

太湖梅梁湾水体悬浮颗粒物和 CDOM 的吸收特性

张运林, 秦伯强*, 杨龙元

(中国科学院南京地理与湖泊研究所, 江苏南京 210008)

摘要: 通过测定滤膜上悬浮颗粒物和过滤液中 CDOM 吸光度的方法计算得到太湖梅梁湾总颗粒物和 CDOM 的光谱吸收系数, 并计算了各吸收组份的贡献份额以及吸收与 PAR 衰减的比值。总颗粒物的吸收系数从 400 nm 到 600 nm 大致呈下降趋势, 到 675 nm 附近由于叶绿素 a 的特征吸收会出现明显峰值, 峰值高低随叶绿素 a 浓度的变化而变化, $a_p(440)$ 在 $3.58 \sim 9.86 \text{ m}^{-1}$ 间变化。非藻类颗粒物和 CDOM 的吸收随波长增加大致按指数规律下降, $a_d(440)$ 和 $a_g(440)$ 的变化范围分别为 $2.23 \sim 7.07 \text{ m}^{-1}$ 和 $1.06 \sim 1.70 \text{ m}^{-1}$ 。非藻类颗粒物在 400 ~ 700 nm 波段的指数函数斜率 S_d 的平均值为 $(10.91 \pm 0.62) \mu\text{m}^{-1}$; CDOM 在 280 ~ 500 nm 波段指数函数斜率 S_g 的平均值为 $(15.52 \pm 0.49) \mu\text{m}^{-1}$ 。浮游藻类的光谱吸收表现为在 440、675 nm 附近存在两个明显的峰值, 分别为 $(2.55 \pm 1.14) \text{ m}^{-1}$ 、 $(1.34 \pm 0.69) \text{ m}^{-1}$ 。 $a_p(440)$ 与 TSS、OSS、ISS 均存在显著性正相关, 而 $a_d(440)$ 则只与 TSS、ISS 有显著性相关, $a_{ph}(440)$ 只与 OSS、Chla 有显著性相关。CDOM 吸收系数与 DOC 浓度没有显著正相关, 但与 Chla 存在显著幂函数关系, 浮游藻类降解产物是水体中 CDOM 的重要来源之一。水体中物质吸收主要以颗粒物为主, 对总吸收的贡献率在 70% 以上, 而颗粒物中又以非藻类颗粒物占主导, 一般超过 40%, 总吸收对漫射衰减的贡献也在 40% 以上。

关键词: 梅梁湾; 非藻类颗粒物; 浮游藻类; 有色可溶性有机物; 叶绿素 a; 吸收光谱

文章编号: 1000-0933(2006)12-3969-11 中图分类号: P343.3 文献标识码: A

Spectral absorption coefficients of particulate matter and chromophoric dissolved organic matter in Meiliang Bay of Lake Taihu

ZHANG Yun-Lin, QIN Bo-Qiang*, YANG Long-Yuan (Nanjing Institute of Geography & Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China). Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(12): 3969 ~ 3979.

Abstract: Light absorption is an inherent optical property, which determines the transmission and distribution of underwater light. Knowledge about the inherent and apparent optical properties of water is very important for the development of bio-optical algorithms for remote sensing, and of bio-optical models for estimation of primary production as well as ecological restoration of eutrophic water bodies. In shallow eutrophic lakes, phytoplankton blooms and continuous sediment resuspension by benthivorous fish and wind lower the underwater light, which results in loss of submerged vegetation. The light absorption properties of an aquatic medium are characterized by the medium's absorption coefficient. The total absorption coefficient $a(\lambda)$ includes the coefficients for total particulate matter (phytoplankton and nonalgal particulates) $a_p(\lambda)$, chromophoric dissolved organic matter (CDOM) $a_g(\lambda)$ and pure water $a_w(\lambda)$. Phytoplankton absorption influences the maximum photosynthetic rate as well as the rate of photosynthesis integrated over depth. CDOM limits the penetration of biologically damaging UV-B radiation (280 ~ 320 nm) in the water column, thus shielding aquatic organisms by its strong absorption in the UV spectral range. Absorption of nonalgal particles and CDOM often disturb the remote sensing of the biomass and primary production of phytoplankton. The present study

