

太湖水体颗粒物散射的剖面分布及其影响因素分析

施坤 ,李云梅* ,吕恒 ,孙德勇 ,黄昌春 ,王彦飞 ,金鑫

(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 :为了探索太湖水体颗粒物散射的剖面分布特征 ,掌握水下散射变化机制 ,2008 年 11 月对太湖 3 个不同深度的散射系数和后向散射系数分别进行观测 . 研究分析了它们随深度变化的特征 ;由衰减系数 ,计算出太湖水体颗粒物粒径分布函数(PSD)斜率值的剖面分布 ;根据散射系数与悬浮物浓度的相关关系 ,推算了悬浮物浓度及组成的剖面分布 ;根据水体折射指数 ,分析了不同深度水体散射系数的主导影响因子 . 在 0、50、100 cm 这 3 个深度处的颗粒物散射 ,分别有 14%、17%、12% 的样本是由藻类颗粒物主导的 ,35%、30%、34% 是由无机颗粒物和藻类有机颗粒物主导的 ,51%、53%、51% 是由三者共同主导 . 结果表明 ,太湖水体的散射和后向散射系数随深度变化较小 ,不同湖区太湖水体总悬浮的浓度差异性很大 ,但是在不同剖面深度上差异较小 ,浓度差异较大的点基本上都出现在入湖河流旁 ,太湖水体颗粒物散射系数的主导影响因子除少数靠近入湖河流的样点外 ,大部分样点在不同剖面深度上差异较小 .

关键词 :太湖 ;散射系数 ;后向散射系数 ;剖面分布 ;主导影响因子 ;颗粒物粒径分布函数

中图分类号 :X524 文献标识码 :A 文章编号 :0250-3301(2010)03-0598-08

Depth Profile of Suspended Particle Scattering Coefficient and Its Impact Factors in Taihu Lake

SHI Kun , LI Yun-mei , LÜ Heng , SUN De-yong , HUANG Chang-chun , WANG Yan-fei , JIN Xin

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

Abstract :To acquire the depth profile of suspended particle scattering coefficient and the mechanism of surface reflection , three different depths of Taihu Lake scattering coefficient and backscattering coefficient are obtained in Nov. 2008 , respectively . And their characteristic variation with depth is studied . Profiling distribution of the slope of particulate size distribution (PSD) is computed by the attenuation coefficient . Profiling distribution of the concentration and composition of suspended particle is computed according the relationship between the scattering coefficient and the suspended particle concentration . Impact dominant factors on scattering coefficient of the depth of water are divided according to the range of refractive index . At the three depths(0 , 50 , 100 cm) , the particle scattering , with the percentage 14% , 17% , 12% of the samples are dominated by algae , respectively . 35% , 30% , 34% of the samples are dominated by inorganic particulate matter and Non-algal organic particulate matter and 51% , 53% , 51% of the samples are dominated by the above all . The results can be concluded as : scattering and backscattering coefficient of Taihu Lake water body changes with depth slightly . The concentration of total suspended particles is of more diversity in different lake area , but there is less difference at different depths except those samples near the inflow rivers . The main factors of scattering coefficient of most aquatic scattering in Taihu Lake had little difference at different depths , except several samples beside the inflow rivers .

Key words :Taihu Lake ; scattering coefficient ; backscattering coefficient ; profiling distribution ; dominate factors ; particulate size distribution (PSD)

水体的固有光学量主要包括吸收系数和散射系数 ,关于水体各个组分的吸收特性及参数化 ,水体颗粒物散射特性及参数化、散射与颗粒物浓度之间的关系 ,国内外已经做了大量的研究^[1-21] . 然而这些研究中只涉及到水体的单层的平面结构 ,而未对散射和后向散射的垂直分布特征进行研究 . 遥感器所接收的水色信号是不同深度水色信息的综合反映 ,因此 ,不同深度后向散射和散射特征对遥感信号有着较大的影响 ,对其剖面分布特征的研究有助于推动水色遥感的应用和发展 .

风浪扰动极易造成湖体底泥的再悬浮 ,对水面反射率产生较大的影响 . 为了探索太湖水下光场

的垂直变化 ,掌握水下散射变化机制 ,本研究利用实测的太湖水体散射系数和后向散射系数 ,研究分析了它们随深度变化的特征 ;根据散射与总悬浮物之间的关系 ,估算了太湖总悬浮物浓度的剖面分布 ;根据后向散射概率计算出水体的折射指数 ,并以此为依据分析太湖不同深度水体散射的主导影响因子 .

