗粒物浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	有机颗粒物浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
710	10	46.673	38.827	27.522	11.305
715	5	43.040	35.197	24.120	11.077
720	5	80.230	62.253	41.027	21.227
725	7	83.909	53.212	38.971	14.240

表 5 滇池水体不同样点的最佳参考波长及其对应的水质参数浓度平均值

Table 5 Optimum reference wavelength of Lake Dianchi and associated concentration of water quality parameters

最佳参考波长/nm	样点数/个	叶绿素浓度/ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	总颗粒物浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	无机颗粒物浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	有机颗粒物浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
710	2	87.574	39.350	7.450	31.900
715	2	78.706	30.267	6.200	24.067
720	4	101.386	40.800	6.650	34.150
725	4	100.037	52.075	10.275	41.800
730	5	94.129	43.240	7.940	35.300
735	7	80.786	40.825	9.250	31.575

由表 3 可知,太湖水体各样点的最佳参考波长随着总颗粒物浓度、无机颗粒物浓度、有机颗粒物浓度的增大而向长波方向移动.由于太湖水体的无机颗粒物浓度、有机颗粒物浓度与总颗粒物浓度的相关系数均达到 0.930 以上,因此,在太湖水体中,总颗粒物浓度是影响最佳参考波长的主要因子.

由表 4 可知,巢湖水体各样点的最佳参考波长与各水质参数浓度之间未呈现出严格的递增或递减关系.但从波段范围这一角度分析后即可发现,最佳参考波长为 710 nm 和 715 nm 的样点的叶绿素 a 浓度、总颗粒物浓度、无机颗粒物浓度和有机颗粒物浓

度都小于最佳参考波长为 720 nm 和 725 nm 的样点.与太湖水体相同,巢湖水体的无机颗粒物浓度与总颗粒物浓度之间也具有良好的相关性,相关系数达到 0.920 以上,因此,在巢湖水体中,叶绿素 a 浓度、总颗粒物浓度和有机颗粒物浓度同时影响着最佳参考波长的确定.

由表 5 可知,滇池水体的最佳参考波长与水质参数浓度之间的规律性最差,初步分析原因可能与滇池的叶绿素浓度过高有关.为了证实这一推测,本研究将滇池水体的所有样点分为两大类,Class 1 对应的是叶绿素浓度大于全湖叶绿素浓度平均值的样

点, Class 2 对应的是叶绿素浓度小于或等于全湖叶绿素浓度平均值的样点, 再分别对这两类样点的最佳参考波长与水质参数浓度之间的关系进行分析, 见表 6 和表 7. 对于叶绿素浓度大于平均值的样点来说(表 6), 最佳参考波长的位置与水质参数浓度之间并无规律可循, 而对于叶绿素浓度小于等于平均值的样点来说(表 7), 两者之间虽无严格的单调递增关系, 但从波段范围这一角度分析后可发现最

佳参考波长的位置随着总颗粒物浓度、无机颗粒物浓度和有机颗粒物浓度的增加而增大. 由于有机颗粒物浓度与总颗粒物浓度之间的相关性达到 0.960 以上, 因此, 影响滇池 Class 2 水体的最佳参考波长的因子主要包括总颗粒物浓度和无机颗粒物浓度. 同时, 这一现象说明了过高的叶绿素浓度将在一定程度上削弱最佳参考波长与水质参数浓度间的规律性.

表 6 滇池 Class 1 样点的最佳参考波长及其对应的水质参数浓度平均值

Table 6 Optimum reference wavelength of Lake Dianchi for Class 1 and associated concentration of water quality parameters

最佳参考波长 /nm	样点数 / 个	叶绿素浓度 / $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	总颗粒物浓度 / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	无机颗粒物浓度 / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	有机颗粒物浓度 / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
710	1	128.820	36.600	8.800	27.800
715	1	156.201	53.200	11.000	42.200
720	3	110.388	41.600	6.933	34.667
725	2	131.841	54.150	8.500	45.650
730	3	112.978	39.333	7.475	32.867
735	3	137.530	42.167	11.367	30.800

表 7 滇池 Class 2 样点的最佳参考波长及其对应的水质参数浓度平均值

Table 7 Optimum reference wavelength of Lake Dianchi for Class 2 and associated concentration of water quality parameters

最佳参考波长 /nm	样点数 / 个	叶绿素浓度 / $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	总颗粒物浓度 / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	无机颗粒物浓度 / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	有机颗粒物浓度 / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
710	1	46.328	42.100	6.100	36.000
715	1	79.917	37.600	7.600	30.000
720	1	74.381	38.400	5.800	32.600
725	2	68.232	50.000	12.050	37.950
730	2	65.857	49.100	9.800	38.950
735	4	58.425	50.025	9.975	40.050