基金项目: 中国科学院知识创新工程资助项目(KZCX3-SW-334, KZCX3-SW-350); 国家自然科学基金资助项目(40601099, 40501064)

收稿日期: 2005-07-26; **修订日期:** 2006-01-22

作者简介: 张运林(1976~), 男, 湖南邵阳人, 博士, 主要从事水光学、水生态学和水质遥感研究. E-mail: ylzhang@niglas.ac.cn

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: qinboq@niglas.ac.cn

Foundation item: This work was financially supported by the Key Knowledge-Initiated Project from Chinese Academy of Sciences (No. KZCX3-SW-334, KZCX3-SW-350) and National Natural Science Foundation of China (No. 40601099, 40501064)

Received date: 2005-07-26; **Accepted date:** 2006-01-22

Biography: ZHANG Yun-Lin. Ph. D., mainly engaged in water optics, water ecology and water quality remote sensing. E-mail: ylzhang@niglas.ac.cn

documents spectral absorption variations and relative contributions of the optically active constituents in water, and presents correlations between absorption coefficients and concentrations of these components.

Spectral absorption coefficients of the total particles a_p (), nonalgal particles a_d (), phytoplankton a_{ph} (), and CDOM a_g () as well as the relative contribution of each component's absorption to the total absorption coefficient integrated over the range of PAR (400—700 nm) in Meiliang Bay of Lake Taihu were determined in summer 2004. CDOM absorption coefficients a_g () were obtained by measuring the optical density of filtered water. Particulate matter absorption coefficients a_p () were measured by applying the quantitative filter technique (QFT). Downward photosynthetically available irradiance (PAR, 400—700 nm) at the water surface and at different depths was measured using an irradiance meter from Li-Cor (Lincoln, Nebraska, USA) equipped with a Li-192SA underwater cosine corrected sensor connected to a Li-1400 datalogger. Diffuse attenuation coefficients for downward irradiance were obtained from nonlinear regression of the underwater irradiance profile.

The particulate matter absorption at 440 nm a_p (440) ranged from 3.58 to 9.86 m^{-1} with an average of (7.56 ± 1.74) m^{-1} . The absorption coefficients of nonalgal particles a_d (440), phytoplankton a_{ph} (440) and CDOM a_g (440) were in the range $2.23 - 7.07 m^{-1}$, $0.68 - 4.76 m^{-1}$ and $1.06 - 1.70 m^{-1}$, respectively. The red absorption peak of phytoplankton a_{ph} (675) ranged from 0.58 to $2.84 m^{-1}$. Absorption coefficients of nonalgal particles and CDOM decreased exponentially from short to long wavelength. The exponential spectral slope coefficients of nonalgal particles S_d over the 400~700 nm interval and of CDOM S_g over 280~500 nm were (10.91 ± 0.62) , $(15.52 \pm 0.49) \mu m^{-1}$, respectively. In most cases, the absorption spectra of nonalgal particles were similar to those of the total particles, which demonstrated that the absorption of the total particulate matter was primarily due to the absorption of nonalgal particles.

Significant linear relationships were found between a_p (440) and total suspended solids (TSS), organic suspended solids (OSS) and inorganic suspended solids (ISS). Significant linear relationships were also found between a_d (440) and the suspended solid fractions, as was true as well for a_{ph} (440) with respect to OSS and chlorophyll a (Chla). Significant positive relationship was found between a_g (440) and Chla, but not with dissolved organic carbon (DOC), which indicated that decomposition of phytoplankton was an important source of CDOM. Total particulate matter absorption dominated the total absorption. The relative contribution of a_p to a integrated over the range of PAR (400—700 nm) exceeded 70% and the relative contribution of a_d to a generally exceeded 40% except for station M8, M9 and M13. Finally, the ratio of a to PAR diffuse attenuation K_d (PAR) also generally exceeded 40%.