收稿日期 :2009-04-18 ;修订日期 :2009-07-06

基金项目 :国家自然科学基金项目(40971215) ;国家自然科学基金重点项目(40730527)

作者简介 :施坤(1985 ~) ,男 ,博士研究生 ,主要研究方向为环境遥感 ,E-mail :ahnushikun@ yahoo . com . cn

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

1 材料与方法

1.1 实验概述

太湖是我国五大淡水湖之一,流域面积、平均海拔、平均水深分别为2 338.1 km²、3.33 m、1.9 m,是典型的大型浅水湖泊^[23]。2008年11月进行了太湖野外实验,对77个样点进行了观测(图1)。测量的参数包括水体中颗粒物衰减系数、吸收系数、颗粒物后向散射系数、总悬浮物浓度。散射及后向散射在野外测量,测量深度设置为0、50、100 cm,同时采集湖体表层水样,样品放入冷藏箱带回实验室进行过滤处理,测定总悬浮物浓度。

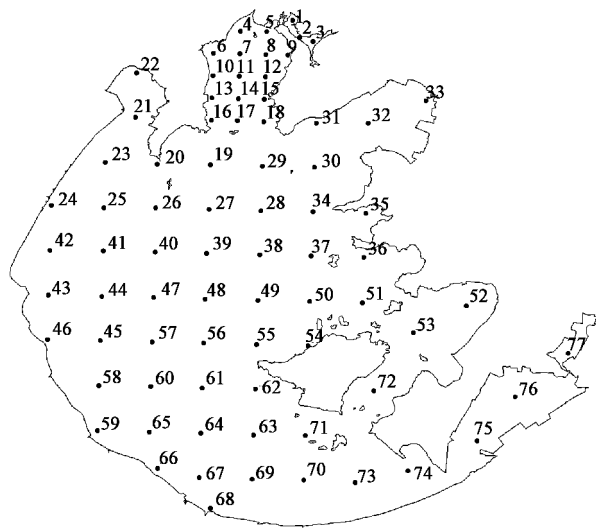


图1 样点分布示意

Fig.1 Sample sites

1.2 参数的测定

运用 Wet labs 公司的光谱吸收和衰减仪(AC-S)获得太湖水体颗粒物的散射系数^[24],由 AC-S 直接获得的是水体吸收系数 $a(\lambda)$ 和衰减系数 $c(\lambda)$,为了得到更为精确的吸收系数数据,需对吸收系数作温度和散射纠正,纠正以及颗粒物散射系数的获取方法见文献^[22]。太湖水体颗粒物后向散射系数通过 BB9 测量得到^[25],得到较为精确的颗粒物后向散射系数以及总悬浮物浓度,测量的方法见文献^[22]。

1.3 数据分析

利用 SPSS13.0 计算本文所需要的各种统计量,如最大值、最小值及标准差等。

2 结果与分析

2.1 太湖水体中颗粒物后向散射系数和散射系数

的垂直分布特征

观察各样点的后向散射系数(如图2),后向散射系数随着波长的规律是:随着波长的增加,后向散射系数不断减小,在412 nm处的后向散射系数最大,到红光波段最小。0~1 m表层水在532 nm处后向散射系数的变化如图3所示。0、50、100 cm处412 nm波段后向散射系数变化范围分别为1.136~0.119 5 m⁻¹[平均值为(0.467 ± 0.133) m⁻¹]、1.160 3~0.119 8 m⁻¹[平均值为(0.645 ± 0.136) m⁻¹]、1.149 3~0.125 98 m⁻¹[平均值为(0.468 6 ± 0.137 7) m⁻¹];在532 nm处的变化范围分别为0.302 8~0.116 3 m⁻¹[平均值为(0.222 ± 0.018 6) m⁻¹]、0.303 4~0.114 2 m⁻¹[平均值为(0.222 ± 0.019 4) m⁻¹]、0.303 6~0.12 m⁻¹[平均值为(0.222 ± 0.02) m⁻¹];在715 nm处的变化范围分别为0.101 7~0.084 8 m⁻¹[平均值为(0.094 ± 0.000 2) m⁻¹]、0.101 7~0.091 8 m⁻¹[平均值为(0.099 6 ± 0.001) m⁻¹]、0.101 6~0.091 4 m⁻¹[平均值为(0.099 5 ± 0.011) m⁻¹]。

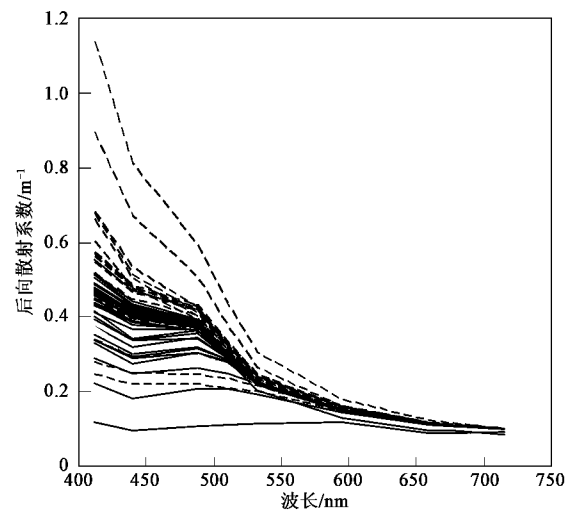


图2 太湖水体颗粒物后向散射系数的光谱曲线

Fig.2 Backscattering coefficient spectra of particles in Taihu Lake

颗粒物散射系数(图4),光谱特征较为单一,近似为倾斜的直线,并无明显的谷值和峰值。散射系数大致随波长的增加而下降。从不同样点的悬浮物浓度观测值可以看到,总悬浮物浓度从6 mg/L变化到256 mg/L,其水平空间差异较大,太湖水体颗粒物散射系数在空间上变化较大。

