

太湖梅梁湾夏季水体组分光谱吸收特性

孙德勇, 李云梅*, 黄家柱, 乐成峰, 龚绍琦, 伍 蓝

(南京师范大学教育部虚拟地理环境重点实验室, 江苏 南京 210097)

摘要:2006 年 8 月 16、17 日对太湖梅梁湾湖区 15 个样点水体进行采样, 利用分光光度计和定量滤膜技术测量了水体要素 *CDOM*、非藻类颗粒物和浮游植物的吸收系数, 同时进行水质参数的测定, 分别对各水体要素的光谱吸收特性进行分析, 并结合水质参数建立相应的区域模式。其中, 分 UV-C (250 ~ 290nm)、UV-B (290 ~ 320nm)、UV-A (320 ~ 400nm) 和蓝光 (400 ~ 500nm) 4 个波段建立 *CDOM* 光谱吸收的关系模式, 同时发现曲线斜率值 *S* 与 440nm 处吸收系数存在很好的二次函数关系, 在紫外和蓝光波段 R^2 分别达到 0.958 和 0.835; 总悬浮物的光谱吸收特征在不同深度处有些相近, 有些则存在明显差异, 主要是由有机和无机颗粒物剖面分布的不确定性和总悬浮物浓度所引起; 非藻类颗粒物吸收系数在 400 ~ 700nm 的指数函数拟合斜率值 *S* 的变化范围为 $0.0056 \sim 0.0090 \text{ nm}^{-1}$ (平均值 $(0.0070 \pm 0.0008) \text{ nm}^{-1}$), 各样点指数函数拟合的 R^2 在 0.91 以上。在可见光波段范围各水体要素对总吸收系数的贡献大小顺序是: 浮游植物 > 非藻类颗粒物 > *CDOM*。浮游植物在蓝、绿和红光波段的平均贡献率都在 0.5 以上, 是水体吸收的主要贡献者; 在蓝、绿和红光波段, 非藻类颗粒物的平均贡献率分别为 0.350 ± 0.145 、 0.412 ± 0.162 和 0.232 ± 0.125 , *CDOM* 的分别为 0.121 ± 0.052 、 0.088 ± 0.059 和 0.050 ± 0.038 。

关键词: *CDOM*; 非藻类颗粒物; 浮游植物; 吸收光谱; 贡献率; 太湖

文章编号: 1000-0933(2008)02-0749-12 中图分类号: P733.3.1 P734.2.3, Q178 文献标识码: A

Spectral absorption characteristics and slope coefficients analysis of in-water constituents in Meiliang Bay of Lake Taihu in the summer season

SUN De-Yong, LI Yun-Mei*, HUANG Jia-Zhu, LE Cheng-Feng, GONG Shao-Qi, WU Lan

Virtual Geographical Environment Laboratory of Ministry of Education, Nanjing Normal University, Jiangsu Nanjing 210097, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(2): 0749 ~ 0760.

Abstract: Water samples were collected at 15 well distributed sites and three depths in the Meiliang Bay of Lake Taihu on 16 and 17 August 2006. From these samples three water quality parameters (*CDOM*, detritus and phytoplankton) were determined using a photometer and the quantitative filtering technology (*QFT*). The spectral absorption characteristics of these in-water constituents were then analyzed, with regional models established for each of them. Spectral absorption models of *CDOM* were established in four bands, UV-C (250 — 290nm), UV-B (290 — 320nm), UV-A (320 — 400nm), and blue band (400 — 500nm). It was found that a close quadratic relationship exists between the slope gradient of the absorption curve *S* and absorption coefficient at 440nm. The R^2 value is as high as 0.958 and 0.835 in, respectively, the ultraviolet and blue bands. Spectral absorption curves of total suspended sediments are similar at different depths at certain sites, but vary with depth at other sites as a result of the variability in the vertical distribution of organic and inorganic matters and total suspended sediments concentrations. The slope coefficient of the regressed spectral absorption of detritus *S*

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40571110); 江苏省高校研究生创新计划资助项目(06-30)

收稿日期: 2006-11-16; 修订日期: 2007-02-01

作者简介: 孙德勇(1984 ~), 男, 黑龙江哈尔滨人, 硕士生, 主要从事水质遥感研究. E-mail: sundeyong1984@163.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: Liyunmei@njnu.edu.cn

Foundation item: The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China(No. 40571110)

Received date: 2006-11-16; **Accepted date:** 2007-02-01

Biography: SUN De-Yong, Master candidate, mainly engaged in water remote sensing. E-mail: sundeyong1984@163.com

ranges from 0.0056 to 0.0090 nm⁻¹, with a mean of (0.0070 ± 0.0008) nm⁻¹. The regression models at all sampling sites have an R^2 value over 0.91. Over the visible light spectral range, the relative contribution of all in-water constituents to total absorption has a sequence of phytoplankton > detritus > CDOM. As the main contributor, phytoplankton always contributes more than half in the blue, green and red bands, in contrast to the mean corresponding contribution rates of 0.350 ± 0.145, 0.412 ± 0.162 and 0.232 ± 0.125 for detritus. The average contribution rates for CDOM are even lower at, respectively, 0.121 ± 0.052, 0.088 ± 0.059 and 0.050 ± 0.038.

Key Words: CDOM; detritus; phytoplankton; absorption spectra; contribution rate; Lake Taihu

随着水色遥感的发展,水体生物-光学模型已经由传统的经验统计模型进入到半分析、分析模型阶段,且已经成为当前水色遥感研究的热点^[1]。半分析、分析模型方法主要是基于水体组分与固有光学特性、固有光学特性与表观光学特性之间的关系,模拟水中光场分布,进而反演水质参数^[2]。半分析、分析模型需要了解水体的固有光学特性,而水体的光谱吸收是水体固有光学特性的重要组成部分。在海洋等一类水体中,主要受浮游植物的影响;在近海和内陆湖泊等二类水体中,由于水体成分的复杂性,导致影响水体吸收因子的多样性,但主要由3类物质决定,即有色可溶性有机物(CDOM)、浮游植物和非藻类颗粒物。根据水体总吸收等于各组分吸收的线性叠加原理^[3],要了解水体的吸收特性就必须分别研究水体中各组分的光谱吸收特性。CDOM、浮游植物和非藻类颗粒物有着完全不同的光谱吸收特性,CDOM的吸收主要集中在500nm以下的蓝光和紫外光波段,且随波长的增加呈负指数衰减规律^[4~7],在500~700nm表现较弱的光谱吸收,在700nm以后逐渐趋向于零;浮游植物在可见光波段的吸收特性受藻类种群、色素细胞包裹、生长周期等多种因素的影响^[8],然而在特征波长440、675nm都存在明显的吸收峰;非藻类颗粒物有相对稳定的光谱吸收特性,它的吸收光谱与CDOM有些类似,也遵循负指数函数规律,但其主要表现在可见光波段,且吸收系数显著的小于CDOM在蓝紫光的吸收。