Key words: Meiliang Bay; nonalgal particles; phytoplankton; chromophoric dissolved organic matter; chlorophyll a; absorption spectra

湖泊水体光学性质直接影响湖泊水生生物群落的结构和功能,悬浮物、叶绿素a等水质参数的遥感反演。太阳辐射在水下的传输和分布受制于水及水中各组成物质对光的吸收和散射,包括纯水、非藻类颗粒物、浮游藻类和有色可溶性有机物(Chromophoric dissolved organic matter: CDOM)。其中纯水对光的衰减是所有水体都共有的,因而不同类型、不同区域水体的光学特性主要取决于非藻类颗粒物、浮游藻类和CDOM的浓度及组成^[1]。非藻类颗粒物、浮游藻类和CDOM的光谱吸收是水体的固有光学特性,是水色遥感的生物-光学模式、光辐射传输、初级生产力估算和生态过程模拟的基本参数^[1]。海洋里以及国内外内陆水体关于这3类物质的吸收光谱研究较多^[2~9],但国内外内陆水体尤其是湖泊这方面的研究相当欠缺。曹文熙等^[10]对珠江口悬浮颗粒物的吸收光谱进行了一些探讨,但未涉及CDOM的吸收光谱;朱建华等^[11]只探讨了黄东海非藻类颗粒物和CDOM吸收光谱斜率值;俞宏等^[12]在20世纪90年代中期测定了梅梁湾冬、夏季水体吸收和散射系数,但未能很好的区分浮游藻类和非藻类颗粒物;对太湖CDOM的时空分布、变化特征进行过大量研究^[13~15],但均未涉及到颗粒物固有光学特性,因而对于太湖生物-光学模式的建立和水质反演还远远不够。

梅梁湾系太湖北部一较大湖湾,地处无锡市郊,面积约 $132 km^2$,平均水深 2.0 m,是无锡市主要旅游区及

水源地。由于受入湖河道及沿岸污染源的影响,水质严重恶化,蓝藻水华连年发生。每年5~10月间持续不断,夏秋季节整个湾内滋生大量蓝藻水华。有些年份甚至全年均有大量蓝藻漂浮水中。本文以这富营养化、水华频繁暴发的梅梁湾为研究区域,通过实验测定的方法得到悬浮颗粒物和CDOM的吸收光谱,并与悬浮物、叶绿素a浓度进行相关分析,为该地区的二类水体水色遥感算法、生物-光学模式反演水质提供重要参数。

1 材料与方法

1.1 采样时间与站位

2004年7月17日在梅梁湾共布设16个采样点,由于采样期间风浪较大,湾中心点位较少,大多集中在湾的两侧,采样点位置见图1。样品采集后放入冷藏箱内保存,当天带回实验室进行过滤预处理,然后放入冰箱内冷藏保存。颗粒物、CDOM吸收、溶解性有机碳(DOC)、悬浮物以及叶绿素a浓度在2~3d内测定完毕。采样的同时测定透明度、水下光合有效辐射(PAR)强度等。

1.2 光强和透明度测定

PAR的测定选用美国Li-COR公司的Li-cor 192SA水下光量子仪,测定的是向下辐照度。观测期间天空晴朗无云,按水下0,0.2,0.5,1.0,1.5,2.0m共6层测定PAR强度,每层记录3个数据,取平均值。透明度用直径为30cm的黑白赛氏盘测量。

太阳光在光学性质均一的水体中的衰减遵从下列衰减规律^[1]:

$$K_d(PAR) = -\frac{1}{z} \ln \frac{E(z)}{E(0)} \quad (1)$$

式中,K_d(PAR)为PAR漫射衰减系数,z为从湖面到测量处的深度,E(z)为深度处的PAR强度,E(0)为水表面下(0)PAR强度。K_d(PAR)值通过对不同深度水下辐照度按指数函数拟合得到,回归效果只有当R²0.95,深度数N3时K_d(PAR)值才被接受,否则视为无效。

