

太湖水体散射光谱特性及其形成机理研究

黄昌春^{1,2} 李云梅¹ 孙德勇¹ 乐成峰¹ 金鑫¹

¹ 南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 江苏 南京 210046

² Geosystems Research Institute, Mississippi State University, Stennis Space Center, Mississippi 39529, USA

摘要 基于 2006 年 10 月, 2007 年 3 月和 2007 年 11 月三次太湖野外实测颗粒物散射(b_p)和后向散射(b_{bp})光谱数据, 分别计算其光谱幂指数斜率、总悬浮物(TSPM)、有机物(OSPM)和无机物(ISPM)的比散射和比后向散射系数, 进而探讨太湖水体 b_p 和 b_{bp} 光谱特征及其形成机理。结果表明, TSPM, ISPM 和 OSPM 比散射系数平均值分别为: 0.634(550 nm), 1.057(532 nm) 和 0.396(532 nm) gm^{-2} , ISPM 和 OSPM 比后向散射系数平均值分别为 0.0051(532 nm) 和 0.0022(532 nm) gm^{-2} ; 2006 年 10 月, 2007 年 3 月和 2007 年 11 月, 后向散射率(B)平均值分别为: 0.01078, 0.01375 和 0.01251; b_{bp} 和 b_p 及其 B 具有较强的光谱依赖性, 但 OSPM 和有色溶解有机物(CDOM)在短波长以及叶绿素在 675 nm 的强吸收作用一定程度上减弱了该特征; b_{bp} 光谱斜率幂指数与 ISPM/OSPM, 532 nm 处的 b_{bp} (532 nm) 具有较强的相关性, 而与粒径分布斜率相关性较小。

关键词 海洋光学; 散射光谱; 比散射系数; 光谱斜率; 太湖

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201131.0501003

Research of Scattering Spectrum Characteristic and Formative Mechanism of Taihu Lake Waters

Huang Changchun^{1,2} Li Yunmei¹ Sun Deyong¹ Le Chengfeng¹ Jin Xin¹

¹ Key Laboratory of Virtual Geographic Environment, Ministry of Education, Nanjing Normal University, Nanjing, Jiangsu 210046, China

² Geosystems Research Institute, Mississippi State University, Stennis Space Center, Mississippi 39529, USA

Abstract Scattering coefficient b_p , backscattering coefficient b_{bp} and concentration of particles are obtained from Taihu lake waters during three campaigns in Oct. 2006, Mar. 2007 and Nov. 2007. Specific scattering and backscattering coefficient of total suspended particle (TSPM), inorganic suspended partide (ISPM) and organic suspend particle matter (OSPM), and spectral power exponents slope are calculated from sampling data. Then the spectral characteristic and formative mechanism of b_p and b_{bp} are explored further. The result indicates that the average value of specific scattering coefficients of TSPM, ISPM and OSPM are 0.634 (550 nm), 1.057 (532 nm) and 0.396 (532 nm) gm^{-2} , respectively. The average value of specific backscattering coefficients of ISPM and OSPM is 0.0051(532 nm) and 0.0022 (532 nm) gm^{-2} . The average backscattering ratio(B) in Oct. 2006, Mar. 2007 and Nov. 2007 is 0.01078, 0.01375 and 0.01251, respectively. b_{bp} , b_p and B have strong wavelength dependence. However, strong absorption effects of OSPM and CDOM at short wavelength and chlorophyll at 675 nm make the wavelength dependence weak. Spectral exponent has strong relation with ISPM/OSPM, b_{bp} (532 nm), but week relation with the particle size distribution slope.

Key words oceanic optics; scattering spectrum; specific scattering coefficient; spectral slope; Taihu lake

OCIS codes 010.4450; 290.0290; 300.0300

收稿日期: 2010-11-01; **收到修改稿日期:** 2011-02-14

基金项目: 国家自然科学基金(40971215)、国家水环境遥感技术体系研究与示范(2009ZX07527-006)、江苏省 2008 年度普通高校研究生科研创新计划(CX09B-301Z)和南师大优秀博士论文培养计划(1243211601036)资助课题。

作者简介: 黄昌春(1982—), 男, 博士研究生, 主要从事环境污染遥感监测方面的研究。

E-mail: huangchangchun_aaa@163.com

导师简介: 李云梅(1964—), 女, 教授, 主要从事环境污染遥感监测与 GIS 等方面的研究。E-mail: liyunmei@njnu.edu.cn

1 引 言

固有光学属性是水生态光学和水色遥感的基础,其中颗粒物的散射系数(b_p)以及后向散射系数(b_{bp})是反应颗粒物结构组成、影响反射率和水下光场变化的主要因素^[1~5]。影响 b_p 和 b_{bp} 因素较多,其中折射指数(n)、粒径大小及其组成为主要影响因素^[6~9]。粒径较小,折射指数较高的颗粒物一般是 b_{bp} 主要贡献者^[10],这些颗粒物主要是非活性无机小颗粒^[11,12]或具有硬质细胞壁的小颗粒浮游植物(如硅藻)^[9]。粒径与 n 对 b_{bp} 具有双重影响,当粒径较小时(粒径小于 $0.25\ \mu\text{m}$), b_{bp} 对 n 较不敏感,粒径为 b_{bp} 主要影响因素^[10],但当粒径较大时(粒径分布函数指数小于3.5) b_{bp} 对 n 极为敏感, n 为 b_{bp} 主要影响因素^[13];关于活体浮游植物对 b_{bp} 的贡献目前还存在较大的争议,由于其低折射特性,通常认为其对后向散射率贡献较小^[13~17],但也有实验表明^[18]浮游植物对后向散射的贡献要比通常假设的高得多。当发生“水华”时, b_{bp} 对浮游植物的变化较为敏感。由于 b_p 和 b_{bp} 影响因素的复杂性,使得 b_p 和 b_{bp} 光谱特征具有较大差异性,大部分水体的 b_p 和 b_{bp} 具有随波长增加成幂函数形式衰减的光谱特征^[19~22],也有研究表明 b_p 和 b_{bp} 不具有波长依赖性^[23]。太湖属于高度富营养化大型浅水湖泊,物质组成极为复杂,其水体光学特性的影响因素较为多元化,同时由于测量仪器的限制使得对太湖水体光学属性研究相对较少报道,尤其 b_p 和 b_{bp} 相对更少。因此,对 b_p 和 b_{bp} 的研究将部分填补该领域的空白同时有助于理解太湖水体颗粒物散射光谱的特征行为。