综上所述, 当以单个湖泊内的各样点为研究对象时, 由于内陆湖泊光学特性的复杂性, 不同湖泊内各样点的最佳参考波长的影响因子存在一定的差异, 但是, 总颗粒物浓度是一个共同的影响因子. 同时, 在对滇池水体进行分类后发现, 过高的叶绿素浓度将弱化最佳参考波长与水质参数浓度间的规律性, 这也进一步解释了为什么在叶绿素浓度偏低的太湖, 各样点的最佳参考波长与水质参数浓度之间的递增关系最为严格.

### 2.3 太湖、巢湖、滇池模拟的后向散射系数的参数化模型

图 5 给出了利用模拟的后向散射系数计算得到的水体总吸收系数与实测总吸收系数的散点图, 可以看出, 在蓝、绿和红光波段范围的代表波长 440、532 和 675 nm 处, 计算所得的总吸收系数与实测值之间具有较好的一致性, 表明模拟的后向散射系数能够使各湖区的生物光学模型较好地闭合, 从侧面

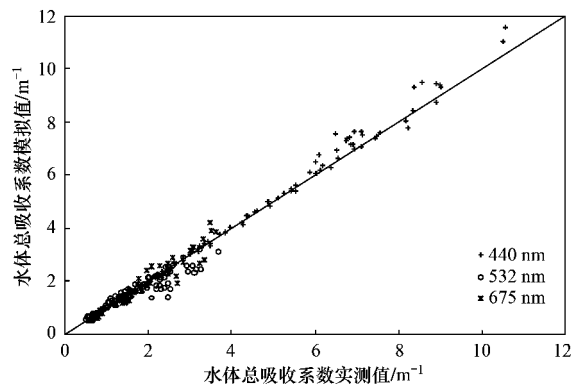


图 5 计算所得的总吸收系数与实测总吸收系数的对比

Fig. 5 Comparison of calculated and measured total absorption coefficients of Lake Taihu, Lake Chaohu and Lake Dianchi

证明了模拟结果的准确性.

图 6 是太湖、巢湖和滇池各样点的模拟后向散射系数曲线, 由图 6 可见, 太湖、巢湖和滇池水体的

后向散射系数曲线具有相同的光谱特征,随着波段的增加而呈指数衰减,3个湖泊间的差异主要表现在数值大小和斜率两方面.以440、532和675 nm为例,定量描述3个湖泊水体后向散射系数的数值差异.太湖、巢湖和滇池水体的蓝光 $b_{bp}(440)$ 平均值分别为 $(1.412 \pm 0.696) \text{ m}^{-1}$ 、 $(2.337 \pm 0.818) \text{ m}^{-1}$ 、 $(1.776 \pm 0.636) \text{ m}^{-1}$ ;绿光 $b_{bp}(532)$ 平均值分别为 $(0.840 \pm 0.384) \text{ m}^{-1}$ 、 $(1.385 \pm 0.465) \text{ m}^{-1}$ 、 $(1.282 \pm 0.413) \text{ m}^{-1}$ ;红光 $b_{bp}(675)$ 平均值分别为 $(0.438 \pm 0.181) \text{ m}^{-1}$ 、 $(0.718 \pm 0.231) \text{ m}^{-1}$ 、 $(0.863 \pm 0.279) \text{ m}^{-1}$ .同时,从图6可看出,3个湖泊中,滇池水体的后向散射系数曲线的斜率值最小,且各样点间的差异较大.