1.3 颗粒物和CDOM吸收系数测定

颗粒物的吸收采用定量滤膜技术(Quantitative Filter Technique:QFT)测定,用直径47mm的GF/F滤膜过滤50~200ml水样,用同样湿润程度的空白滤膜做参比,用UV-2401PC型分光光度计在350~800nm间每隔1nm测定一个吸光度,用各波段的吸光度减去750nm波长处的吸光度,采用Cleveland等^[16]提出的如下公式进行放大因子校正:

$$OD_s = 0.378 OD_f + 0.523 OD_f^2 \quad OD_f < 0.4 \quad (2)$$

式中,OD_s为校正后滤膜上颗粒物吸光度;OD_f为直接在仪器上测定的滤膜上颗粒物吸光度。

滤膜上悬浮颗粒物的光谱吸收系数按(3)式进行计算得到^[16]:

$$a_p(\lambda) = 2.303 \cdot \frac{S}{V} OD_s(\lambda) \quad (3)$$

式中,V为被过滤水样的体积,S为沉积在滤膜上的颗粒物的有效面积。

用100%的甲醇浸泡滤膜4h左右,将滤膜上的色素萃取掉,使得滤膜上只留下不能被甲醇提取的碎屑颗粒物,按与总颗粒物吸收测定类似方法得到非藻类颗粒吸收系数a_d(λ)。总颗粒物吸收系数减去非藻类颗粒物吸收系数即得到浮游藻类吸收系数。

$$a_{ph}(\lambda) = a_p(\lambda) - a_d(\lambda) \quad (4)$$

浮游藻类的比吸收系数可以表示为:

$$a_{ph}^*(\lambda) = a_{ph}(\lambda) / Chla \quad (5)$$

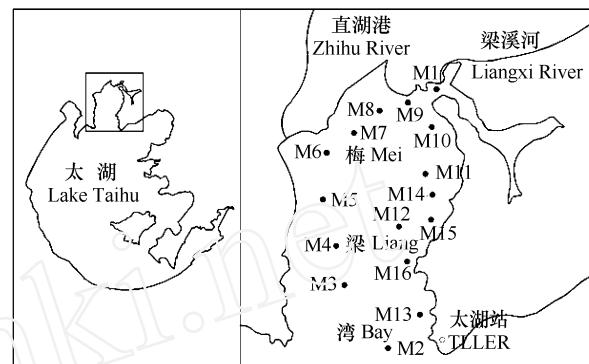


图1 梅梁湾采样点位置图

Fig. 1 Location of sampling stations in Meiliang Bay

CDOM 的光谱吸收系数测定采用 GF/F 滤膜过滤的水样在 UV2401 分光光度计下测定其吸光度 , 然后根据 (6) 式进行计算得到各波长的吸收系数^[17]。

$$a_g(\lambda) = 2.303 D(\lambda) / r \quad (6)$$

式中 , $a_g(\lambda)$ 为波长 λ 未校正的吸收系数 , $D(\lambda)$ 为吸光度 , r 为光程路径。

由于过滤清液还有可能残留细小颗粒 , 会引起散射 , 为此作如下散射效应订正^[17] :

$$a_g(\lambda) = a_g(\lambda) - a_g(700) \cdot /700 \quad (7)$$

式中 , $a_g(\lambda)$ 为波长 λ 的吸收系数 ; $a_g(700)$ 为波长 700 nm 的未校正吸收系数 ; $/700$ 波长。由于 CDOM 的浓度无法测定 , 本文以 440 nm 的吸收系数来表示 CDOM 浓度 , 吸收系数越大表示 CDOM 浓度越高。