关于CDOM光谱吸收的研究主要集中在指数函数曲线斜率参数 S 上,Babin对亚得里亚海、地中海、波罗的海、北海和英吉利海峡水体中CDOM吸收的研究发现, S 值随不同的区域变化很小,平均值为(0.0176 ± 0.0020) nm⁻¹^[9];Markager的研究中计算得到的 S 值在0.01~0.025 nm⁻¹之间,平均值为(0.0177 ± 0.0008) nm⁻¹^[10],并与海洋中获得的 S 值比较,发现内陆淡水湖泊 S 值略高于海洋中的;Davies-Colley对12个淡水湖泊CDOM吸收的研究中发现, S 值的变化不大,平均值为0.0187 nm⁻¹^[16];俞宏以1994~1995年不同月份30次黄质水样用分光光度计进行实验测定,结果表明,30次黄质水样的 S 平均值为(0.014 ± 0.001) nm⁻¹, S 值随波长和浓度的变化不大^[12]。张运林给出了280~500nm、280~360nm、360~440nm三个波段基于最小二乘法得到的 S 值在0.010~0.025 nm⁻¹之间,并认为 S 值的变化来自于CDOM组成的差异,其值可作为区分CDOM来源和组成的参数^[13]。由前人的研究可知, S 值相对稳定,但对于不同湖泊或湖区其值又存在差异,主要原因在于不同湖泊或湖区的CDOM组成和来源不同。与此同时,不同波段范围 S 值也存在一定差异,马荣华^[14]的研究认为不同波段范围的 S 值差异较大,但相同波段范围内不同分组样点之间的 S 值差别较小,并表明通过分波段获取的 S 值具有较低误差。本文基于光谱分段获得了蓝、紫外光范围4个波段250~290nm、290~320nm、320~400nm和400~500nm处的指数函数斜率值 S ,并深入分析了不同波段 S 值的特征及相互之间的差别,同时建立了 S 值与特征波长吸收系数的关系,对CDOM光谱吸收的研究有一定意义。对于悬浮物的光谱吸收,多数研究^[9,15~17]将悬浮物分成两部分,即非藻类颗粒物和浮游植物,分别进行研究,较少对总悬浮物的光谱吸收及非藻类颗粒物和浮游植物对总悬浮物吸收的贡献进行分析,对此,本文首先从剖面差异性的角度对总悬浮物的光谱吸收特性进行分析,确定其光谱吸收类型,并阐述其原因;然后分别对非藻类颗粒物和浮游植物的光谱吸收特性进行分析,建立它们的光谱吸收模型;最后讨论了非藻类颗粒物和浮游植物对总悬浮物光谱吸收的贡献。

太湖是我国五大淡水湖之一,湖泊面积 2338.1 km^2 ,湖泊平均水深 1.9 m ,最大水深 2.6 m ,是典型的大型浅水内陆湖泊^[18]。本研究区是太湖梅梁湾,位于太湖北部,湖区面积约 132 km^2 ,处于无锡市郊的梅梁湾具有较丰富的陆源非藻类颗粒物,也是富营养化、蓝藻水华频发的湖区。由于该湖区水体组分的特殊性,造成了其复杂的光谱吸收特性,并且不同季节的水体吸收存在明显的差异,这主要是由不同季节水体组分构成及浓度的差异造成的^[12]。本研究重点针对太湖梅梁湾夏季水体,分析了水体各组分的光谱吸收特性,并建立了相应的区域模式,通过计算各组分对水体总吸收系数的贡献,从而深入认识太湖梅梁湾夏季水体的光谱吸收特性。这对内陆湖泊水质遥感方法的发展、水体浮游生物光谱吸收与生态演化过程关系的研究具有重要意义。

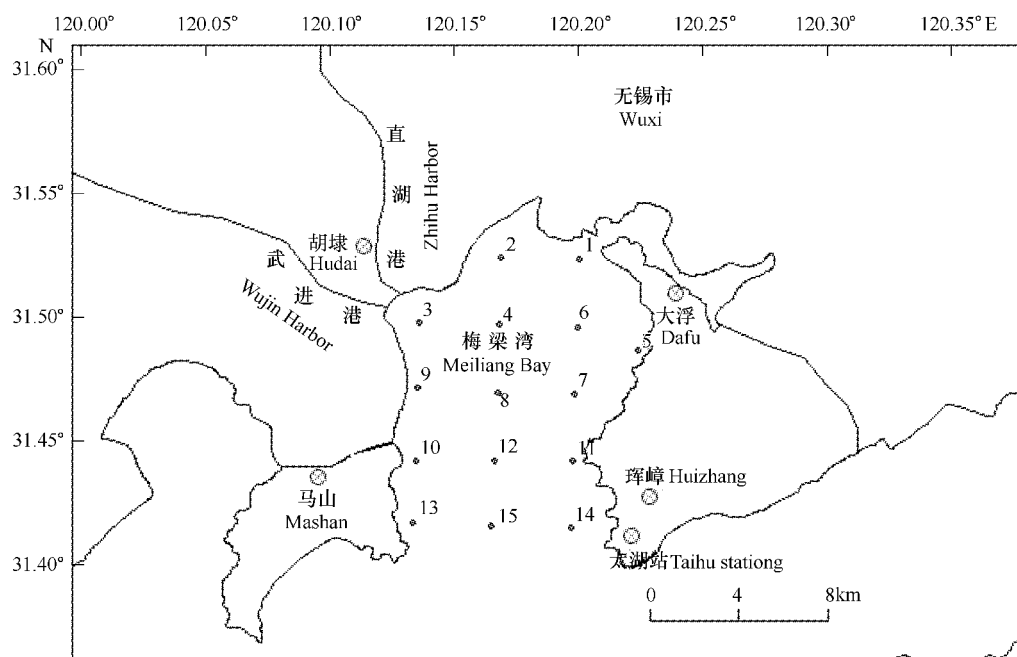


图 1 样点分布图

Fig. 1 The distribution of sample sites in the study area

1 材料与方法

1.1 采样时间与点位

2006 年 8 月 16、17 日对太湖梅梁湾湖区 15 个样点采集水样,采样深度设置为表层、50cm、100cm,样点分布见图 1。采集水样的同时,利用自动风速风向仪实时测定风速风向。采集的样品当天带回实验室进行过滤处理,测定各种水质参数。

1.2 参数的测定

测定的参数包括:总悬浮物浓度、有机颗粒物浓度、无机颗粒物浓度、总悬浮物吸收系数、黄质吸收系数、非藻类颗粒物吸收系数、浮游植物吸收系数。

总悬浮物浓度的测定使用的是 $0.45 \mu\text{m}$ 的 GF/F 滤膜,先进行烧膜处理(主要是为了去除膜上原附有的有机质,同时去除膜上的水分使膜干燥),烧完后进行冷却。将冷却后的膜进行称重,将称重好的膜用来过滤水样,量取一定体积的水样,利用过滤器进行过滤,残留在膜上的物质就是总悬浮物,再进行烘干称重,用含有总悬浮物的膜的重量减去膜重就得到了总悬浮物的重量,利用总悬浮物的重量除以水样的体积,便得到了总悬浮物浓度。

黄质吸收系数的测定使用 $0.22 \mu\text{m}$ 的 millipore 滤膜过滤上面已经过滤过总悬浮物的水样,得到黄质水样,将黄质水样放入比色皿中,利用分光光度计测量黄质的吸光度,然后利用下式计算各波长的吸收系数^[7],并做散射校正:

$$a(\lambda') = 2.303D(\lambda)/r \quad a(\lambda) = a(\lambda') - a(750)\lambda/750 \quad (1)$$

式中, $D(\lambda)$ 为吸光度, r 为光程路径(m), $a(\lambda')$ 为波长 λ 未校正的吸收系数(m^{-1}), $a(\lambda)$ 为波长 λ 的吸收系数(m^{-1})。