3个深度水层在532 nm处散射系数的变化如图5所示。从图5中可以看出散射系数在不同深度的总体变化比较小,与后向散射系数随深度的变化

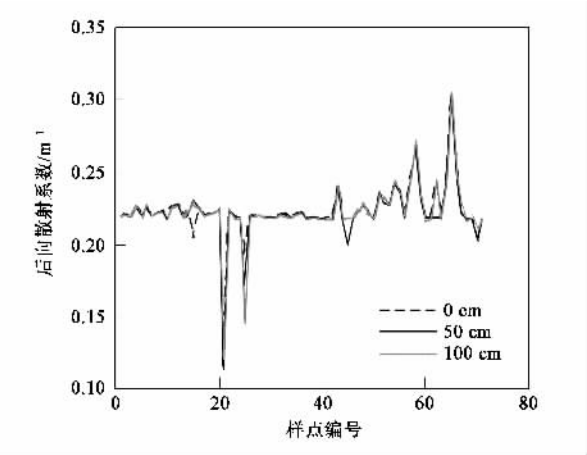


图 3 不同深度的 532 nm 处后向散射系数

Fig.3 Backscattering coefficient at 532nm in different depths

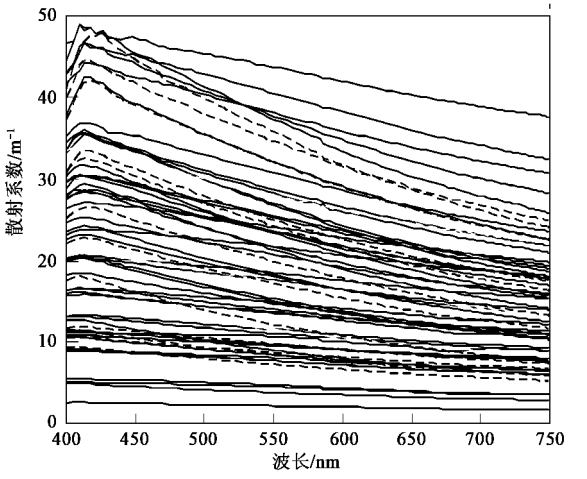


图 4 太湖水体散射系数光谱

Fig.4 Scattering coefficient spectra of Taihu Lake

一致. 为了分析水体散射及后向散射随不同深度的变化机制, 以下对不同深度悬浮物浓度及散射的主导影响因子进行进一步分析.

2.2 总悬浮物浓度的剖面分布

不同水体其悬浮颗粒物的组成和和浓度都有很大的差异, 悬浮颗粒物浓度与散射系数都有不同的关系, 对特定水体需要建立特定的区域模式^[22]. 图 6、7 显示了太湖水体颗粒物浓度与水体散射系数和后向散射系数之间的相关性, 无论是散射系数还是后向散射系数与无机颗粒物浓度的相关性都是最高的, 而与有机悬浮物浓度相关性偏低, 总悬浮物浓度与散射及后向散射系数的相关性与无机颗粒物是一致的, 因此认为, 太湖水体的散射特性主要受无机颗粒物的影响, 这与孙德勇等^[22]和 Bowers 等^[26]结论是一致的. 由相关性分析可知后向散射与颗粒物的

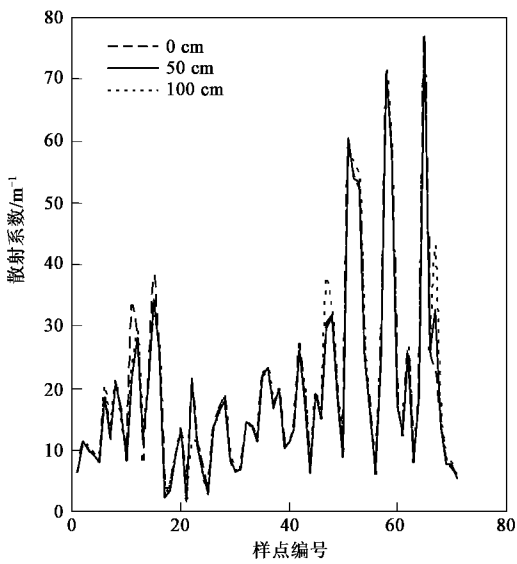


图 5 不同深度的 532 nm 处散射系数

Fig.5 Scattering coefficient at 532 nm in different depths

相关性随波长的增加而下降, 散射系数与颗粒物浓度之间的相关性随波长的增加而上升, 说明颗粒物浓度主要影响着短波方向的后向散射, 而长波波段的后向散射影响较小, 而对散射系数, 则是影响其长波的散射, 对短波的散射影响较小.