总吸收系数为悬浮颗粒物、CDOM 和纯水吸收系数的线性加和^[11] :

$$a(\lambda) = a_p(\lambda) + a_g(\lambda) + a_w(\lambda) \quad (8)$$

1.4 指数函数斜率的计算

非藻类颗粒物和 CDOM 吸收光谱随波长增加基本上呈现指数衰减的规律 , 可以表示为 :

$$a_x(\lambda) = a_x(\lambda_0) \exp [S_x(\lambda_0 - \lambda)] \quad (9)$$

式中 , 下标 x 分别用 d 和 g 代表时 , 即为非藻类颗粒物和 CDOM , $a_x(\lambda)$ 为 λ 波长下吸收系数 , λ 是波长 , λ_0 是参照波长 , 一般取 440 nm 或 400 nm , $a_x(\lambda_0)$ 为参照波长下吸收系数 , S_x 是指数函数曲线斜率参数。本文选取 440 nm 作为参照波长 , 利用最小二乘法拟合得到指数函数斜率 S_x 值 , 其中 CDOM 拟合的波段范围为 280 ~ 500 nm , 非藻类颗粒物的拟合波段范围为 400 ~ 700 nm 。

1.5 其他参数的测定

DOC 的测定是采用 GF/F 滤膜过滤后的清液在 1020 型 TOC 仪上测定。叶绿素 a 的测定采用分光光度法 , 样品过滤到 GF/C 滤膜上 , 放入冰箱内冷冻 48 h , 用 90 % 的热酒精萃取 , 过滤或离心得到清液后在 7230 分光光度计上测量吸光度并计算得到叶绿素 a 浓度。总悬浮物、无机颗粒物和有机颗粒物浓度采用灼烧称重法测定。各参数的均值、标准差、方差分析、线性及非线性拟合均采用 SPSS11.0 软件进行统计分析。

2 结果与讨论

2.1 总颗粒物吸收光谱

图 2 给出了梅梁湾 16 个采样点悬浮颗粒物和 CDOM 的光谱吸收系数。不同采样点总颗粒物的光谱吸收系数差异很大 , $a_p(440)$ 的值在 $3.58 \sim 9.86 \text{ m}^{-1}$ 间变化 (表 1) , 均值为 $(7.56 \pm 1.74) \text{ m}^{-1}$ 。从曲线的形状来看大致随波长的增加吸收系数逐渐降低 , 但在 675 nm 附近叶绿素 a 的吸收峰却很明显 , 与浮游藻类在此波段的特征吸收有关 , 说明梅梁湾内各点叶绿素 a 浓度都不低。对 16 个采样点颗粒物吸收系数光谱分布进行分析发现 , 总体上可以分为 2 种类型。一种是总颗粒物吸收光谱与浮游藻类吸收光谱相似 (图 3A) , 另一种则是总颗粒物吸收光谱与非藻类颗粒物吸收光谱相似 (图 3B) , 但两者总颗粒物在 675 nm 附近的吸收曲线与浮游藻类在此波段的吸收曲线均非常相似。

由图 3 还可知 , 对于第 1 种类型 , 浮游藻类吸收系数一般都大于非藻类颗粒物 , 总颗粒物吸收系数在 675 、 440 nm 有 2 个峰值 , 675 nm 峰值非常明显 , 而 440 nm 处峰值由于受非藻类颗粒物影响有时表现的不是特别明显。分析表明 , 这种光谱类型主要分布在叶绿素 a 浓度较高 , 同时无机颗粒物浓度较低 , 有机颗粒物占总颗粒物比例接近或超过 30 % 的采样点 , 在夏季风平浪静并且藻类大量生长时常出现 , 在外海和一类水体颗粒物的吸收基本上以这种类型为主^[7, 18~20]。对于第 2 种类型 , 总颗粒物吸收系数只在 675 nm 有个峰值 , 浮游藻类吸收可能大于非藻类颗粒物吸收 , 其他波段浮游藻类吸收均淹没在非藻类的吸收光谱中 , 这类采样点主要分布在叶绿素 a 浓度低以及无机颗粒物浓度高的地方。由于太湖是个大型浅水湖泊 , 受风驱动的影响沉积物发生再悬浮 , 因而夏季当梅梁湾内出现中到大风浪 , 这种类型占主导地位。到冬季由于浮游藻类浓度较低 , 因而更是以第 2 种类型为主。在河流、河口、沿岸带等二类水体也常常会出现这种颗粒物吸收类型^[9, 10]。从 2004 年 7 月 17 日的观测来看 , 2 种类型出现的频次分别为 3 、 13 , 以第 2 种类型为主。这主要是由于观测期间风浪较