悬浮颗粒物的吸收采用定量滤膜技术(QFT)测定,用直径 47mm 的 GF/F 滤膜(whatman 公司)过滤 200~400ml 水样,在分光光度计下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 750nm 处吸光度为零点进行校正,总悬浮物的光谱吸收系数 $a_p(\lambda)$ 按下式计算得到:

$$a_p(\lambda) = 2.303 \frac{S}{V} OD_s(\lambda) \quad (2)$$

式中, $OD_s(\lambda)$ 为校正后的总悬浮物吸光度, V 为被过滤水样的体积, S 为滤膜上总悬浮物的有效面积。

将样品滤膜在浓度为 90% 的甲醇溶液中浸泡 4h 左右,直到把滤膜上的色素萃取掉,滤膜上剩下的是非藻类颗粒物,用同样的方法测定非藻类颗粒物的吸收系数 $a_d(\lambda)$ 。根据水体中各类物质吸收光谱的线性叠加原理,通过总悬浮物和非藻类颗粒物的光谱吸收系数计算浮游植物的光谱吸收系数 $a_{ph}(\lambda)$:

$$a_{ph}(\lambda) = a_p(\lambda) - a_d(\lambda) \quad (3)$$

对于有机颗粒物和无机颗粒物浓度采用常规的干燥、烘烧、称重的方法测定。

1.3 数据分析

对于各种水质参数的统计分析包括计算最大值、最小值、均值、标准差、线性和非线性拟合、误差分析等利用 SPSS13.0 来完成。

2 结果与分析

2.1 CDOM 吸收

有色可溶性有机物(Chromophoric Dissolved Organic Matter, CDOM),又称黄质,是溶解性有机物库的重要组成部分,普遍存在于海洋、湖泊和河流中。它由腐质酸、芳烃聚合物、碳水化合物、酚等一些列物质组成,主要是土壤和水生植物降解的产物^[9]。由于其成分的复杂性,目前尚无法确定其浓度,常用的方法是用 355nm、375nm、440nm 等波长处的吸收系数来表示 CDOM 的浓度^[4,5],吸收系数越大对应的 CDOM 浓度就越高;CDOM 是水体中重要的光衰减因子,也是生物光学模型构建的主要组成部分,其光学特性比较单一,主要表现为对光的吸收;CDOM 浓度和光学特性显著的改变了水体水色和水下光场强度的分布^[6]。

2.1.1 CDOM 的光谱吸收特性

太湖梅梁湾夏季水体 CDOM 的光谱吸收随波长的增加呈逐渐递减趋势,在部分短波紫外 UV-C 波段(250~290nm),CDOM 表现出较强的吸收特性,其吸收系数变化范围为 11.655~31.091 m^{-1} ;在中波紫外 UV-B 波段(290~320nm)吸收系数的变化范围为 5.796~17.421 m^{-1} ;在长波紫外 UV-A 波段(320~400nm)吸收系数的变化范围为 1.133~9.579 m^{-1} ;在蓝光波段(400~500nm)吸收系数的变化范围为 0.046~2.778 m^{-1} ;在大于 500nm 的波段,吸收系数继续减小并逐渐趋向于零(图 2)。由于 CDOM 吸收主要集中在 500nm 以下的蓝光及紫外光波段,因此该波段范围对 CDOM 吸收特性的研究甚为关键。国内外许多学者对 CDOM 吸收特性做了大量的研究^[7,13,14,20~22],普遍认为 CDOM 光谱吸收随波长基本上呈指数衰减规律,Bricaud^[7]对 500nm 以下 CDOM 光谱吸收提出如下关系式:

$$a(\lambda) = a(\lambda_0) \exp[S(\lambda_0 - \lambda)] \quad (4)$$

式中, $a(\lambda)$ 是 CDOM 的吸收系数(m^{-1}), λ 是波长(nm), λ_0 是参照波长(nm),一般取 440nm, S 是指数函数曲线斜率参数(m^{-1})。

图 3 给出了基于光谱分段获得的蓝光和紫外光范围 4 个波段 250~290nm、290~320、320~400 和 400~500nm 处,利用最小二乘法计算得到的指数函数斜率值 S 。同一样点在紫外光范围 3 个波段 UV-C、UV-B 和 UV-A 之间的 S 值存在一定差别,而与蓝光波段 S 值差异则更明显,各样点在紫外光波段 S 值相对稳定,在蓝光波段变化起伏较大。4 个波段 15 个采样点 S 平均值分别为 $(0.0189 \pm 0.0020) \text{nm}^{-1}$ 、 $(0.0191 \pm 0.0024) \text{nm}^{-1}$ 、

$(0.0186 \pm 0.0029) \text{ nm}^{-1}$ 、 $(0.0197 \pm 0.0064) \text{ nm}^{-1}$, 大致呈现蓝光波段高于中波紫外波段, 中波紫外波段略高于短波和长波紫外波段, 说明 *CDOM* 吸收在蓝光波段衰减得更快, 这也反映了 *S* 取值与波段选择有关, 对于在不同波段 *CDOM* 的吸收特性应有不同的 *S* 值与之对应。通过上述分析, 建立了太湖梅梁湾夏季水体 *CDOM* 在不同波段吸收特性的关系模式, 如表 1。

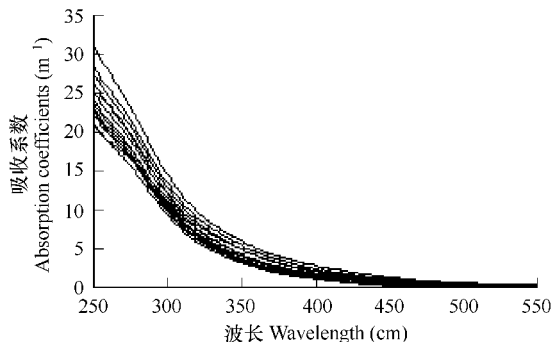


图2 太湖梅梁湾夏季水体 *CDOM* 光谱吸收曲线

Fig.2 Spectral absorption curves of *CDOM* in Meiliang bay of Taihu Lake in summer

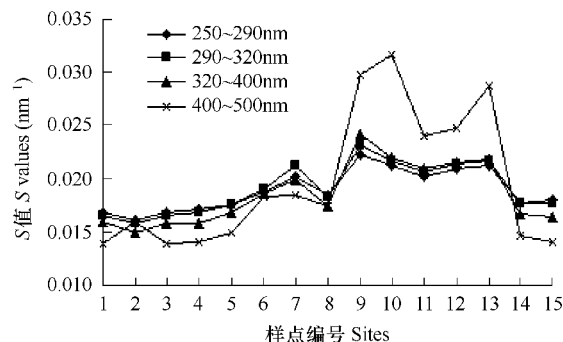


图3 各样点不同波段处的 *S* 值

Fig.3 *S* value of different bands at all sample sites

表1 太湖梅梁湾夏季水体 *CDOM* 吸收特性关系模式

Table 1 Absorption characteristic relationship model of *CDOM* in Mei Liang bay in summer

波段范围 Wave band scopes (nm)	关系模式 Relationship models
UV-C (250 ~ 290)	$a(\lambda) = a(\lambda_0) \exp[(0.0189 \pm 0.0020)(\lambda_0 - \lambda)]$
UV-B (290 ~ 320)	$a(\lambda) = a(\lambda_0) \exp[(0.0191 \pm 0.0024)(\lambda_0 - \lambda)]$
UV-A (320 ~ 400)	$a(\lambda) = a(\lambda_0) \exp[(0.0186 \pm 0.0029)(\lambda_0 - \lambda)]$
蓝光 Blue light (400 ~ 500)	$a(\lambda) = a(\lambda_0) \exp[(0.0197 \pm 0.0064)(\lambda_0 - \lambda)]$