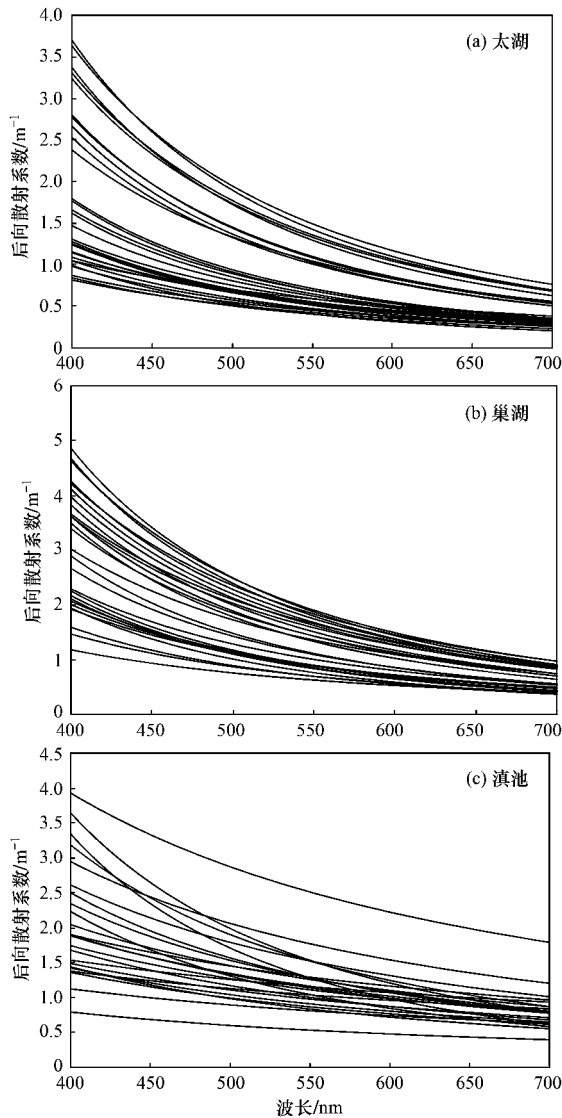


图6 太湖、巢湖、滇池水体各样点的模拟后向散射系数光谱曲线

Fig. 6 Curves of simulated backscattering coefficients of Lake Taihu, Lake Chaohu and Lake Dianchi

为了量化表达后向散射系数,本研究采用目前通用的指数模型对3个湖泊水体的后向散射系数曲线进行模拟<sup>[19-22]</sup>,如式(1).

$$b_{bp}(\lambda) = b_{bp}(\lambda_0) \cdot \left[ \frac{\lambda_0}{\lambda} \right]^n \quad (1)$$

式中 $\lambda_0$ 为参考波长,取532 nm, $n$ 为散射系数随波长变化的指数,与颗粒物浓度和组分有关,它通常能间接反映出水体的粒径分布<sup>[23]</sup>.为了确定 $n$ 值,对式(1)两边取对数,得式(2).

$$\ln \frac{b_{bp}(\lambda)}{b_{bp}(532)} = n \cdot \ln \frac{532}{\lambda} \quad (2)$$

与前人研究结果相比,3个湖泊的 $n$ 值均落在已有的数值范围内,具体可参见表8.可以看出,不同湖泊甚至同一湖泊水体的 $n$ 值之间都存在较大区别,这主要是由于不同湖泊或者处在不同采样时间的同一湖泊,其水体中所含水质参数浓度以及组分存在差异而导致的<sup>[27]</sup>.

目前,水体后向散射系数的观测依然是水体固有光学特性观测的一大难点,因此,本研究试图建立各湖泊水体后向散射系数 $b_{bp}(532)$ 和总颗粒物浓度的关系,以期达到直接利用总颗粒物浓度反演水体后向散射系数的目的.图7是3个湖泊的后向散射系数与总颗粒物浓度的关系.从中可知,只有在太湖,两者之间存在较好的相关关系,相关系数达到0.852,后向散射系数可直接由总颗粒物浓度得到,见式(3),而在巢湖和滇池,后向散射系数与总颗粒物浓度之间的相关性较小或无相关性.这主要是由3个湖泊中水体总颗粒物的组分差异造成的,很多学者<sup>[21,28-30]</sup>对散射特性研究后发现,无机颗粒物(而非总颗粒物)主导水体中散射系数的变化,张运林等<sup>[31]</sup>也指出悬浮物中的无机颗粒对光的衰减主要为散射,而有机颗粒主要表现为吸收.由于散射系数与后向散射系数之间存在着一定的比例关系即后向散射概率,因而可以进一步认为无机颗粒物也主导着水体中的后向散射特性.从表2中可知,在太湖、巢湖和滇池水体中,无机颗粒物浓度占总颗粒物浓度的比例分别约为85.247%、69.061%和19.683%,因此,在比例最高的太湖,后向散射系数与总颗粒物浓度的相关性最高,而在比例最低的滇池,两者基本无相关.