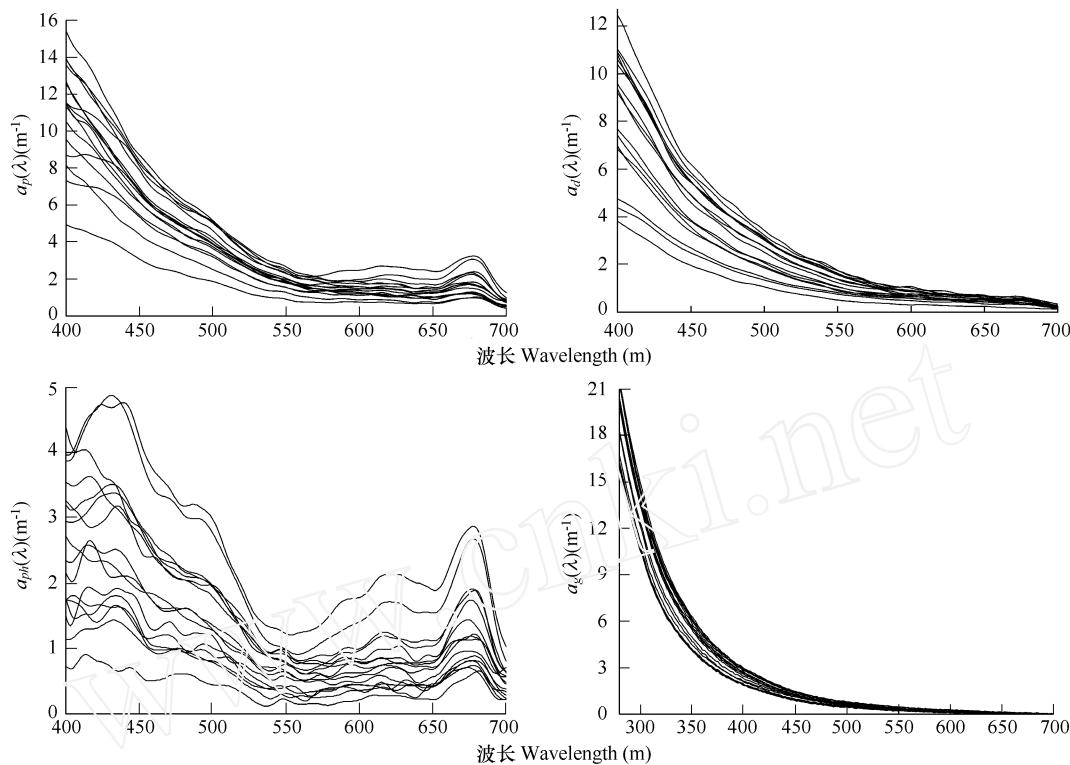


图 2 梅梁湾总颗粒物、非藻类颗粒物、浮游藻类和 CDOM 的光谱吸收系数

Fig. 2 Absorption spectra of total particles, nonalgal particles, phytoplankton and CDOM

大,沉积物发生大规模再悬浮,水体中无机颗粒物浓度较高(表 1),因而颗粒物的吸收主要以非藻类颗粒物为主。只有在悬浮物浓度比较低而浮游藻类浓度又非常高的采样点才会出现浮游藻类吸收系数大于非藻类颗粒物吸收系数。

表 1 特征波长处吸收系数及主要水色因子浓度

Table 1 Absorption coefficients at 440,665 nm and main water color factor concentration