λ_0 是参照波长, 这里取 440nm; $a(\lambda_0)$ 是 440nm 处的吸收系数

2.1.2 *S* 值与特征波长吸收系数的关系

上述分析可知 UV-C、UV-B 和 UV-A3 个波段 *S* 值的差别不大, 因此将 3 个子紫外波段 *S* 取均值作为紫外波段 *S* 值。参考波长选择 440nm, 并分析其与紫外(250 ~ 400nm)和蓝光波段(400 ~ 500nm) *S* 值的关系, 发现特征波长 440nm 处的吸收系数与 *S* 值存在很好的二次函数关系, 如表 2 所示。

表2 特征波长 440nm 吸收系数与 *S* 值的关系

Table 2 The relationship between *s* and absorption coefficients at 440nm

波段范围 Wave band scopes	关系式 Relationship models	R^2	F	P
紫外波段 Ultraviolet band (250 ~ 400nm)	$S = (0.029 \pm 0.001) + (-0.019 \pm 0.002)a(440) + (0.007 \pm 0.001)(a(440))^2$	0.958	135.816	0.0001
蓝光波段 Blue band (400 ~ 500nm)	$S = (0.051 \pm 0.005) + (-0.063 \pm 0.012)a(440) + (0.027 \pm 0.006)(a(440))^2$	0.835	30.346	0.0001

2.2 悬浮颗粒物的吸收

2.2.1 总悬浮物光谱吸收特性分析

水体中悬浮颗粒物是指悬浮于水中的一切有机的和无机的颗粒, 它没有固定的组成, 对于不同水体组成差别很大, 对于海洋中的悬浮物其组成多以浮游植物及其降解物为主; 而对于内陆湖泊, 其组成较海洋复杂, 不但包括浮游植物及其残体, 还包括许多陆源无机及有机物。悬浮物是水体的重要组成, 同时也是影响水体光学特性的重要因子, 一般对悬浮物进行的研究都将其分为两部分: 一部分是藻类颗粒物, 主要是浮游植物及一些微生物, 它通过色素完成对光能的吸收以进行光合作用, 因此藻类颗粒物的吸收特性能反映水体的初级

生产力水平;另一部分是非藻类颗粒物,它包含藻类颗粒物分解的残体、无机颗粒物及其它碎屑等。由于藻类颗粒物和浮游非藻类颗粒物有着完全不同的光谱吸收特性,因此总悬浮颗粒物的光谱吸收综合了二者的特征,表现出3种类型:①与藻类颗粒物吸收光谱相似;②与非藻类颗粒物吸收光谱相似;③即不类似藻类颗粒物吸收光谱,也不类似非藻类颗粒物吸收光谱;3种类型总悬浮颗粒物在675nm都出现吸收峰值^[15]。2006年8月16、17日对太湖梅梁湾水体的3个深度(表层、50、100cm)取样,带回实验室测定吸光度计算总悬浮物的吸收系数,总结分析其光谱吸收特征,分两种情况:吸收光谱剖面相近型和吸收光谱剖面差异型。

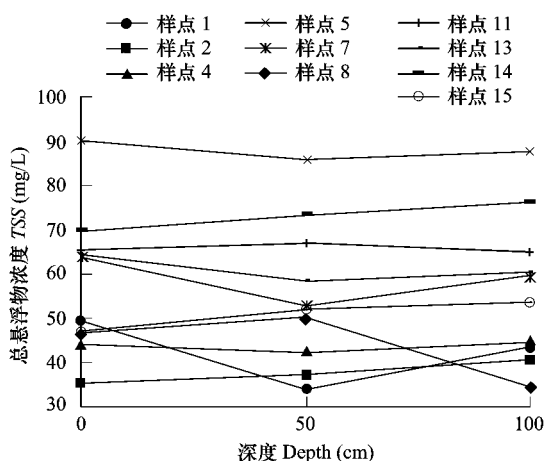


图5 10个样点不同深度的总悬浮物浓度变化

Fig. 5 Concentration variability of total suspended sediment at different depths about 10 samples

(1) 吸收光谱剖面相近型

在15个采样点中,有10个样点在剖面3个深度的光谱吸收曲线较为相近,甚至有的近似一条曲线,如图4。对比10个样点3个深度的总悬浮物浓度,其浓度数值相差不大(图5),最大浓度差在样点8处水下50cm和100cm之间,差值为15.87mg/L,其余浓度差多在5mg/L以下,可知不同深度的总悬浮物吸收光谱与总悬浮物浓度能较好的匹配。在水样采集的同时测定风速,10个样点的风速都在4m/s左右,属于中风浪,对湖水有一定的扰动作用,这可能是3个深度湖水中总悬浮物浓度相差不大的主要原因,进而反映在3个深度总悬浮物吸收光谱曲线较为相近。分别对10个样点3个不同深度总悬浮物吸收系数取均值以表示各样点处的总悬浮物吸收,分析其光谱特征,可知10个样点处总悬浮物的光谱吸收属于②、③类型(图6),光谱曲线在675nm有明显峰值,主要是藻类颗粒物在此波段的特征吸收所致;而在另一个藻类颗粒物特征吸收波段440nm处峰值并不明显,主要是因为非藻类颗粒物在此波段有较强的吸收特征,且藻类颗粒物在总悬浮物成分中没有占有绝对优势,其吸收特征淹没在非藻类颗粒物之中;此外,对总悬浮颗粒物TSS、无机颗粒物ISS和有机颗粒物OSS浓度进行相关分析,结果表明,TSS与ISS存在高度正相关,相关系数达0.91,而与OSS则不存在相关性,可知多数样点是无机颗粒物主导着总悬浮物的浓度,所以总悬浮物的吸收光谱更多的表现了无机颗粒物的吸收特征。对于大型内陆浅水湖泊无机颗粒物主要以悬浮泥沙、风浪扰动起的底泥悬浮物等非藻类颗粒物为主,进而验证了该10个样点的总悬浮物光谱吸收属于②、③类型、非藻类颗粒物为主要吸收贡献

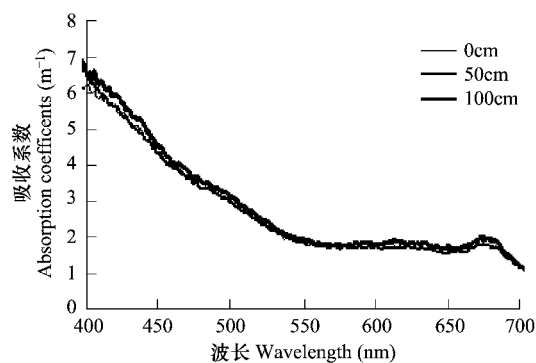


图4 样点13处不同深度的总悬浮物光谱吸收曲线

Fig. 4 Spectral absorption curves at different depths at sample 13

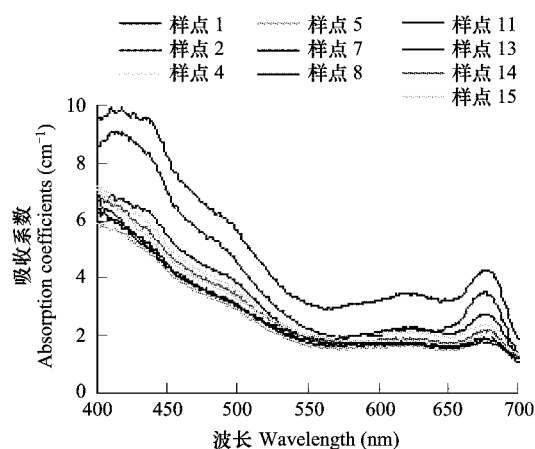


图6 10个样点处总悬浮物的光谱吸收曲线

Fig. 6 Spectral absorption curves of total suspended sediment about 10 samples

的说法。总悬浮物在 675nm 波段吸收系数的变化范围为 $1.60 \sim 4.58\text{m}^{-1}$ (平均值 $(2.46 \pm 0.82)\text{m}^{-1}$), 它与总悬浮颗粒物浓度、有机颗粒物浓度和无机颗粒物浓度的线性回归关系见表 3, 可知 675nm 的总悬浮物吸收系数与总悬浮物浓度和有机颗粒物浓度存在弱线性相关性, 而与无机颗粒物浓度则存在一定的负相关关系, 这主要是由于水体中高浓度无机颗粒物的影响, 并说明无机颗粒物浓度越高, 藻类吸收特征波长处的总悬浮物光谱吸收峰越模糊。