太湖:

$$b_{bp}(\lambda) = (0.018c_{TSM} + 0.272) \cdot \left[ \frac{532}{\lambda} \right]^{2.643 \pm 0.317} \quad (3)$$

表 8 不同水体后向散射系数  $n$  值的比较  
Table 8 Comparison of  $n$  values from this study with literature

站点	参考波长 / nm	$n$ 值	文献
太湖(10月)	440	1.380	[24]
太湖(11月)	550	2.090	[3]
太湖(10~11月)	532	3.064	[21]
黄海、东海海区(4月、9月)	532	1.146	[22]
双台子河和绕阳河(5月)	532	0.870	[25]
奥斯陆峡湾(10月)	665	1.590	[26]
太湖(5月)	532	$2.643 \pm 0.317$	本研究
巢湖(6月)	532	$2.719 \pm 0.242$	本研究
滇池(9月)	532	$1.638 \pm 0.534$	本研究

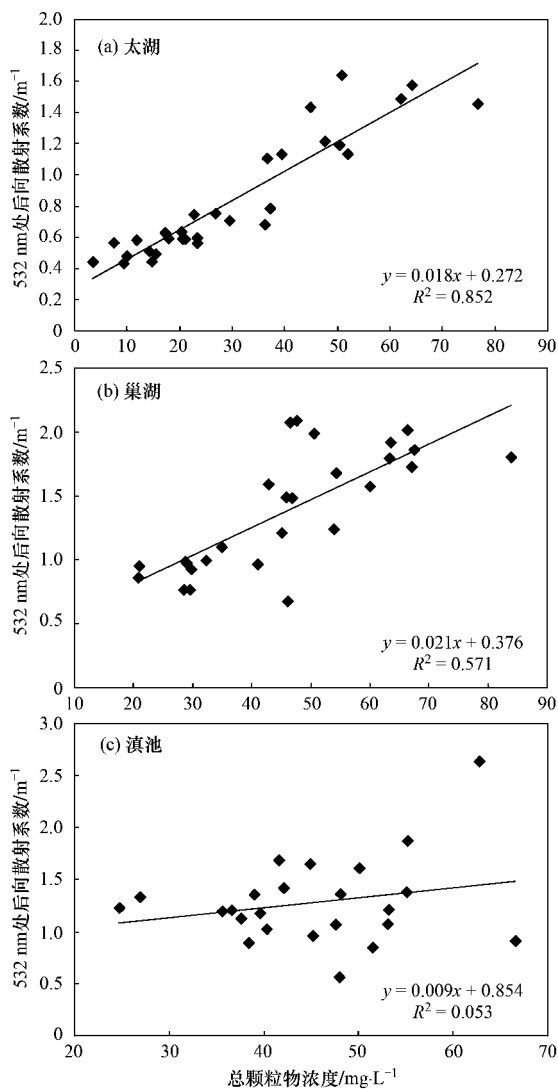


图 7 太湖、巢湖、滇池水体的后向散射系数与总颗粒物浓度的关系

Fig. 7 Relationship between backscattering coefficients and total suspended particle matter concentration in Lake Taihu, Lake Chaohu and Lake Dianchi

### 3 结论

(1) 对于光学特性复杂的内陆湖泊水体而言, 在利用半分析算法模拟不同水体的后向散射系数时, 其参考波长的选择应有所差异.

(2) 当以整个湖泊为研究对象时, 参考波长应随着湖泊水体中总颗粒物浓度、有机颗粒物浓度和叶绿素浓度平均值的增大而向长波方向移动.

(3) 当以单个湖泊中各样点为研究对象时, 由于内陆水体光学特性的复杂性, 各样点的参考波长的影响因子存在一定差异, 但总颗粒物浓度是一个共同的因素. 此外, 过高的叶绿素浓度将削弱最佳参考波长与水质参数浓度间的规律性.

(4) 太湖、巢湖和滇池水体后向散射系数曲线的  $n$  值分别为  $2.643 \pm 0.317$ 、 $2.719 \pm 0.242$ 、 $1.638 \pm 0.534$ , 均落在前人研究的结果范围内. 在以无机颗粒物为主的水体中, 如太湖, 后向散射系数与总颗粒物浓度之间存在更好的相关性.

(5) 本研究还尝试分析了最佳参考波长与各水质参数浓度比例之间的变化关系, 但未能发现具有参考价值的规律性. 同时, 需指出的是由于内陆水体光学特性的复杂性, 本研究结果还需要大量的实测实验数据进行进一步地验证和总结.

致谢: 感谢参加太湖、巢湖和滇池实验的所有工作人员在数据获取过程中所作的贡献, 感谢乐成峰博士和孙德勇博士在论文写作及修改中给予的帮助以及指导.