本文研究基于水体固有光学属性测量系统AC-S和BB9实测的太湖水体 b_p 和 b_{bp} 以及室内分析的水体组分浓度数据,对太湖水体颗粒物散射光谱及其特征行为进行分析,进而探讨太湖水体 b_p 和 b_{bp} 光谱特征的影响因素及其形成机理。

2 材料与方 法

2.1 研究区域

2006年10月,2007年3月和2007年11月3次对太湖不同湖区共133样点进行了观测和采样,样点图如图1所示。

2.2 仪器与数据测量

2.2.1 光学特性数据

散射系数和后向散射系数的测量仪器为Wetlabs公司的光谱吸收、衰减仪(AC-S)和后向散

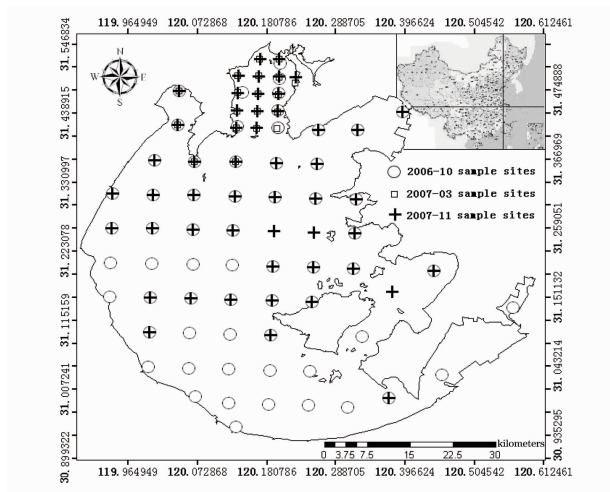


图1 样点图

Fig. 1 Sample sites

射计BB9,AC-S在可见光波长范围共有85个光谱通道,光谱分辨率为4 nm,测量精度为 $0.01\ \text{m}^{-1}$ 。通过AC-S可直接获得吸收和衰减系数,对直接测得的吸收系数作温度、盐度和散射校正后,利用衰减系数减去吸收系数得到散射系数^[24];BB9测得的 117° 体散射函数,利用经验关系计算得到后向散射系数,具体处理过程参考文献^[25]。

2.2.2 水质数据

采用称重法^[26]测量总悬浮物(TSPM)、有机物(OSPM)和无机物(ISPM)质量浓度,首先进行烧膜处理,去除膜上有机质,然后将烧过的膜进行称重,得到膜的重量 G_1 ;将过滤后的膜进行烘干并称重,得到干燥膜和总悬浮物的重量 G_2 ,两次膜重的差即为总悬浮物重量;将称重后干燥的膜进行 $450\ ^\circ\text{C}$ 的4~6 h的烧膜处理后称重,与 G_2 相减可计算出无机悬浮物重量,并可进一步推算出有机悬浮物重量。用称重法测得的重量与过滤的水样体积相比计算出各参数的质量浓度,数据如表1所示。

利用“热乙醇法”测量叶绿素质量浓度 c_{ph} ^[27]。

3 结果与分析

3.1 散射系数与后向散射系数

3.1.1 散射系数

太湖水体颗粒物绝对散射系数(b)较大,是衰减系数的主要贡献者^[15],在绿波段(550 nm)2006年10月,2007年3月,2007年11月的最大值分别为45.54,54.80和49.20 m^{-1} ,最小值分别为8.58,1.50和7.11 m^{-1} ,9个波段(选用与后向散射数据对应的波段)的样点平均值如图2所示,可以看出太湖

表1 水体组分质量浓度
Table 1 Concentration of water components

Date	Type	Max /(mg/L)	Min /(mg/L)	Mean /(mg/L)	S, D	C, V
Mar. 2007	ISPM	94.867	7.333	26.575	23.979	0.902
	OSPM	13.467	5.333	7.533	2.232	0.296
	Chl-a	0.0123	0.0011	0.00471	0.0029	0.616
Oct. 2006	ISPM	53.333	4.600	26.661	13.736	0.622
	OSPM	60.533	5.467	23.151	25.508	1.026
	Chl-a	0.5030	0.000781	0.09823	0.186	2.286
Nov. 2007	ISPM	70.6	2.600	19.520	32.760	1.127
	OSPM	29.533	2.160	9.094	5.700	0.579
	Chl-a	0.0892	0.00096	0.01449	0.0170	1.047

PS: S, D: standard deviation, C, V: coefficient of variation

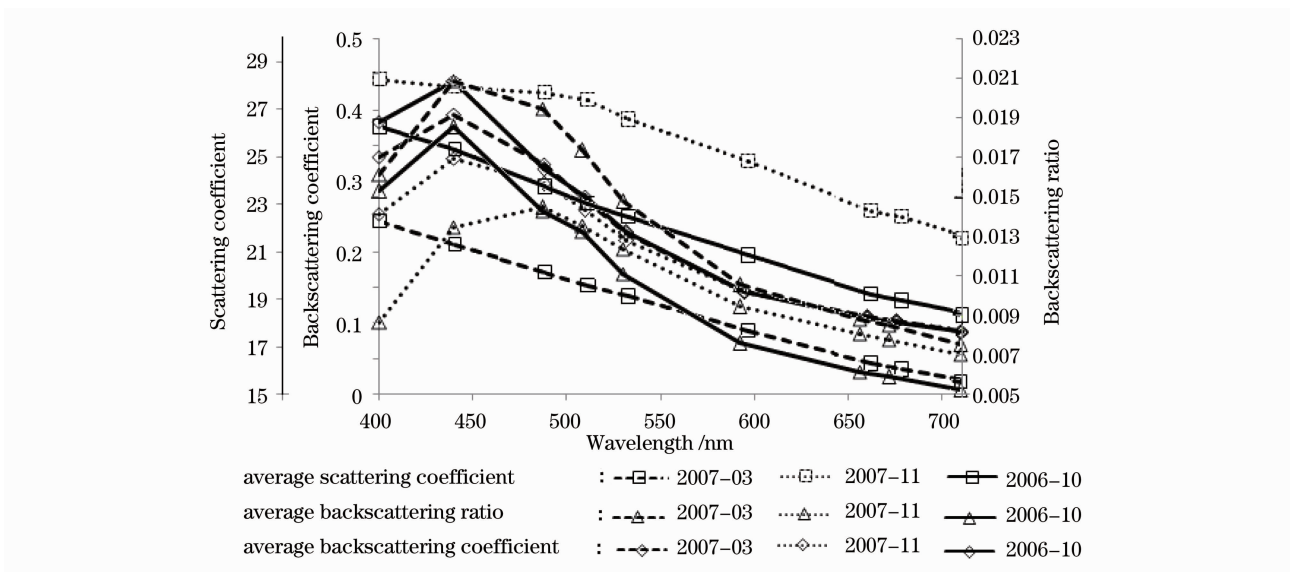


图2 2006年10月,2007年3月,2007年11月平均散射系数、后向散射系数和后向散射率
Fig. 2 Average scattering coefficient, backscattering coefficient and backscattering ratio in Oct. 2006, Mar. 2007 and Nov. 2007