No.	a_p (440) (m^{-1})	a_d (440) (m^{-1})	a_{ph} (440) (m^{-1})	a_g (440) (m^{-1})	K_d (PAR) (m^{-1})	SD (m)	TSS (mg/L)	OSS (mg/L)	ISS (mg/L)	DOC (mg/L)	Chla ($\mu\text{g/L}$)	OSS/TSS (%)	Sd (μm^{-1})	Sg (μm^{-1})
M1 #	7.14	5.57	1.58	1.14	9.94	0.21	144.5	16.3	128.1	7.75	41.5	11.28	10.9	15.3
M2 #	7.82	6.21	1.61	1.06	9.86	0.24	145.6	15.0	130.6	7.55	39.3	10.30	11.4	15.8
M3 #	7.82	6.06	1.75	1.26	9.37	0.18	164.4	15.7	148.7	7.41	40.9	9.55	11.6	14.7
M4 #	8.94	7.07	1.87	1.11	10.11	0.22	156.9	17.4	139.5	7.21	45.7	11.09	12.0	15.5
M5 #	9.86	6.71	3.15	1.31	10.10	0.24	159.3	18.0	141.3	8.15	64.1	11.30	11.0	15.5
M6 #	9.46	6.38	3.08	1.70	10.12	0.22	146.4	20.0	126.4	7.73	118.5	13.66	11.2	15.0
M7 #	9.62	6.27	3.35	1.69	9.54	0.22	136.7	20.6	116.1	7.53	65.3	15.07	11.3	14.8
M8 #	6.07	2.81	3.26	1.59	5.31	0.33	58.3	19.9	38.3	8.69	128.6	34.13	9.9	15.3
M9 #	7.69	3.04	4.65	1.48	6.85	0.26	66.1	27.7	38.4	7.71	180.2	41.91	9.4	16.1
M10 #	8.02	5.60	2.42	1.42	9.61	0.22	114.4	17.9	96.5	7.35	94.2	15.65	10.7	15.8
M11 #	7.49	5.38	2.11	1.35	8.86	0.22	117.7	16.2	101.5	6.92	73.7	13.76	11.0	15.9
M12 #	6.90	3.89	3.01	1.51	8.50	0.24	99.6	14.2	85.4	6.78	65.9	14.26	10.8	15.4
M13 #	9.27	4.50	4.76	1.64	9.22	0.19	93.4	26.7	66.7	7.56	123.3	28.59	10.9	15.1
M14 #	6.25	4.17	2.09	1.46	7.79	0.23	100.9	15.7	85.2	6.38	56.8	15.56	10.7	15.5
M15 #	3.58	2.23	1.35	1.13	5.19	0.38	49.1	9.9	39.1	7.69	65.3	20.16	11.2	16.4
M16 #	4.98	4.29	0.68	1.06	6.76	0.25	81.7	10.9	70.8	7.50	42.1	13.34	10.6	16.2

SD: 透明度; TSS: 总悬浮颗粒物; OSS: 有机悬浮颗粒物; ISS: 无机悬浮颗粒物; DOC: 溶解性有机碳; Chla: 叶绿素 a

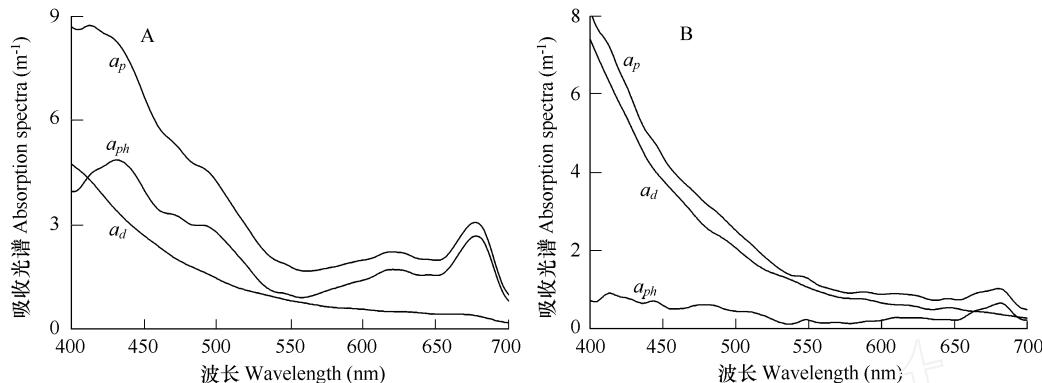


图3 2种典型的总颗粒物吸收光谱

Fig. 3 Absorption spectra of total particles of two typical types in summer

A. 第1种类型 The first type; B. 第2种类型 The second type

表2 颗粒物吸收系数、PAR衰减系数及衰减因子之间线性关系(R^2)