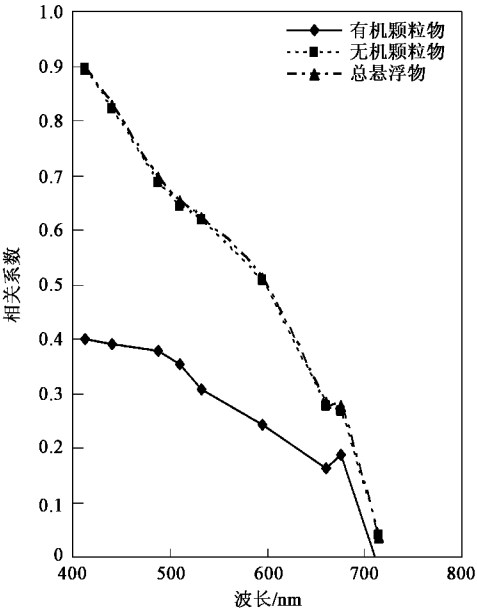


图 6 后向散射系数与悬浮物浓度的相关性分析

Fig.6 Correlation of backscattering coefficient and TSM ,OSM ,ISM

在比较散射系数与后向散射系数与无机颗粒物和总悬浮浓度的相关性后, 选择 532 nm 处的散射系数建立与无机颗粒物和总悬浮物浓度的关系. 利用表层水的 $b_p(532)$ 与 ISM(无机颗粒物浓度)和 SPM

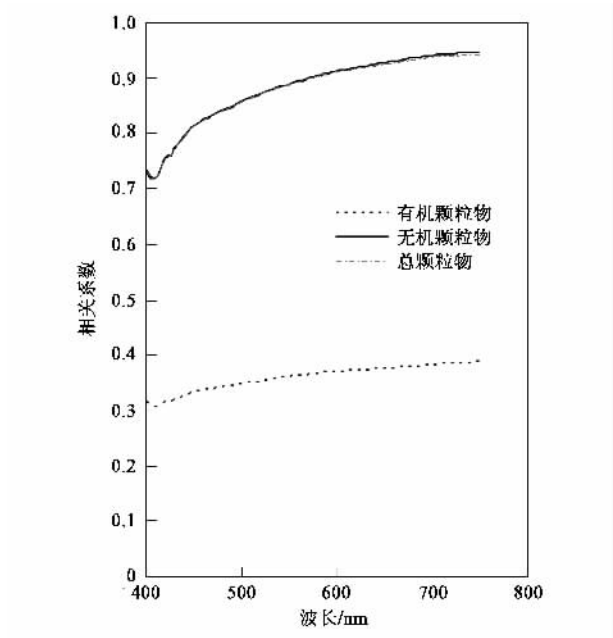


图 7 散射系数与悬浮物浓度的相关性分析

Fig. 7 Correlation of scattering coefficient and TSM ,OSM ,ISM
(总悬浮物浓度)进行线性关系(比其他关系精度高,况且较为稳定)拟合(图 8、9)。

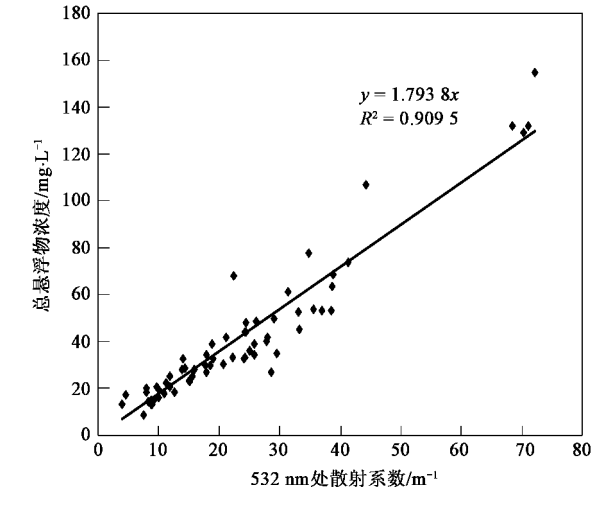


图 8 532 nm 散射系数与总悬浮物浓度的曲线拟合

Fig. 8 Curve fitting of $b_p(532)$ and TSM ISM

利用散射与总悬浮浓度之间的关系模型,估算不同深度水层总悬浮物的浓度,其结果如图 10 所示.从中可以看到,太湖水体在水平方向上总悬浮物浓度变化较大,不同湖区总悬浮的浓度差异性很大,在垂直方向上,不同深处的总悬浮物浓度差异较小,太湖水体颗粒物分布较为均匀,每个样点总悬浮物浓度随深度变化的标准差,在 10、14、16、19、18、24、65 及 70 号点随深度的变化相对较大,其他样点