水体散射系数至少高出海洋水体一个数量级以上;太湖水体散射系数随波长近似倾斜的直线或幂函数形式衰减,这与前人的研究成果是一致的^[28,29],利用公式

$$b_p(\lambda) = b_p(550) \times (\lambda/550)^\eta,$$

通过回归方法计算散射系数的幂指数(η),2006年10月,2007年3月,2007年11月的 η 平均值分别为-0.6712,-0.8129和-0.7600,与黄质主导二类水体的-0.6^[30]和-0.48^[22]的相比曲线明显较为陡峭,但与Barnard等^[31]的-0.93相比则相对平坦。这主要是因为:1)太湖水体黄质与非色素物质吸收系数较高[350 nm处有色溶解有机物(CDOM)和非色素物质平均吸收系数分别为4.218和8.380],使得相应的短波段散射强度减弱;2)同时水体中高质量浓度的悬浮泥沙使得长波段的散射强度得到增强;

3)水体颗粒物粒径(范围:3.5~30 μm)和折射指数共同作用使得水体散射强度的影响因素极为复杂。基于Boss等^[32]的粒径分布指数计算公式为

$$\epsilon = 3 - \xi - \exp(6\xi),$$

其中 ξ 通过波长 λ 与衰减系数 c 进行指数回归($c_p = A\lambda^\xi$)得到 ϵ ,发现 η 和 ϵ 具有显著($P < 0.00001$)的线性相关性,平均 $R^2 > 0.90$ 。2006年10月的 η 主要集中在-0.5~-0.8之间,大约占80%;2007年3月的 η 主要集中在-0.3~-0.9之间,大约占90%;2007年11月的 η 主要集中在-0.6~-1.1之间,大约占80%[图3(a)]。

但是当浮游色素物质较多时,在440 nm和675 nm处出现散射谷值,使得散射系数随波长单一的直线或幂函数衰减形式得到衰弱,甚至不存在,显示出与叶绿素主导的一类水体的散射系数与波长之

间相似的特征^[30],这主要是由于藻类在 440 nm 和 675 nm 的吸收峰值对散射系数所产生的影响,太湖水体由于其短波段的强散射作用和非色素与黄质的

强吸收作用使得 440 nm 谷值较弱,几乎不存在,而 675 nm 谷值较为显著[图 3(b)]。

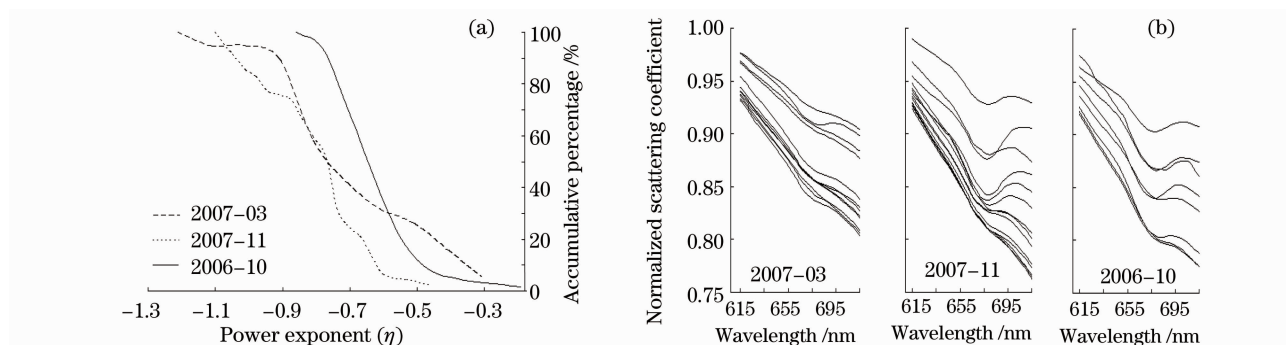


图 3 (a) 散射系数幂指数 η 分布图, (b) 归一化散射系数

Fig. 3 (a) Distribution of scattering coefficient power-exponent (η), (b) normalized scattering coefficient

3.1.2 后向散射系数

颗粒物后向散射系数(b_{bp})同样遵循随波长增加呈幂指数衰减的规律(图 2),但部分样点的 400 nm 和 440 nm 会偏离指数衰减模型,这一现象同时也出按现在部分海洋观测数据中,因此在幂函数回归中统一去除 400 nm 和 440 nm 后向散射数据。2006 年 10 月后向散射幂指数(γ)主要集中在 $-3.2 \sim -3.8$ 之间,大约占 75%,平均值为 -3.487 ,2007 年 3 月的 γ 主要集中在 $-3.2 \sim -3.6$ 之间,大约占 85%,平均值为 -3.435 ;2007 年 11 月的 γ 主要集中在 $-2.8 \sim -3.5$ 之间,大约占 80%,平均值为 -3.019 [图 4(a)],平均

值要明显高于海洋水体中的 -1.146 ^[20] 和 -0.942 ± 0.210 ^[22]。以 ISPM/OSPM 作为水体有机与无机组成的指示因子,分别分析 ϵ , ISPM/OSPM 对 γ 的影响,发现颗粒物组成对 γ 具有较大的影响[图 4(b)],在无机物占据主导时(2007 年 3 月,2007 年 11 月), γ 与 ISPM/OSPM 组有显著的相关性($p < 0.001$), γ 随着 ISPM/OSPM 的增加呈指数形式降低;当无机物与有机物相当时(2006 年 10 月), γ 与 ISPM/OSPM 的相关显著性较低($p < 0.03$),而 γ 与 ϵ 几乎无任何相关关系[图 4(c)]。