表 3 总悬浮物 675nm 处的吸收系数与 TSS、OSS、ISS 浓度的线性回归 ($N=30$)

分析参数 Analytical coefficients	回归关系式 Regression relationships	P	R^2
总悬浮颗粒物浓度 TSS	$a(675) = (-0.034 \pm 0.007) \text{TSS} + (4.355 \pm 0.437)$	≤ 0.0001	0.421
有机悬浮颗粒物浓度 OSS	$a(675) = (0.075 \pm 0.015) \text{OSS} + (0.715 \pm 0.378)$	≤ 0.0001	0.454
无机悬浮颗粒物浓度 ISS	$a(675) = (-0.041 \pm 0.004) \text{ISS} + (3.827 \pm 0.159)$	≤ 0.0001	0.770

(2) 吸收光谱剖面差异型

其余 5 个样点在剖面 3 个深度的吸收光谱存在较大差异, 样点 6、9 和 12 表层水体总悬浮物的吸收光谱呈明显的藻类颗粒物吸收光谱特征 (图 7), 属于①类型, 而 50cm 和 100cm 则呈非藻类颗粒物光谱吸收特征, 图 8 显示了样点 12 三个深度总悬浮物光谱吸收曲线, 可见其差异明显; 样点 3 和 10 各层面总悬浮物吸收光谱属于②类型, 但其数值相差较大, 主要是由于总悬浮物浓度在剖面分布上的差异。5 个样点处实时测定的风速在 2m/s 左右, 属于较小风浪。可知, 对于风浪较小的夏季太湖梅梁湾水体, 不同剖面的总悬浮物吸收系数存在显著差别, 原因在于大量繁殖的藻类在小风浪情况下多漂浮在湖体表层, 使得表层水体与中层水体的悬浮物表现出不同的光谱吸收特性, 而在非藻类大量繁殖区域主要由于总悬浮物浓度剖面分布上的差异。

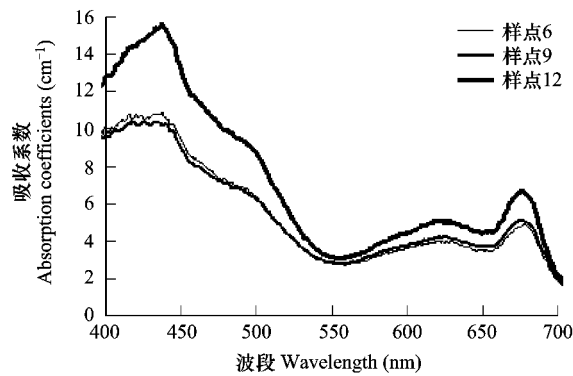


图 7 样点 6、9 和样点 12 表层水体总悬浮物的吸收光谱
Fig. 7 Absorption spectra at water surface of total suspended sediment at sample 6、9、12

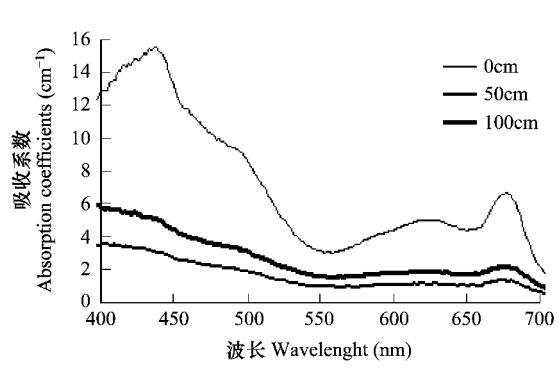


图 8 样点 12 剖面 3 个深度总悬浮物的吸收光谱
Fig. 8 Absorption spectra at three depths of total suspended sediment at sample 12

2.2.2 非藻类颗粒物光谱吸收特性及参数化

图 9 显示了太湖梅梁湾夏季水体中非藻类颗粒物典型的吸收光谱, 其光谱吸收系数随波长的增大而减小, 其变化遵循着较强的指数衰减规律^[23]:

$$a_d(\lambda) = a_d(\lambda_0) \exp[s(\lambda_0 - \lambda)] \tag{5}$$

式中, $a_d(\lambda)$ 是 λ 波长处非藻类颗粒物吸收系数; $a_d(\lambda_0)$ 是参考波长处非藻类颗粒物吸收系数, 参考波长 λ_0 取 440nm ; s 是指数函数经验斜率值。参考波长 440nm 处非藻类颗粒物吸收系数的变化范围 $0.87 \sim 3.50\text{m}^{-1}$ (平均值 $(2.26 \pm 0.72)\text{m}^{-1}$)。利用上述公式对所有样点的非藻类颗粒物吸收系数在 $400 \sim 700\text{nm}$ 进行指数拟合, 得到 S 值的变化范围为 $0.0056 \sim 0.0090\text{nm}^{-1}$ (平均值 $(0.0070 \pm 0.0008)\text{nm}^{-1}$), 各样点指数函数拟合的 R^2 都在 0.91 以上。与现有报道相比, 低于许晓强报道的珠江口的值 (S 的变化范围是 $0.008 \sim 0.017\text{nm}^{-1}$)

(平均值 $(0.011 \pm 0.0019) \text{ nm}^{-1}$)^[16]; 低于张运林的研究结果(S 的变化范围是 $0.0079 \sim 0.0125 \text{ nm}^{-1}$ (平均值 $(0.0101 \pm 0.0010) \text{ nm}^{-1}$)^[15]; 低于 Bricaud 报道的一类水体的 S 值^[23]; 也低于 Babin 的研究结果(S 的变化范围是 $0.0116 \sim 0.0130 \text{ nm}^{-1}$)^[9]。可见,太湖梅梁湾夏季水体中的非藻类颗粒物的光谱吸收参数 S 值低于现有的报道,可能是由于水体中非藻类颗粒物的组成不同造成的。由此得到太湖梅梁湾夏季水体非藻类颗粒物吸收系数随波长变化的关系模式:

$$a_d(\lambda) = (2.26 + 0.72)e^{(0.0070 \pm 0.0008)(440 - \lambda)} \quad (R^2 \geq 0.91) \tag{6}$$

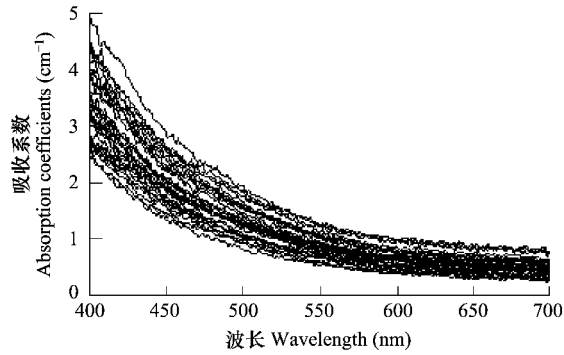


图9 太湖梅梁湾夏季水体非藻类颗粒物的吸收光谱
Fig. 9 Absorption spectra of detritus in Meiliang bay of Taihu Lake in summer