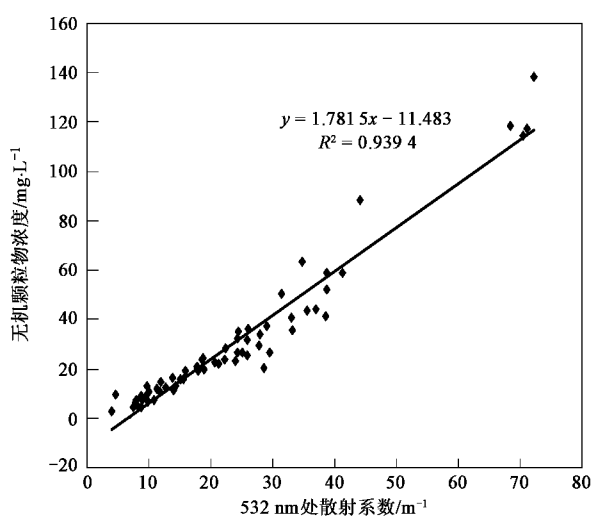


图 9 532 nm 散射系数与无机悬浮物浓度的曲线拟合

Fig. 9 Curve fitting of $b_p(532)$ and ISM

的变化相对较小,总体来说太湖水体颗粒物浓度随深度变化较小,这与后向散射以及散射系数的变化是一致的。

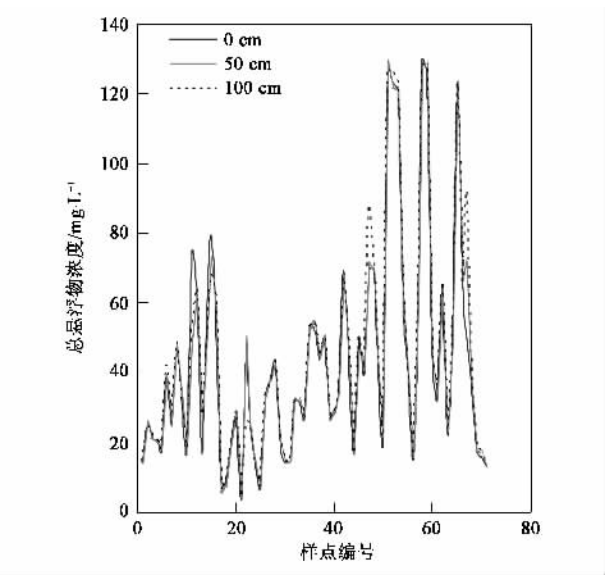


图 10 每个样点不同深度的总悬浮物浓度

Fig. 10 TSM of every sample in different depths

2.3 太湖颗粒物粒径分布函数(PSD)的斜率随深度的变化

衰减系数的光谱可以用下式来模拟^[23]:

$$c(\lambda) = A(\lambda)^{-\gamma} \quad (1)$$

式中, c 为衰减系数,单位为 m^{-1} ; λ 为波长,单位为 nm ; A 和 γ 是经拟合而得到的常数。

颗粒物粒径分布的变化可以通过其分布函数的斜率(ξ)来描述^[28],较小的颗粒物 PSD 斜率要大于

较大颗粒物的^[25], ξ 值的范围在 2.5 ~ 5.0 之间^[30~35], PSD 的斜率值可以通过 γ 获得.

Twadowski 等^[33] 研究得出 PSD 斜率(ξ)和 γ 之间的关系为:

$$\xi = 3 + \gamma \quad (2)$$

Boss 等^[34] 得到在吸收系数变化较大的水体, 两者更为精确的关系:

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

本研究通过对不同采样点, 不同深度的衰减系数与波长进行乘幂拟合得到 γ , 其拟合的 R^2 均在 0.99 以上, 根据式(3)计算得到 ξ 的垂直剖面分布(图 11).

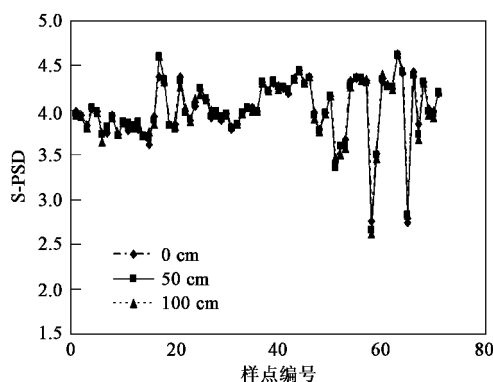


图 11 每个样点不同深度的颗粒物分布函数的斜率

Fig. 11 Slope-PSD of every sample in different depths

太湖水体颗粒物粒径分布函数的斜率值在 2.74 ~ 4.63 之间(图 11), 0、50、100 cm 水层颗粒物粒径分布函数斜率的范围分别为 2.74 ~ 4.62(平均值为 4.0049 ± 0.329)、2.66 ~ 4.61(平均值为 4.005 ± 0.336)、2.61 ~ 4.63(平均值为 4 ± 0.341). 本研究所得 ξ 的值基本上落在 Diehl 等^[30] 和 Morel 等^[32] 研究范围内. 每个样点在不同深度, ξ 值标准差为 0.1 ~ 0.005 之间, 平均值为 0.01, 由此可知太湖水体在 0 ~ 1 m 的水深范围内, 颗粒物粒径分布随深度变化不大, 而在不同湖区, 颗粒物粒径分布变化较大.

2.4 太湖不同深度散射的主导影响因子分析

颗粒物后向散射概率 b'_{bp} 能够很好地反映水体中颗粒物组成等相关信息^[31]. 颗粒物后向散射概率是颗粒物后向散射系数与颗粒物散射系数之比. 根据米散射定律颗粒物后向散射概率是水体中颗粒物粒径、折射指数的函数, 通常与颗粒物的粒径成反比, 颗粒物粒径越小, 则后向散射概率就越大; 与折射指数成正比^[36, 37]. 因而颗粒物后向散射概率是研

究颗粒物本身特性和水体光学信息非常重要的参数.

本研究利用实测颗粒物后向散射与颗粒物散射计算出后向散射概率的范围在 0.004 ~ 0.05 之间, 其范围要大于孙德勇等^[22] 的研究结果. 表层水颗粒物后向散射概率的分布如图 12. 太湖水体后向散射概率在水平方向上变化较大, 反映出太湖在不同湖区的颗粒物的组成差异性较大, 图 13 显示了 3 个深度的所有波段后向散射概率的平均值.