后向散射幂指数与 532 nm (为与其他研究结果

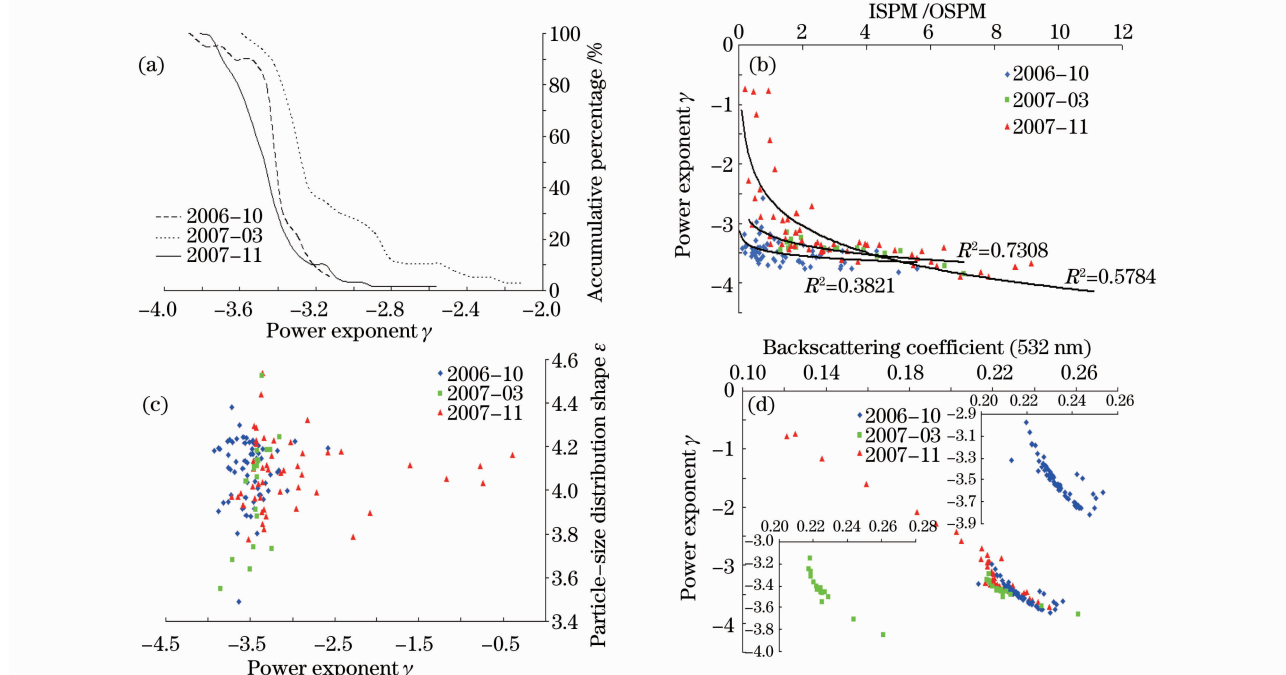


图 4 (a) 后向散射系数幂指数 γ 分布图, (b) γ 与 ISPM/OSPM 关系图, (c) γ 与 ϵ 关系图, (d) γ 与 b_{bp} (550 nm) 关系图

Fig. 4 (a) Distribution plot of power exponent γ of backscattering, (b) relation between γ and ISPM/OSPM, (c) relation between γ and ϵ , (d) relation between γ and b_{bp} (550 nm)

比较,选用 BB9 中最接近 550 nm 的波段 532 nm) 后向散射系数之间具有极显著 ($p < 0.0001$) 的线性关系,随着 b_{bp} 的增加,后向散射光谱曲线变得更加陡峭(γ 的负值增大)。相对于海洋中的 γ 与 b_{bp} (550 nm) 关系^[22],这一关系较为单调简单,且显著性高,这主要是由于太湖水体中纯水的后向散射 (b_{bw}) 相对于 b_{bp} 极小,在大部分 (98%) 情况下可忽略不计 (贡献率小于 0.827%),因此依据 b_b 的线性可加性,利用 b_b 减去 b_{bw} 计算 b_{bp} 时, b_{bw} 对 b_{bp} 的影响几乎为零,而海洋水体中 b_{bw} 占有重要的位置,其对 b_{bp} 的影响较为明显。

3.1.3 散射系数和后向散射系数的关系

图 5 分别展示了波长为 532 nm 处,400~715 nm

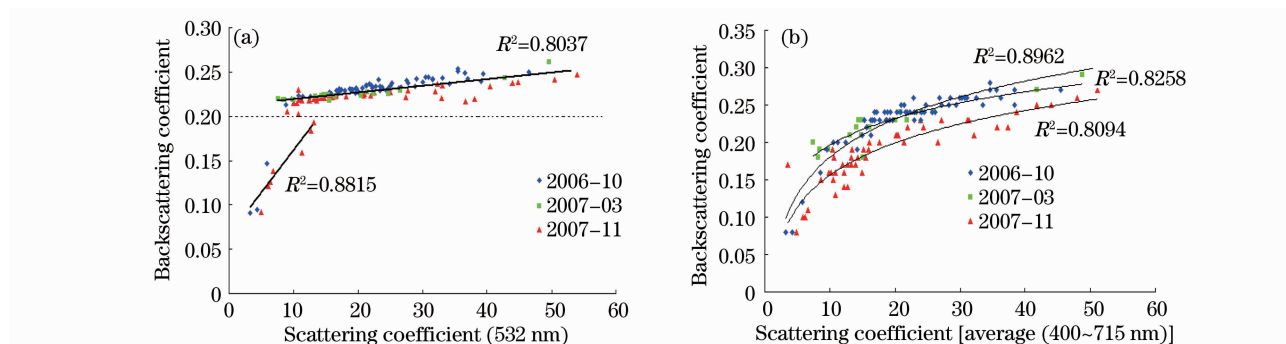


图 5 (a) 532 nm 处散射系数与后向散射系数散点图, (b) 400~715 nm 平均散射系数与后向散射系数散点图
Fig. 5 (a) Scatter plot of scattering and backscattering coefficient at 532 nm, (b) scatter plot of average value of scattering and backscattering coefficient in the range 400~715 nm