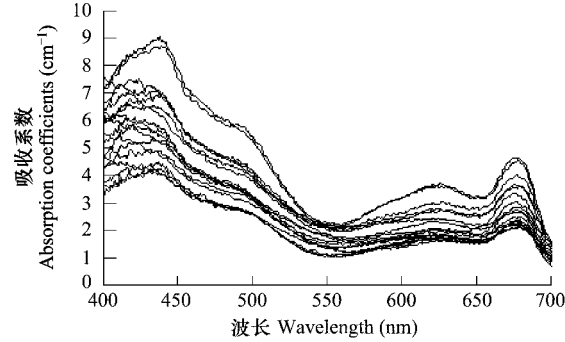


图10 太湖梅梁湾夏季水体浮游植物的吸收光谱
Fig. 10 Absorption spectra of phytoplankton in Meiliang bay of Taihu Lake in summer

2.2.3 浮游植物的光谱吸收

太湖梅梁湾夏季水体浮游植物的吸收光谱在 440、675nm 附近有两个特征吸收峰,其变化范围分别为 $1.25 \sim 14.41 \text{ m}^{-1}$ (平均值 $(4.00 \pm 2.53) \text{ m}^{-1}$) 和 $0.70 \sim 6.43 \text{ m}^{-1}$ (平均值 $(2.08 \pm 1.17) \text{ m}^{-1}$) (图 10)。这是由浮游植物中色素(叶绿素 a 为主)吸收所引起,因此,许多研究中常用这两个波长处的吸收系数与叶绿素 a 浓度建立统计经验关系,作为生物-光学模型的重要部分^[24,25]。就浮游植物的光谱吸收曲线来说,吸收系数的波段关系能反映光谱曲线的变化特征。本文选取 675nm 为参考波长,综合分析各种拟合关系式后,认为采用三阶函数拟合不同波长与参考波长吸收系数之间的关系效果最佳,拟合公式如式(7):

$$a_{ph}(\lambda) = A + Ba_{ph}(675) + Ca_{ph}(675)^2 + Da_{ph}(675)^3 \tag{7}$$

式中, A 、 B 、 C 、 D 是与波长有关的经验系数,具体数值见表 4。

2.2.4 非藻类颗粒物和浮游植物对总悬浮物吸收系数的贡献

分别利用浮游植物和非藻类颗粒物吸收系数与总悬浮物吸收系数的比值表示它们对总悬浮物吸收的贡献率。图 11(a) 和 11(b) 分别显示了各样点浮游植物和非藻类颗粒物在特征波长 440、675nm 处对总悬浮物的吸收贡献。由图可知,多数样点浮游植物对总悬浮物的吸收贡献大于非藻类颗粒物的贡献。在短波 440nm 处,浮游植物贡献率的最小值为 0.26,最大值为 0.94,平均贡献率为 0.598,标准偏差为 0.172;非藻类颗粒物贡献率的最小值为 0.06,最大值为 0.74,平均贡献率为 0.402,标准偏差为 0.172。在长波 675nm 处,浮游植物贡献率的最小值为 0.44,最大值为 0.97,平均贡献率为 0.755,标准偏差为 0.132;非藻类颗粒物贡献率的最小值为 0.03,最大值为 0.56,平均贡献率为 0.245,标准偏差为 0.132。就浮游植物和非藻类颗粒物的平均吸收贡献率来说,在短波和长波

表 4 浮游植物不同波长吸收系数与参考波长关系的经验系数值
Table 4 Experience values of A, B, C, D in formula 7 at different bands

波长 Wavelength (nm)	A	B	C	D	R^2
412	-2.365	4.838	-0.961	0.089	0.922
443	-1.545	3.718	-0.650	0.070	0.977
490	-0.945	2.478	-0.422	0.043	0.978
510	-0.748	1.995	-0.344	0.034	0.967
555	-0.327	1.024	-0.150	0.010	0.863
670	-0.033	0.993	-0.013	0.001	0.999

端,浮游植物均大于非藻类颗粒物,但长波端的差异较短波端更为明显,平均贡献率差异分别为 0.510 和 0.196。由此可知,浮游植物对总悬浮物吸收系数在长波端有更大贡献,原因在于浮游植物色素在长波端有特征吸收作用,而非藻类颗粒物长波端处于较低的吸收;在短波端,虽然浮游植物也有特征吸收,但非藻类颗粒物在此波段吸收较大,因此,浮游植物和非藻类颗粒物对总悬浮物的吸收贡献在短波端差异不明显。

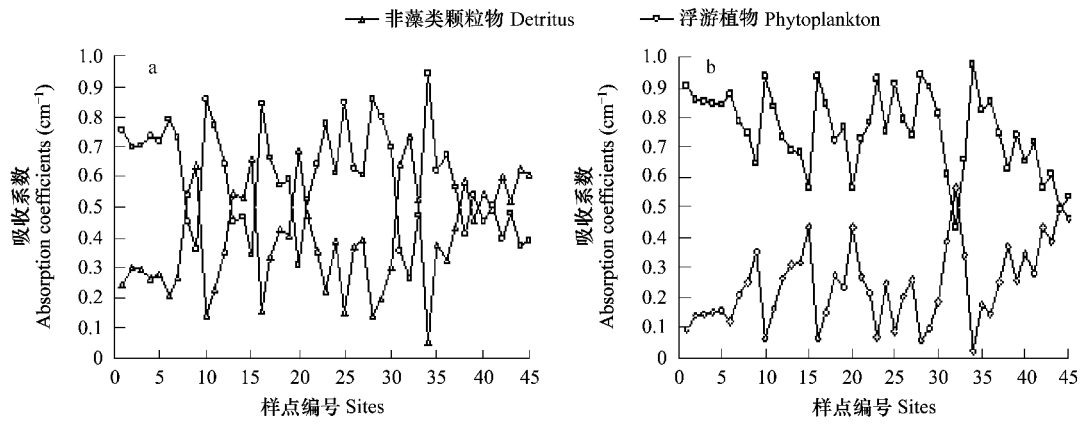


图 11 浮游植物和非藻类颗粒物在 440、675nm 处对总悬浮物的吸收贡献率
Fig. 11 Absorption contribution of phytoplankton and detritus to total suspended sediments at 440nm and 675nm

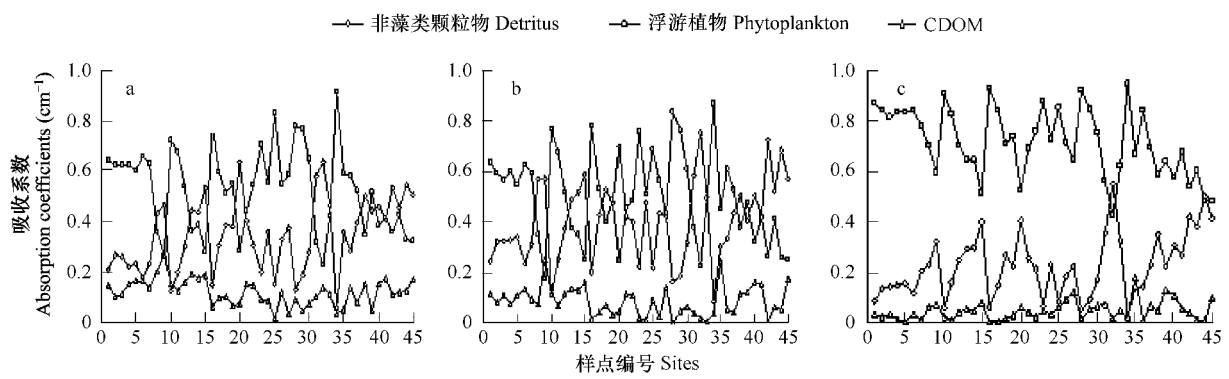


图 12 水体中各组分在蓝、绿、红光波段对总吸收系数的贡献率
Fig. 12 Absorption contributions of all components to total absorption coefficient at blue, green and red bands