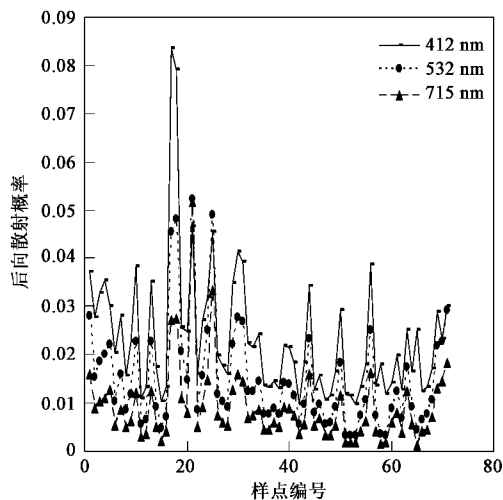


图 12 表层水后向散射概率

Fig. 12 Ratio of backscattering coefficient of surface water

由图 13 可知太湖水体后向散射概率随深度基本上没有变化, 大体相同, 结合后向散射概率的标准差可知只有在 10、14、16、18、24、70 号点后向散射概率随深度变化相对较大, 而颗粒物粒径的分布函数斜率值随深度的变化却很小, 可知这几个点的颗粒物组成随深度变化较大. 19、65 号点后向散射、散射系数随深度变化较大的原因不是颗粒物组成和粒径分布不同造成的, 而是由颗粒物浓度随深度变化造成的. 在 19 和 65 号点, 后向散射概率随深度的变化较小, 说明这 2 个样点在剖面上颗粒物的组成变化较小, 况且其无机颗粒物的比例随深度的变化不大, 而颗粒物的浓度随深度的变化较大, 而散射系数和后向散射系数随深度变化较大, 粒径的分布函数斜率值在这 2 个点变化也较小, 可能的原因就是由其颗粒物浓度随深度变化造成的. 10、14、16、18、24、70 号点基本上都处在太湖的边缘, 况且离太湖的入湖河流较近, 可能受入湖河流的影响, 导致这几个点在垂直方向上颗粒物组成变化较大.

Ulloa 等^[36] 研究认为藻类颗粒物的后向散射概

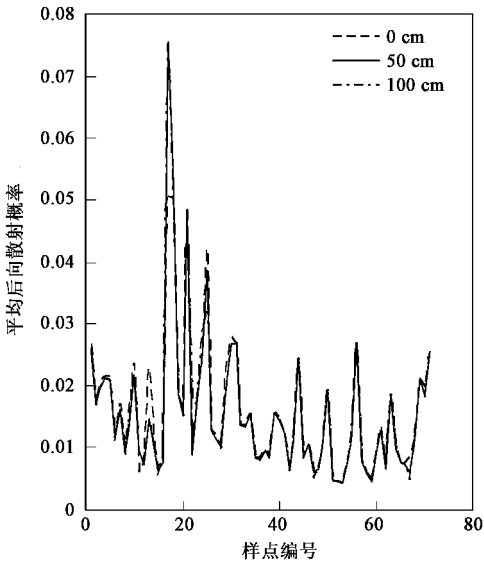


图 13 所有波段平均后向散射概率

Fig. 13 Ratio of backscattering coefficient of all bands average

率较低而无机颗粒物的后向散射概率要高。比较前人研究结果,结合图 12 可知太湖水体的后向散射概率变化范围较大,说明影响各个样点的颗粒物组成以及主导因子复杂多变,而在垂直方向上变化较小,反映太湖水体颗粒物的组成随深度的变化较小。为了得到不同深度颗粒物散射的主导因子,利用颗粒物的折射指数进行分析^[22]。浮游植物的折射指数较低,大概在 1.01 ~ 1.09 之间变化,而无机颗粒物及非藻类有机颗粒物的相对较高,大致在 1.15 ~ 1.2 之间,因此将水体中颗粒物散射的主导因子分为 3 种类型:a 藻类颗粒物,折射指数 < 1.09;b 无机颗粒物及非藻类有机物主导的,后向散射概率 > 1.15;c 三者共同主导的,后向散射概率在 1.09 ~ 1.15 之间^[18]。水中颗粒物的折射指数可以通过式(5)来估算^[29]。

当 $\xi < 3.5$ 时:

$$n_p = 1 + b'_{bp}{}^{0.582} \quad (\text{不确定度} \pm 2\%) \quad (4)$$

当 $\xi > 3.5$ 时:

$$n_p = 1 + b'_{bp}{}^{0.5377 + 0.4867(\xi - 3)^2} \times [1.4676 + 2.2950 \times (\xi - 3)^2 + 2.3113 \times (\xi - 3)^4] \quad (5)$$

式中, n_p 是颗粒物的折射指数; b'_{bp} 是颗粒物各个波段的后向散射概率平均值。

经计算(图 14),在 0、50、100 cm 水层中 $n_p < 1.09$ 的分别有 10、12、9 个,通过估算得到不同深度太湖水体无机颗粒物浓度和总悬浮物浓度,这些样点中无机颗粒物占总颗粒物浓度的比例最高为 13%; $1.15 > n_p > 1.09$ 分别有 36、38、38 个,这些