在 400~715 nm 波长范围, b_p 和 b_{bp} 呈现了显著 ($p < 0.0001$) 的对数函数关系, 2006 年 10 月, 2007 年 3 月, 2007 年 11 月决定系数分别为 0.8258, 0.8962 和 0.8094, 三个时间段内所有平均 b_p 和 b_{bp} 之间对数函数决定系数为 0.761, 因此可建立 b_p 和 b_{bp} 之间的对数函数经验模型为

$$b_{bp} = A_1 + A_0 \ln b_p, \quad (1)$$

式中 A_1 和 A_0 为回归常数。后向散射率 (B) 可以表示为

$$B = b_{bp}/b_p = (A_1 + A_0 \ln b_p)/b_p, \quad (2)$$

B 对 b_p 的敏感性为

$$\frac{\partial B}{\partial b_p} = \left(-\frac{A_1}{b_p^2} + \frac{A_0 \ln b_p + A_0}{b_p^2} \right) / (A_1 + A_0 \ln b_p), \quad (3)$$

式中 A_1, A_0 为对数回归常数, 由该敏感公式可以看出, 随着散射系数的增加, 后向散射系数对其敏感性迅速降低, 当散射系数达到 40 时, 敏感性几乎为 0。

3.1.4 后向散射率

后向散射率光谱可用于水体颗粒物组成的推

断、水下光场模型的建立以及遥感信号的解释^[23], 一般认为其不随波长的变化而变化, 如 HYDROLIGHT 默认的散射相函数模型以及吸收衰减仪器的散射校正都是认为后向散射不随波长的变化而变化。但是依据散射系数与后向散射系数都遵循随波长增加呈幂函数形式衰减, 后向散射率 ($B = b_{bp}/b_p$) 同样也应遵循幂函数形式衰减, 其衰减指数 ζ 为 $\gamma - \eta$, 大量的实测数据同样也表明存在这一规律^[22,33] (图 2) (也有数据表明无此规律^[23], Chami 部分数据)。2006 年 10 月幂指数 ζ 主要集中在 $-2.5 \sim -3.5$ 之间, 约占 95% 以上, 平均值为 -2.816 ; 2007 年 3 月的 ζ 主要集中在 $-2 \sim -3$ 之间, 约占 90%, 平均值为 -2.634 ; 2007 年 11 月的 (主要集中在 $-1.5 \sim -2.5$ 之间, 约占 90%, 平均值为 -2.2334 (图 6)。9 个波段平均后向散射率如图 2 所示, 2006 年 10 月, 2007 年 3 月, 2007 年 11 月后向散射率波段之间的变化率分别达到了 42.12%, 25.69% 和 34.69%, 这一数值要远高于 4%^[33], 波段平均值分别为 0.01078, 0.01375 和 0.01251, 这与

0.013(几何平均值), 0.012(中位数)较接近^[19],但是后者 B 是无光谱依赖性的,这是由于太湖水体高悬浮颗粒物浓度所引起的。

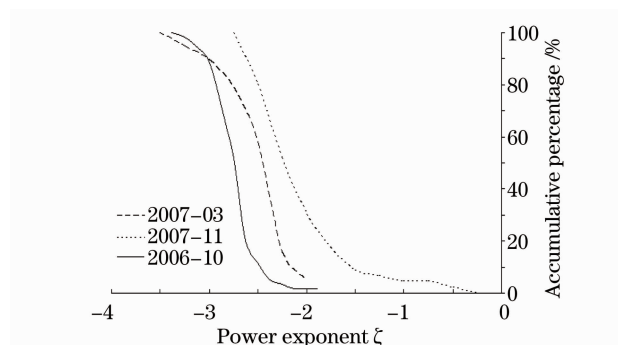


图 6 后向散射率幂指数 ζ 分布图

Fig. 6 Distribution plot of power exponent ζ of backscattering ratio

3.2 比散射系数和比后向散射系数

3.2.1 总比散射系数

总比散射系数 $b^m(\lambda)$ 通过散射系数 b_p 除以总颗

粒物浓度(TSPM)得到。由于散射系数除受物质的浓度影响之外,还受物质的折射系数和粒径分布的影响,由于有机物质和无机物质的折射系数和粒径分布存在较大的差异,从而使得比散射系数并不是恒定值,对于一类水体 $b^m(\lambda)$ 的平均值约为 1,二类水体约为 0.5^[1], Hofmann^[34] 给出了二类水体的 $b^m(\lambda)$ 在 0.1~0.8 范围之内;太湖水体 $b^m(550\text{ nm})$ 2006 年 10 月,2007 年 3 月,2007 年 11 月的范围分别为 0.221~1.551,0.436~1.138 和 0.406~1.271,平均值为 0.590,0.597 和 0.714,该平均值介于 Hofmann 二类水体 $b^m(\lambda)$ 范围之内,与 Babin^[1,35] 两次巡航以及 Stramski^[36] 数据相比(表 2),太湖水体总比散射系数与北海、英吉利海峡较相似,要明显低于大西洋,但要高于同是 case2 水体的地中海,这主要是由于太湖水体中有机物的含量要远高于地中海^[35]。

表 2 550 nm 比散射系数

Table 2 Specific scattering coefficient at 550 nm

Area	Number	Max	Min	Mean	S. D
Atlantic Ocean	23	—	—	0.985	0.402
Baltic Sea	44	—	—	0.571	0.356
English Channel	44	—	—	0.602	0.317
Mediterranean Sea (Case 2)	27	—	—	0.394	0.421
North Sea	55	—	—	0.594	0.278
Atlantic (Babin,2003)	25	—	—	0.97	1.9*
Baltic (Babin,2003)	44	—	—	0.49	1.7*
Channel (Babin,2003)	46	—	—	0.56	1.7*
Med. (case 2) (Babin,2003)	35	—	—	0.42	2.6*
North sea (Babin,2003)	55	—	—	0.54	1.6*
All cases 2 (Babin,2003)	180	—	—	0.51	1.9*
Chin soil (Stramski,2004)	4	1.17	1.02	—	—
Korean, Japan sea (Stramski,2004)	2	1.34	0.9	—	—
Taihu Lake (2007-11)	51	1.271	0.406	0.714	0.199
Taihu Lake (2007-03)	19	1.138	0.436	0.597	0.156
Taihu Lake (2006-10)	63	1.551	0.221	0.590	0.272

PS: * :geometric standard deviation

3.2.2 有机物和无机物比散射系数和比后向散射系数

由于有机物质和无机物质组成的差异,使得比散射系数具有较大的变异性,基于散射系数和后向散射系数的线性可加性^[10], b_p 和 b_{bp} 分别可表示为

$$b_p(\lambda) = b_i^m(\lambda)a_{ISPM} + b_o^m(\lambda)a_{OSPM}, \quad (4)$$

$$b_{bp}(\lambda) = b_{bi}^m(\lambda)a_{ISPM} + b_{bo}^m(\lambda)a_{OSPM}, \quad (5)$$