表 5 水体中各组分对水体总吸收贡献率的统计分析

Table 5 Statistic analysis about absorption contributions of all components to total absorption coefficient

水体组分 Water components	非藻类颗粒物 Detritus			浮游植物 Phytoplankton			CDOM		
波段 Wave band (nm)	440	550	675	440	550	675	440	550	675
最小贡献率 Minimum contribution	0.06	0.09	0.02	0.23	0.17	0.43	0.02	0.01	0.01
最大贡献率 Maximum contribution	0.64	0.75	0.55	0.91	0.87	0.95	0.27	0.25	0.18
平均贡献率 Average contribution	0.350	0.412	0.232	0.530	0.501	0.719	0.121	0.088	0.050
标准差 Standard deviation	0.145	0.162	0.125	0.167	0.174	0.135	0.052	0.059	0.038

2.3 各组分对水体总吸收系数的贡献

本文分析了水体中各组分在可见光范围内对水体总吸收系数的贡献。由于纯水有确定的吸收系数,详见参考文献^[1],因此,影响各样点吸收的主要是水体三要素,在此,利用 CDOM、非藻类颗粒物和浮游植物吸收系数之和作为水体总吸收系数加以分析。分蓝、绿和红 3 个波段考察,选择的中心波长分别为 440、550nm 和 675nm,并以各组分吸收系数与水体总吸收系数的比值代表各组分的贡献率。水体总吸收系数在蓝光波段的

变化范围为 $3.21 \sim 15.79 \text{ m}^{-1}$ (均值为 $(7.086 \pm 2.324) \text{ m}^{-1}$); 在绿光波段变化范围为 $1.16 \sim 3.56 \text{ m}^{-1}$ (均值为 $(2.258 \pm 0.548) \text{ m}^{-1}$); 在红光波段变化范围为 $1.52 \sim 6.79 \text{ m}^{-1}$ (均值为 $(2.756 \pm 1.091) \text{ m}^{-1}$)。图 12(a)、12(b)、12(c) 显示了各样点处水体中各组分分别在蓝光、绿光和红光波段对总吸收系数的贡献率。由图可知, 在可见光波段范围水体各组分对总吸收系数贡献大小顺序是: 浮游植物贡献最大、非藻类颗粒物次之、*CDOM* 贡献最小。表 5 给出了各水体组分对总吸收贡献率的统计分析结果, 可知浮游植物在蓝、绿、红光波段的平均贡献率都在 0.5 以上, 其中对红光波段贡献最大, 达到 0.719 ± 0.135 , 表明浮游植物是水体吸收的主要贡献者; 非藻类颗粒物在绿光波段的平均贡献率略高于蓝光和红光波段, 蓝、绿、红光波段平均贡献率分别为 0.350 ± 0.145 、 0.412 ± 0.162 、 0.232 ± 0.125 。*CDOM* 在 3 个波段都是最小的吸收贡献率, 在蓝、绿、红光波段的吸收贡献率范围分别为 $0.02 \sim 0.27$ (均值为 0.121 ± 0.052)、 $0.01 \sim 0.25$ (均值为 0.088 ± 0.059)、 $0.01 \sim 0.18$ (均值为 0.050 ± 0.038)。

3 结论

(1) 由于 *CDOM* 吸收主要集中在 500nm 以下的蓝光及紫外光波段, 因此该波段范围对 *CDOM* 吸收特性的研究甚为关键。分 UV-C(250 ~ 290nm)、UV-B(290 ~ 320nm)、UV-A(320 ~ 400nm) 和蓝光(400 ~ 500nm) 4 个波段考察其吸收特性, *CDOM* 吸收系数的变化范围分别为 $11.655 \sim 31.091 \text{ m}^{-1}$ 、 $5.796 \sim 17.421 \text{ m}^{-1}$ 、 $1.133 \sim 9.579 \text{ m}^{-1}$ 、 $0.046 \sim 2.778 \text{ m}^{-1}$; 同一样点在紫外光范围 3 个波段 UV-C、UV-B 和 UV-A 之间的指数函数曲线斜率值 S 存在一定差别, 而与蓝光波段 S 值差异则更明显, 各样点在紫外光波段 S 值相对稳定, 在蓝光波段变化起伏较大。4 个波段 S 平均值分别为 $(0.0189 \pm 0.0020) \text{ nm}^{-1}$ 、 $(0.0191 \pm 0.0024) \text{ nm}^{-1}$ 、 $(0.0186 \pm 0.0029) \text{ nm}^{-1}$ 、 $(0.0197 \pm 0.0064) \text{ nm}^{-1}$, 大致呈现蓝光波段高于中波紫外波段, 中波紫外波段略高于短波和长波紫外波段, 说明 *CDOM* 吸收在蓝光波段衰减得更快, 这也反映了 S 取值与波段选择有关, 对于在不同波段 *CDOM* 的吸收特性应有不同的 S 值与之对应。同时发现特征波长 440nm 处的吸收系数与 S 值存在很好的二次函数关系。

(2) 总悬浮物的光谱吸收特征在不同深度处有些相近, 有些则存在明显差异, 主要是由有机和无机颗粒物剖面分布的不确定性和总悬浮物浓度所引起的。

(3) 非藻类颗粒物的光谱吸收系数随波长的增大而减小, 其变化遵循着较强的指数衰减规律。参考波长 440nm 处非藻类颗粒物吸收系数的变化范围为 $0.87 \sim 3.50 \text{ m}^{-1}$ (平均值 $(2.26 \pm 0.72) \text{ m}^{-1}$); S 值的变化范围为 $0.0056 \sim 0.0090 \text{ nm}^{-1}$ (平均值 $(0.0070 \pm 0.0008) \text{ nm}^{-1}$); 各样点指数函数拟合的 R^2 都在 0.91 以上。

(4) 浮游植物的光谱吸收特征可以通过浮游植物吸收系数的波段关系加以分析, 选择 675nm 为参考波长, 采用三阶函数建立波段关系的拟合效果最好。

(5) 浮游植物和非藻类颗粒物对总悬浮物吸收系数的平均贡献率, 在短波 440nm 处, 分别为 0.598 ± 0.172 和 0.402 ± 0.172 ; 在长波 675nm 处, 分别为 0.755 ± 0.132 和 0.245 ± 0.132 。可知, 浮游植物对总悬浮物吸收系数在长波端有更大贡献, 原因在于浮游植物色素在长波端有特征吸收作用, 而非藻类颗粒物长波端处于较低的吸收; 在短波端, 虽然浮游植物也有特征吸收, 但非藻类颗粒物在此波段吸收较大, 因此, 浮游植物和非藻类颗粒物对总悬浮物的吸收贡献在短波端差异不明显。

(6) 在可见光波段范围各水体要素对总吸收系数的贡献大小顺序是: 浮游植物 > 非藻类颗粒物 > *CDOM*。浮游植物在蓝、绿和红光波段的平均贡献率都在 0.5 以上, 是水体吸收的主要贡献者; 在蓝、绿和红光波段, 非藻类颗粒物的平均贡献率分别为 0.350 ± 0.145 、 0.412 ± 0.162 和 0.232 ± 0.125 , *CDOM* 的分别为 0.121 ± 0.052 、 0.088 ± 0.059 和 0.050 ± 0.038 。

References:

- [1] Scott Pegau J. Ronald V. Zaneveld B. Gregg Mitchell, et al. Ocean Optics Protocols For Satellite Ocean Color Sensor Validation, Revision 4. Maryland: Goddard Space Flight Space Center, 2002.