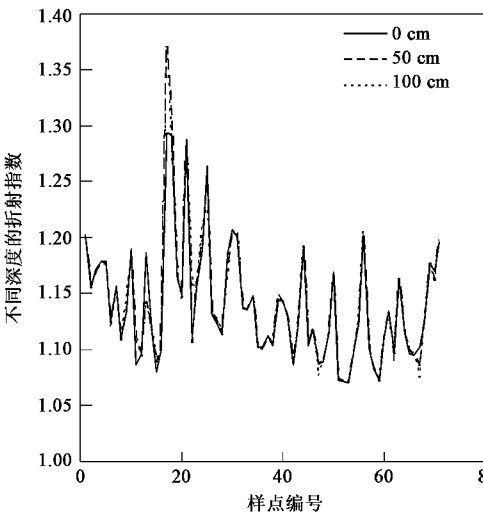


图 14 不同深度的折射指数

Fig. 14 Index of refraction in different depths

样点中无机颗粒物占总颗粒物浓度的比例在 13% ~ 60% 范围内; $n_p > 1.15$ 分别有 25、21、24 个,这些样点中无机颗粒物占总颗粒物浓度的比例在 60% ~ 90% 范围内。可见在表层水中,有 51% 的样点的颗粒物散射系数是由浮游植物与无机颗粒物和藻类有机物共同主导,有 14% 的样点是由藻类颗粒物主导,这些样点中叶绿素浓度占总颗粒物浓度的比例在 0.1% ~ 0.3% 范围内,大于其他颗粒物占主导的样点。有 35% 的样点是由无机颗粒物和藻类有机物主导;在 50 cm 处水体中,有 53% 的样点是由三者共同主导,17% 的站点是由藻类颗粒物主导,30% 的样点是由无机颗粒物和藻类有机物主导;在 100 cm 处水体中,有 12% 的样点是由藻类颗粒物主导,54% 的样点是由藻类颗粒物和无机颗粒物以及藻类有机物主导,34% 样点是由无机颗粒物和藻类有机物主导。在 3 个深度的颗粒物主导因子中,只有 10、14、16、18、24、70 号样点在 3 个深度的颗粒物散射的主导因子发生了改变,有的在表层是由藻类颗粒物主导,但是到了 50、100 cm,就变成了三者共同主导,比如 14 号点与 18 号点。10、14、16、18、24、70 号点基本上都处在太湖的边缘,况且离太湖的入湖河流较近,根据式(1)、(2)所估算的不同深度太湖水体无机颗粒物浓度和总悬浮物浓度,10 号点在不同深度,无机颗粒物比例范围为 45% ~ 55%,14 号点为 70% ~ 80%,16 号点为 56% ~ 63%,18 号点为 80% ~ 87%,24 号点为 55% ~ 76%,70 号点为 76% ~ 86% 之间,而其他样点无机颗粒物比例随深度的变化上下浮动不

足 3 个百分点. 导致这几个点垂直方向颗粒物组成变化较大 ,从而使得其颗粒物散射的主导因子随着深度而发生变化 ,而其他样点的主导因子基本上不随深度变化而变化.

3 结 论

(1)在 0 ~ 1 m 上层水 ,射系数在不同深度的总体变化比较小 ,变化较大的几个点主要是颗粒物的组成和浓度差异而造成的 ;太湖水体颗粒物粒径的分布随深度变化较小 ,而在不同的湖区变化较大.

(2)颗粒物浓度主要影响着短波波段的后向散射 ,而长波波段的后向散射影响较小 ,对于散射系数而言 ,则对长波波段的影响较大.

(3)太湖水体颗粒物散射系数的主导影响因子除少数几个靠近入湖河流的点外 ,大部分样点在不同剖面深度上差异较小.

参考文献 :

[1] Morel A , Gentili B , Chami M , *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] Annick B , Dariusz S. Spectral absorption coefficients of living phytoplankton and non-algal biogenous matter : a comparison between the Peru upwelling area and the Sargasso Sea [J]. Limnol Oceanogr , 1990 , **35**(3) 562-582.

[3] 朱建华 ,李铜基. 黄东海海区浮游植物色素吸收系数与叶绿素 a 浓度关系研究[J]. 海洋技术 , 2004 , **23**(4) :117-122.

[4] 张运林 ,吴生才 ,秦伯强 ,等. 太湖梅梁湾有色可溶性有机物对光的吸收[J]. 中国环境科学 , 2004 , **24**(4) :405-409.

[5] Rochelle-Newall E J , Fisher T R. Chromophoric dissolved organic matter and dissolved organic carbon in Chesapeake Bay [J]. Mar Chem , 2002 , **77**(1) :23-41.

[6] Rijkeboer M , Dekker A G , Gons H J. Subsurface irradiance reflectance spectra of inland waters differing in morphometry and hydrology [J]. Aquatic Ecology , 1997 , **31**(3) 313-323.

[7] Lutz V A , Sathyendranath S , Head E J H. Absorption coefficient of phytoplankton : regional variations in the North Atlantic [J]. Mar Ecol Prog Ser , 1996 , **135** :197-213.