参考文献:

- [1] Mobley C D. Light and water: radioactive transfer in natural waters [M]. San Diego: Academic Press, 1994. 60-61.
- [2] Lee Z P, Carder K L, Amone 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.
- [3] 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):707-713.
- [4] Wang J, Cota G F. Remote-sensing reflectance in the Beaufort and Chukchi seas: observations and models [J]. Applied Optics, 2003, 42(15):2754-2765.
- [5] Matsuoka A, Huot Y, Shimada K, et al. Bio-optical characteristics of the western Arctic Ocean: implications for ocean color algorithms [J]. Canada Journal of Remote Sensing, 2007, 33(6):503-518.
- [6] Lubac B, Loisel H. Variability and classification of remote sensing reflectance spectra in the eastern English Channel and southern North Sea [J]. Remote Sensing of Environment, 2007, 110(1):45-58.
- [7] 胡连波,刘智深.利用准分析算法由遥感反射比反演黄海水体吸收系数[J].中国海洋大学学报 2007 37(Sup. II):154-160.
- [8] 詹海刚,施平,陈楚群.基于贝叶斯反演理论的海水固有光学特性准分析算法[J].科学通报 2006 51(2):204-210.
- [9] 汪文琦,董强,商少凌,等.基于两种半分析算法的水体吸收系数反演[J].热带海洋学报 2009 28(5):35-42.
- [10] Lee Z P, Carder K L. Absorption spectrum of phytoplankton pigments derived from hyperspectral remote-sensing reflectance [J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 89(3):361-368.
- [11] Craig S E, Lohrenz S E, Lee Z P, et al. Use of hyperspectral remote sensing reflectance for detection and assessment of the harmful alga, *Karenia brevis* [J]. Applied Optics 2006 45(21):5414-5425.
- [12] Le C F, Li Y M, Zha Y, et al. Validation of a quasi-analytical algorithm for highly turbid eutrophic water of meiliang bay in Taihu Lake, china [J]. Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(8):2492-2500.
- [13] Cleveland J S, Weidemann A D. Quantifying absorption by aquatic particles: A multiple scattering correction for glass-fiber filters [J]. Limnology and Oceanography, 1993, 38(6):1321-1327.
- [14] Bricaud A, Morel A, Prieur L. Absorption by dissolved organic matter of the sea (yellow substance) in the UV and visible domain [J]. Limnology and Oceanography, 1981, 26(1):43-53.
- [15] 陈宇炜,陈开宁,胡耀辉.浮游藻类叶绿素 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.
- [16] Lorenzen C J. Determination of chlorophyll and phaeo-pigments: spectrophotometric equations [J]. Limnology and Oceanography, 1967, 12(2):343-346.
- [17] 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.
- [18] 施坤,李云梅,朱利,等.滇池水体总悬浮物散射系数参数化模型[J].环境科学学报 2010 30(7):1479-1485.
- [19] Morel A. Diffusion de la lumière par les eaux de mer, resultants expérimentaux et approche théorique [J]. Agard Lectures Series, 1973 61:3.1.1-3.1.76.
- [20] Zawada D G, Hu C M, Clayton T, et al. Remote sensing of particle backscattering in Chesapeake Bay: A 6-year SeaWiFS retrospective view [J]. Estuarine Coastal and Shelf Science, 2007, 73(3):792-806.
- [21] 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.
- [22] 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):56-62.
- [23] Kostadinov T S, Siegel D A, Maritorena S. Retrieval of the particle size distribution from satellite ocean color observations [J]. Journal of Geophysical Research, 2009, 114(C9):C09015.
- [24] 李俊生,张兵,张霞,等.一种计算水体中颗粒物后向散射系数的方法[J].遥感学报 2008 12(2):193-198.
- [25] 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.
- [26] Aas E, Hokedal J, Sorensen K. Spectral backscattering coefficient in coastal waters [J]. International Journal of Remote Sensing, 2005, 26(2):331-343.
- [27] 乐成峰.基于实测反射率光谱数据的太湖蓝藻的遥感识别定量估算研究 [D].南京:南京师范大学,2010.
- [28] Vant W N. Causes of light attenuation in nine New Zealand estuaries [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1990, 31(2):125-137.
- [29] Bowers D G, Mitchelson-Jacob E G. Inherent optical properties of the Irish Sea determined from underwater irradiance measurements [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1996, 43(4):433-447.
- [30] 马荣华,唐军武.湖泊水色遥感参数获取与算法分析[J].水科学进展 2006 17(5):720-726.
- [31] 张运林,秦伯强,陈伟民,等.太湖水体光学衰减系数的特征及参数化[J].海洋与湖沼 2004 35(3):209-213.