- [2] Forget P, Ouillon S, Lahet F, *et al.* Inversion of reflectance spectra of nonchlorophyllous turbid coastal waters. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 68: 261 — 272.
- [3] Shubha Sathyendranath. Remote sensing of ocean colour in coastal, and other optically-complex, waters. IOCCG Report: No. 3. Canada: International Ocean-Colour Coordinating Group, 2000.
- [4] Stedmon C A, Markager S, Kaas H. Optical properties and signatures of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in Danish coastal waters. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2000, 51(2): 267 — 278.
- [5] Del Castillo C E, Coble P G. Seasonal variability of the colored dissolved organic matter during the 1994-95 NE and SW Monsoons in the Arabian Sea. *Deep-Sea Research II*, 2000, 47: 1563 — 1579.
- [6] Zhang Y L, Wu S C, Qin B Q, *et al.* Absorption of light by chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in Meiliang Bay of Taihu Lake. *China Environmental Science*, 2004, 24(4): 405 ~ 409.
- [7] Bricaud A, Morel A, Prieur L. Absorption by dissolved organic matter in the sea (yellow substance) in the UV and visible domain. *Limnol and Oceanogr*, 1981, 26: 43 — 53.
- [8] Giotti A M, Lewis M R, Cullen J J. Assessment of the relationships between dominant cell size in natural phytoplankton communities and the spectral shape of the absorption coefficient. *Limnol and Oceanogr*, 2002, 47: 404 — 417.
- [9] Babin M, Stramski D, *et al.* Variations in the light absorption coefficients of phytoplankton, nonalgal particles, and dissolved organic matter in coastal waters around Europe. *J. Geophys. Res.*, 2003, 108(C7), 3211, doi:10.1029/2001JC000882.
- [10] Markager W, Vincent W F. Spectral light attenuation and absorption of UV and blue light in natural waters. *Limnol and Oceanogr*, 2000, 45(3): 642 — 650.
- [11] Davis-colley R J. Absorption of light by yellow substance in freshwater lakes. *Limnol and Oceanogr*, 1983, 32(2): 416 — 425.
- [12] Yu H, Cai Q M, Wu J L. Study on characteristic of the absorption and scattering coefficients of Taihu Lake waters. *Advance In Water Science*, 2003, 14(1): 46 — 49.
- [13] Zhang Y L, Qin B Q, Ma R H, *et al.* Chromophoric dissolved organic matter absorption characteristics with relation to fluorescence in typical macrophyte, algae lake zones of Lake Taihu. *Environmental Science*, 2005, 26(2): 142 — 147.
- [14] Ma R H, Dai J F, Zhang Y L. Influence factors and slope coefficients of spectral absorption of colored dissolved organic matter (CDOM) in East Taihu Lake. *Lake Science*, 2005, 17(2): 120 — 126.
- [15] Zhang Y L. Biological-optical properties of Lake Taihu and its eco-environment significance. *The Institute of Geography and Lake in NanJing, CAS*, 2005, 5.
- [16] Xu X Q, Cao W X, Yang Y Z. Relationships between spectral absorption coefficient of particulates and salinity and chlorophyll a concentration in Zhu Jiang River Mouth. *Journal of Tropical Oceanography*, 2004, 23(5): 63 — 71.
- [17] Cao W X, Yang Y Z, Xu X Q, *et al.* Spectral absorption of suspended particulates and its regional relationship models in Zhu Jiang River Mouth. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(17): 1876 — 1882.
- [18] Qin B Q, Hu W P, Chen W M, *et al.* The process and mechanism of water environment evolvement in Taihu Lake. Beijing: Science Press, 2004.
- [19] Kirk J T O, 1994. Light and photosynthesis in aquatic ecosystem. Cambridge: Cambridge University Press, Britain, 1994.
- [20] Yu Hong, Cai Q M, Wu J L. Study on optical properties of unpigmented suspended particles, yellow substance and phytoplankton algae in taihu lake. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2004, 22(1): 24 — 33.
- [21] Li T J, Zhu J H, Chen Q L. Semi-empirical analysis bio-optical algorithm research of yellow-east sea in spring. *Ocean Technology*, 2006, 25(1): 83 — 88.
- [22] Zhang Y L, Qin B Q, Yang L Y. Spatial distribution and absorption characteristics with relation to fluorescence of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in Meiliang Bay of Lake Taihu. *Lake Science*, 2006, 18(4): 319 — 326.
- [23] Bricaud A, Morel A, Babin M, *et al.* Variations of light absorption by suspended particles with chlorophyll a concentration in oceanic (case 1) waters: analysis and implications for bio-optical models. *J. Geophys. Res.*, 1998, 103: 31033 — 31044.
- [24] Zhu J H, Li T J. Relationship research of phytoplankton pigments absorption and chlorophyll a concentraton in the East China Sea and Yellow Sea. *Ocean Technology*, 2004, 23(4): 117 — 122.

- [25] Qiu Z F, Xi H Y, He Y J. Semi-analysis algorithm to retrieve pigment concentration in the red tide area of the East China Sea. *Environmental Science*, 2006, 27 (8): 1516 – 1521.

参考文献:

- [6] 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. *中国环境科学*, 2004, 24(4): 405 ~ 409.
- [12] 俞 宏, 蔡启铭, 吴敬禄. 太湖水体吸收系数与散射系数的特征研究. *水科学进展*, 2003, 14(1): 46 ~ 49.
- [13] 张运林, 秦伯强, 马荣华, 等. 太湖典型草、藻型湖区有色可溶性有机物的吸收及荧光特性. *环境科学*, 2005, 26(2): 142 ~ 147.
- [14] 马荣华, 戴锦芳, 张运林. 东太湖 CDOM 吸收光谱的影响因素与参数确定. *湖泊科学*, 2005, 17(2): 120 ~ 126.
- [15] 张运林. 太湖水体生物——光学特性及其生态学意义. 中国科学院研究生院博士论文. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 2005. 5.
- [16] 许晓强, 曹文熙, 杨跃忠. 珠江口颗粒物吸收系数与盐度及叶绿素 a 浓度的关系. *热带海洋学报*, 2004, 23(5): 63 ~ 71.
- [17] 曹文熙, 杨跃忠, 许晓强, 等. 珠江口悬浮颗粒物的吸收光谱及其区域模式. *科学通报*, 2003, 48(17): 1876 ~ 1882.
- [18] 秦伯强, 胡维平, 陈伟民编著. 太湖水环境演化过程与机理. 北京: 科学出版社, 2004.
- [21] 李铜基, 朱建华, 陈清莲. 黄东海海区春季半经验分析生物-光学算法研究. *海洋技术*, 2006, 25(1): 83 ~ 88.
- [22] 张运林, 秦伯强, 杨龙元. 太湖梅梁湾有色可溶性有机物的空间分布及光学行为. *湖泊科学*, 2006, 18(4): 319 ~ 326.
- [24] 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. *海洋技术*, 2004, 23(4): 117 ~ 122.
- [25] 丘仲锋, 席红艳, 何宜军. 东海赤潮高发区半分析算法色素浓度反演. *环境科学*, 2006, 27(8): 1516 ~ 1521.