[8] Bricaud A , Stramski D. Spectral absorption coefficients of living phytoplankton and nonalgal biogenous matter : A comparison between the Peru upwelling and the Sargasso Sea [J]. Limnol Oceanogr , 1990 , **35** 562-582.

[9] Vahatalo A V , Wetzel R G , Paerl H W. Light absorption by phytoplankton and chlromophoric dissolved organic matter in the grainage basin and estuary of the Neuse River , North Carolina (U. S. A) [J]. Freshwater Biol , 2005 , **50**(3) :477-493.

[10] Sasaki H , Miyamura T , Saitoh S I , *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** :447-458.

[11] Dekker A G , Malthus T J , Wijnen M M , *et al.* Remote sensing as a tool for assessing water quality in Loosdrecht lakes [J]. Hydrobiologia , 1992 , **233** :137-189.

[12] 乐成峰 ,李云梅 ,查勇 ,等. 太湖梅梁湾水体组分吸收特性季节差异分析[J]. 环境科学 , 2008 , **29**(9) 2448-2455.

[13] Le C F , Li Y M , Zha Y , *et al.* Specific absorption coefficient and the phytoplankton package effect in Lake Taihu , China [J]. Hydrobiologia , 2009 , **619** 27-37.

[14] 黄昌春 ,李云梅 ,孙德勇 ,等. 太湖 CDOM 紫外吸收特性及其分子量时空分布特征[J]. 中国环境科学 , 2009 , **29**(3) : 261-268.

[15] 黄昌春 ,李云梅 ,孙德勇 ,等. 太湖水体漫衰减系数特征及其对水生态环境影响分析[J]. 环境科学 , 2009 , **30**(2) : 348-355.

[16] Morel A. Optical properties of pure water and pure sea water , chapter 1 in Optical Aspects of Oceanography [M]. New York : Academic Press , 1974. 1-24.

[17] Haltrin V I. One-Parameter Model of Seawater Optical Properties [A]. In : SPIE Ocean Optics XIV [C]. Kailua-Kona , Hawaii : Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers , 1998.

[18] Kopelevich O V. 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.

[19] Gordon H R , Morel A. Remote assessment of ocean color for interpretation of satellite visible imagery : a review [A]. In : Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies : 4 [M]. New York : Springer Verlag , 1983. 114.

[20] 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.

[21] 李铜基 ,陈清莲 ,杨安安 ,等. 黄东海春季水体后向散射系数的经验模型研究[J]. 海洋技术 , 2004 , **23**(3) :10-14.

[22] 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.

[23] 秦伯强 ,胡维平 ,陈伟民. 太湖水环境演化过程与机理[M]. 北京 : 科学出版社 , 2004. 1-2.

[24] Moore C , Barnard A , Hankins D , *et al.* Spectral absorption and attenuation meter (ac-s) user's Guide , revision A [R]. America : WET Labs Inc. , 2004. 5-20.

[25] Moore C , Barnard A , Hankins D , *et al.* Scattering meter (BB9) user's guide , revision A [R]. America : WET Labs Inc. , 2005. 2-13.

[26] Bowers D G , Mitchelson-Jacob E G. Inherent optical properties of the Irish Sea determined from underwater irradiance measurements [J]. Estuar Coast Shelf S , 1996 , **43** :433-447.

[27] Boss E , Twardowski M S , Herring S. The shape of the particulate beam attenuation spectrum and its relation to the size distribution of oceanic particles [J]. Appl Opt , 2001 , **40** :4885-4893.

[28] 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]. J Geophys Res , 2004 , **109**(C01014) :1-20.

[29] Boss E , Pegau W S , Gardner W D , *et al.* The spectral particulate

- attenuation and particle size distribution in the bottom boundary layer of a continental shelf [J]. J Geophys Res , 2001 , **106** : 9509-9516.
- [30] Diehl P , Haardt H. Measurement of the spectral attenuation to support biological research in a " plankton tube " experiment [J]. Oceanol Acta , 1980 , **3** 89-96.
- [31] McCave I N. Particulate size spectra , behavior , and origin of nephloid layers over the Nova Scotia continental rise [J]. J Geophys Res , 1983 , **88** : 7647-7666.
- [32] Morel A. Diffusion de la lumiere par les eaux de mer : Resultats experimentaux et approche theorique [J]. INAGARD Lect Ser , 1973 , **61** 3. 1. 1-3. 1. 76.
- [33] Twardowski M , 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]. J Geophys Res , 2001 , **106** : 14129-14142.
- [34] Boss E , Twardowski M S , Herring S. The shape of the particulate beam attenuation spectrum and its relation to the size distribution of oceanic particles [J]. Appl Opt , 2001 , **40** 4885-4893.
- [35] Chami M , Shybanov E B , Churilova G A. Optical properties of the particles in the Crimea coastal waters (Black Sea) [J]. J Geophys Res , 2005 , **110** (C11020) : 1-17.
- [36] Ulloa O S , Sathyendranath S , Platt T. Effect of the particle size distribution on the backscattering ratio in seawater [J]. Appl Opt , 1994 , **33** : 7070-7077.
- [37] Boss E , Pegau W S. Relationship of light scattering at an angle in the backward direction to the backscattering coefficient [J]. Appl Opt , 2001 , **40** : 5503-5507.