式中 $b_i^m(\lambda)$ 为无机物比散射系数, $b_o^m(\lambda)$ 为有机物比

散射系数, $b_{bi}^m(\lambda)$ 为无机物比后向散射系数, $b_{bo}^m(\lambda)$ 为有机物比后向散射系数。因此,可通过有机物和无机物质量浓度对散射系数、后向散射系数进行分离^[22], 两边分别同时除以 $a_{ISPM}(a_{OSPM})$, 利用等式左边 $b_p(\lambda)/a_{OSPM}(a_{ISPM}/a_{OSPM})$ 和右边 $a_{ISPM}/a_{OSPM}(a_{OSPM}/a_{ISPM})$ 进行线性回归($R^2 \geq 0.7, P < 0.001$), 得到线性斜率 $b_i^m(\lambda)[b_o^m(\lambda)]$, 2006 年 10 月, 2007 年 3 月, 2007 年 11 月的 $b_i^m(532\text{ nm})$ 分别为 0.957467, 1.3925 和 0.82;

$b_o^m(532\text{ nm})$ 分别为 0.3376, 0.34 和 0.51;发现 $b_i^m(\lambda)$ 的光谱特征与 b_p 极为相似,而 $b_o^m(\lambda)$ 光谱特征与藻类颗粒物散射系数光谱特征较为相似,在 440 nm 和 675 nm 受叶绿素吸收影响产生两个散射谷值(2007 年 03 月除外)(图 7)。这主要是 2007 年 03 月叶绿素质量浓度较低,有机物质量浓度相对较高,因此 2007 年 3 月的 $b_o^m(\lambda)$ 受到非藻类有机物吸收系数影响,可能表征了太湖水体非藻类有机物的比散射

系数光谱特征,而 2007 年 11 月和 2006 年 10 月的叶绿素质量浓度要比 2007 年 3 月高一个数量级(表 1),2006 年 10 月和 2007 年 11 月的 $b_o^m(\lambda)$ 则更多的受到藻类吸收系数的影响,可以看出 ISPM 和 OSPM 共同作用太湖水体散射系数光谱特征,其中 ISPM 处于主导地位,OSPM 处于次要地位,受非藻类有机物和藻类两种形式有机物影响 b_o^m 表现出了两种特有的光谱特征。

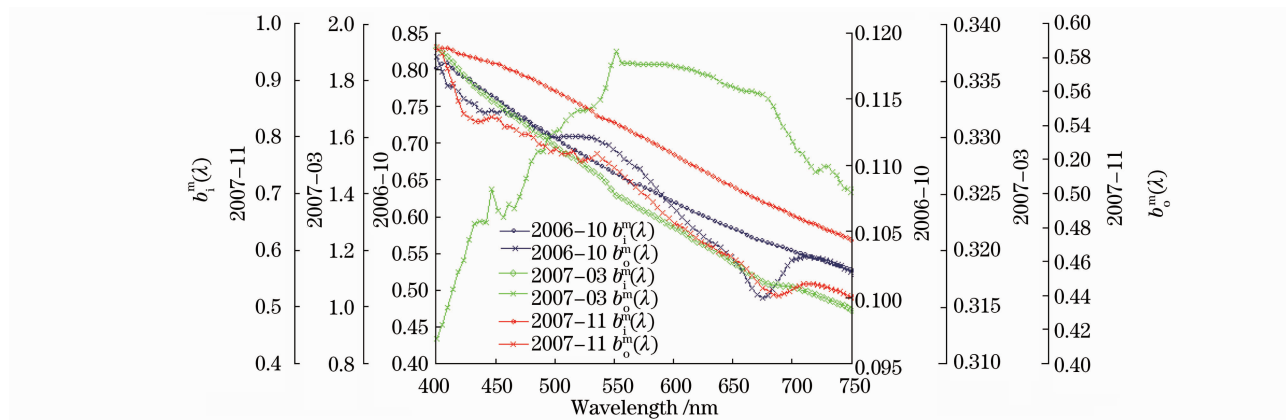


图 7 在 2006 年 10 月,2007 年 3 月和 2007 年 11 月的有机物和无机物比散射系数

Fig. 7 Specific scattering coefficient of inorganic and organic in Oct. 2006, Mar. 2007 and Nov. 2007

4 讨 论

水体颗粒物 b_{sp} 与 B 光谱行为主要决定于颗粒物的折射率和粒径大小^[37](用 ϵ 表征),由于 b_{sp} 和 B 的光谱行为极为相似,在此主要讨论 B 的光谱行为。由上述分析已知道,太湖水体 B 具有较强波长依赖性,这是由于 B 对 n 具有较强的依赖性(简化的米氏理论, Hulst^[38]),而根据柯西色散公式(非吸收性或弱吸收性颗粒物): $n = p + q/\lambda^2$, 即折射指数随着波长的增加近似 $[\lambda(400\sim 700\text{ nm}), n(1.03\sim 1.20)]$ 呈现幂函数形式衰减,从而使得 B 随着波长的增加也呈现幂函数形式衰减。但是部分样点并不存在这样的幂函数

关系[图 8(a)],这样的光谱主要出现在有机物和叶绿素质量浓度较高的样点,颗粒物的强吸收性破坏了折射指数随波长增加而衰减的柯西^[39]色散公式,使得 n 随波长的变化可表示为 Sellmeier^[39]公式:

$$n = 1 + \sum A\lambda^2 / (\lambda^2 - \lambda_0^2), \quad (6)$$

式中 A 与 λ_0 为常量, λ_0 物质的收带波长位置。这个公式可更好地表述靠近吸收线区域的 n 与 λ 关系,但当 $\lambda = \lambda_0$ 时公式无意义,此时 n 并不是随 λ 的呈现近似指数变化形式,而是随着吸收带的出现成不确定的波动状态。

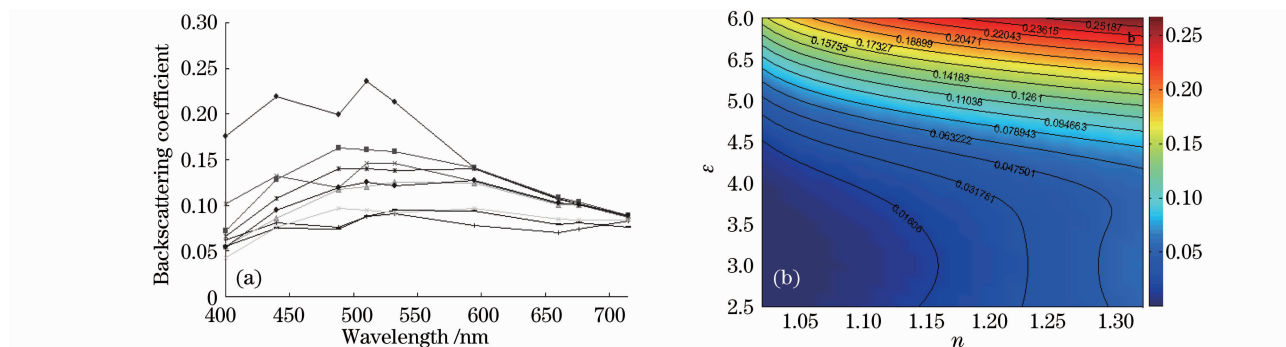


图 8 (a)后向散射系数,(b)后向散射率随 ϵ 和 n 变化图

Fig. 8 (a) Backscattering coefficient of several samples, (b) backscattering ratio change with ϵ and n

粒径对波长依赖性的影响主要包括两个方面:1) 粒径的大小,当粒径大小参数 $x \leq 2$ ($x = \pi D N_w / \lambda$, D 为粒径, N_w 为介质折射指数) 或 $D \leq 0.25 \mu\text{m}$ 时, B 几乎与 n 无关^[10],通过反米氏理论和 n 计算公式计算 B ,得到相似结论[图8(b)]:当 $\epsilon \leq 5$ 时,后向散射率几乎不随折射指数变化,太湖水体 ϵ 介于 3.5 ~ 4.5 之间,该区间正是 B 随 n 剧烈变化区域;2) 粒径的组成,由于河流输入颗粒物粒径与太湖本身颗粒物粒径的差异,使得基于单参数双曲线假设的粒径分布函数在太湖并不是普遍适用的,因而当粒径分布函数极大异于单参数双曲线时^[40],计算对粒径分布具有较大依赖性^[38]的 B 具有较大不确定性。

5 结 论

1) 太湖水体的 b_p , b_{bp} 和 B 具有较强的波长依赖性,随波长的增加呈幂函数形式减小,2006 年 10 月,2007 年 3 月,2007 年 11 月, b_p 幂指数平均值分别为 -0.6712, -0.8129 和 -0.7600; b_{bp} 幂指数平均值分别为 -3.487, -3.435 和 -3.019; B 幂指数平均值分别为 -2.816, -2.634 和 -3.019。但有机物和 CDOM 在短波以及叶绿素在 440 nm 和 675 nm 的强吸收作用能够破坏 b_p , b_{bp} 和 B 随波长幂函数递减的规律。

2) 太湖水体 b_{bp} 幂指数受颗粒物粒径影响较小,但当无机颗粒物占主导位置时 γ 与 ISPM/OSPM 具有显著的指数函数关系; γ 与 b_{bp} (532 nm) 之间存在极显著 ($p < 0.0001$) 的线性关系,随着 b_{bp} 的增加,后向散射光谱曲线变得更加陡峭 (γ 的负值增大)。

3) ISPM 和 OSPM 共同作用太湖水体散射系数光谱特征,当水体中 ISPM 占主导时, b_p 的光谱特征主要由 $b^m(\lambda)$ 决定,具有较强的光谱依赖性。当有机物占主导时, b_p 的光谱特征主要由 b^o 决定,而 b^o 受非藻类有机物和藻类两种形式有机物影响,表现出了两种特有的光谱特征,即藻类有机物主导时, $b^o(\lambda)$ 光谱特征与藻类颗粒物散射系数光谱特征较为相似,在 440 nm 和 675 nm 左右受叶绿素吸收影响产生两个散射谷值,而非藻类有机物主导时, $b^o(\lambda)$ 表征了太湖水体非藻类有机物的比散射系数光谱特征。

4) 太湖水体的 b^m (550 nm) 在 2006 年 10 月,2007 年 3 月,2007 年 11 月的范围分别为 0.221 ~ 1.551, 0.436 ~ 1.138 和 0.406 ~ 1.271, 平均值为 0.590, 0.597 和 0.714, b^m (532 nm) 分别为 0.957467, 1.3925 和 0.82,

b^o (532 nm) 分别为 0.3376, 0.34 和 0.51。2006 年 10 月, ISPM 和 OSPM 比后向散射系数分别为 0.0051(532 nm) gm^{-2} 和 0.0022(532 nm) gm^{-2} 。

5) 太湖水体颗粒物粒径相对较大,具有较强的前向散射特性;后向散射率具有较大的空间差异性,2006 年 10 月,2007 年 3 月,2007 年 11 月,9 个波段平均值分别为 0.01078, 0.01375 和 0.01251, 小于现有基于 Petzold 散射相函数计算达到的 0.018 (515 nm)。

参 考 文 献

- 1 M. Babin, A. Morel, F. Fell. Light scattering properties of marine particles in coastal and open ocean waters as related to the particle mass concentration [J]. *Limnol. Oceanogr.*, 2003, **48**(2): 843~859
- 2 C. D. Mobley, L. K. Sundman, E. Boss. Phase function effects on oceanic light fields [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(6): 1035~1050
- 3 John T. O. Kirk. Volume scattering function, average cosines, and the underwater light field [J]. *Limnol. Oceanogr.*, 1991, **36**(3): 455~467
- 4 Huang Chuangchun, Li Yunmei, Wang Qiao *et al.*. Interaction of influencing factors to bidirectional and air-water interface parameter in turbid water body [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 625~632
黄昌春, 李云梅, 王 桥等. 水-气界面参数和二向性影响因素交互作用研究 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 625~632
- 5 Huang Chuangchun, Li Yunmei, Sun Deyong *et al.*. Analysis of Q value influencing factors and its parametrization [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8): 2059~2066
黄昌春, 李云梅, 孙德勇等. Q 值的影响因素分析及其参数化 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(8): 2059~2066
- 6 R. W. Sheldon, A. Prakash, W. H. Sutcliffe. The size distribution of particles in the ocean [J]. *Limnol. Oceanogr.*, 1972, **17**(3): 327~340
- 7 X. D. Zhang, M. Lewis, M. Lee *et al.*. The volume scattering function of natural bubble populations [J]. *Limnol. Oceanogr.*, 2002, **47**(5): 1273~1282
- 8 S. Ladner, R. Arnone, R. Gould *et al.*. Variability in the backscattering to scattering and F/Q ratios observed in natural water [C]. *Proc. Ocean Optics XVI*, 2002, 18~22
- 9 H. Loisel, X. Meriaux, J. F. Berthon. 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
- 10 O. Ulloa, S. Sathyendranath, T. Platt. Effect of the particle-size distribution on the backscattering ratio in seawater [J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(30): 7070~7077
- 11 A. Morel, Y. H. Ahn. Optical efficiency factors of free-living marine bacteria: Influence of bacterioplankton upon the optical properties and particulate organic carbon in oceanic waters [J]. *J. Marine Research*, 1990, **48**(1): 145~175
- 12 D. Stramski, E. Boss, D. Bogucki *et al.*. The role of seawater constituents in light backscattering in the ocean [J]. *Progress in Oceanography*, 2004, **61**(1): 27~56
- 13 M. S. Twardowski, E. Boss, J. B. Macdonald. 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]. *J. Geophysical Research*, 2001,

- 106(c7): 4129~4142
- 14 N. G. Jerlov. *Marine Optics* [M]. New York: Elsevier scientific Publishing company, 1976
- 15 C. D. Mobley. *Light and Water* [M]. New York: Elsevier scientific Publishing company, 1994
- 16 Shi Kun, Li Yunmei, Wang Qiao *et al.*. Study of scattering coefficients model in inland eutrophic lake [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2477~2485
施 坤, 李云梅, 王 桥 等. 内陆湖泊富营养化水体散射系数模型研究 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2477~2485
- 17 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
- 18 R. D. Vallancourt, C. W. Brown, R. L. Guillard *et al.*. Light backscattering properties of marine phytoplankton: relationships to cell size, chemical composition and taxonomy [J]. *J. Plankton Research*, 2004, **26**(2): 191~212
- 19 Y. Huot, A. Morel, M. S. Twardowski *et al.*. Particle optical backscattering along a chlorophyll gradient in the upper layer of the eastern South Pacific Ocean [J]. *Biogeosciences*, 2008, **5**(2): 495~507
- 20 Q. J. Song, J. W. Tang. The study on the scattering properties in the Huanghai Sea and East China Sea [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2007, **28**(12): 24~30
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*, 2007, **28**(12): 24~30
- 21 D. Y. Sun, Y. M. Li, C. F. Le *et al.*. Scattering characteristics of taihu lake and its relationship models with suspended particle concentration [J]. *Environmental Science*, 2007, **28**(12): 24~30
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*, 2006, **28**(4): 56~63
- 22 W. A. Snyder, R. A. Arnone, C. O. Davis *et al.*. Optical scattering and backscattering by organic and inorganic particulates in U. S. coastal waters [J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(5): 666~677
- 23 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
- 24 Qin Boqiang, Hu Weiping, Chen Weimin *et al.*. Process and Mechanism of Environment Changes of the Taihu Lake [M]. Beijing: Science Press, 2004
秦伯强, 胡维平, 陈伟民 等. 太湖水环境演化过程与机理 [M]. 北京: 科学出版社, 2004
- 25 C. Moore, A. Barnard, D. Hankins *et al.*. Spectral Absorption and Attenuation Meter (ac-s) User's Guide [S]. Revision A America: WET Labs Inc, 2004, 5~20
- 26 J. L. Mueller, G. S. Fargion, R. V. Zaneveld *et al.*. Ocean Optics Protocols For Satellite Ocean Color Sensor Validation. Revision 4. Volume IV [S]. NASA, 2003
- 27 Chen Yuwei, Chen Kaining, Hu Yaohui. Discussion on possible error for phytoplankton chlorophyll-a concentration analysis using hot-ethanol extraction method [J]. *J. Lake Sciences*, 2006, **18**(5): 550~552
陈宇炜, 陈开宁, 胡耀辉. 浮游植物叶绿素 a 测定的“热乙醇法”及其测定误差探讨 [J]. *湖泊科学*, 2006, **18**(5): 550~552
- 28 R. W. Gould, R. A. Arnone, P. M. Martinolich. Spectral dependence of the scattering coefficient in case 1 and case 2 waters [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(12): 2377~2383
- 29 H. Loisel, J. M. Nicolas, A. Sciandra *et al.*. Spectral dependency of optical backscattering by marine particles from satellite remote sensing of the global ocean [J]. *J. Geophysical Research*, 2006, **111**(C): C09024
- 30 A. Morel, G. Bernard, C. Malik. Bio-optical properties of high chlorophyll case 1 waters and of yellow-substance-dominated case 2 waters [J]. *Deep-Sea Research*, 2006, **53**(9): 1439~1459
- 31 S. Bernard, T. A. Probyn, R. G. Barlow. Measured and modeled optical properties of particulate matter in the southern Benguela [J]. *South African J. Sciences*, 2001, **97** (9): 410~420
- 32 E. Boss, M. S. Twardowski, S. Herring. Shape of the particulate beam attenuation spectrum and its inversion to obtain the shape of the particulate size distribution [J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(27): 4885~4893
- 33 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
- 34 A. Hofmann, J. Dominik. Turbidity and mass concentration of suspended matter in lake water; a comparison of two calibration methods [J]. *Aquatic Science*, 1995, **57**(1): 54~69
- 35 M. Babin, A. Morel, V. Fournier-Sicre *et al.*. Light scattering properties of marine particles in coastal and open ocean waters as related to the particle mass concentration [J]. *Limnol. Oceanogr.*, 2003, **48**(2): 843~859
- 36 D. Stramski, B. Sławomir, W. J. Flatau. Optical properties of Asian mineral dust suspended in seawater [J]. *Limnol. Oceanogr.*, 2004, **49**(3): 749~755
- 37 D. Risovic. Effect of suspended particulate-size distribution on the backscattering ratio in remote sensing of seawater [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(33): 7092~7101
- 38 H. C. Hulst. *Light Scattering by Small Particles* [M]. New York: John Wiley & Sons INC., 1957
- 39 Born M, Wolf E. *Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation Interference and Diffraction of Light*, Seventh (Expanded) Edition [M]. Yang Weisun Transl., Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005
波 恩, 沃耳夫. *光学原理-光的传播、干涉和衍射的电磁波理论* (第七版) [M]. 杨蔚荪 译, 北京: 电子工业出版社, 2005
- 40 M. Martinis, D. Risovic. Fractal analysis of suspended particles in seawater [J]. *FIZIKA*, 1998, **B7**(2): 65~72