Table 2 Determination coefficients of absorption, PAR attenuation coefficients and light attenuators

	$a_p(440)$	$a_d(440)$	$a_{ph}(440)$	$a_p(675)$	$a_d(675)$	$a_{ph}(675)$	$K_d(\text{PAR})$	TSS	OSS	ISS	Chla
$a_p(440)$	1.00										
$a_d(440)$	0.58 ³⁾	1.00									
$a_{ph}(440)$	0.29 ¹⁾	0.02	1.00								
$a_p(675)$	0.30 ¹⁾	0.01	0.93 ³⁾	1.00							
$a_d(675)$	0.64 ³⁾	0.79 ³⁾	0.00	0.01	1.00						
$a_{ph}(675)$	0.17	0.07	0.92 ³⁾	0.97	0.00	1.00					
$K_d(\text{PAR})$	0.67 ³⁾	0.85 ³⁾	0.00	0.00	0.67	0.01	1.00				
TSS	0.49 ²⁾	0.92 ³⁾	0.03	0.04	0.65	0.11	0.83 ³⁾	1.00			
OSS	0.39 ¹⁾	0.00	0.82 ³⁾	0.88	0.06	0.80 ³⁾	0.03	0.00	1.00		
ISS	0.38 ¹⁾	0.89 ³⁾	0.008	0.09	0.59	0.19	0.77 ³⁾	0.99 ³⁾	0.02	1.00	
Chla	0.03	0.19	0.66 ³⁾	0.71	0.01	0.75 ³⁾	0.10	0.25 ¹⁾	0.62 ³⁾	0.35 ³⁾	1.00

1) $p < 0.05$; 2) $p < 0.005$; 3) $p < 0.001$

对 $a_p(440)$ 、 $a_p(675)$ 与叶绿素 a 浓度做统计分析,发现 $a_p(675)$ 与叶绿素 a 存在很好的线性关系,而 $a_p(440)$ 与叶绿素 a 则基本上没有相关性(表2),进一步表明颗粒物吸收主要以非藻类颗粒物为主,在 440 nm 附近浮游藻类的吸收完全被非藻类颗粒物所掩盖,而到 675 nm 非藻类颗粒物的吸收很小,浮游藻类吸收峰非常明显,因而存在非常好的线性关系。表2还给出了 $a_p(440)$ 、 $a_p(675)$ 与其它组份吸收系数以及物质浓度线性回归的决定系数。 $a_p(440)$ 除了与 $a_{ph}(675)$ 、Chla 没有显著线性关系外与其他参数均存在显著性相关,而 $a_p(675)$ 则只与 $a_{ph}(675)$ 、OSS 有显著性相关,说明在 675 nm 附近颗粒物的吸收主要受制于浮游藻类等有机颗粒物。

2.2 非藻类颗粒物吸收光谱

a_d ()随波长增加而减小(图2), $a_d(440)$ 的变化范围为 $2.23 \sim 7.07 \text{ m}^{-1}$,均值为 $(5.01 \pm 1.49) \text{ m}^{-1}$ 。许多研究均表明非藻类颗粒物有相对稳定的吸收光谱特征,可用指数衰减率来定量表示^[21, 22]。图4给出代表采样点非藻类颗粒物实测吸收光谱和指数拟合得到的吸收光谱,发现两者结果非常接近。非藻类颗粒物吸收系数在 400~700 nm 按指数衰减规律拟合得到指数斜率 S_d 值的变化范围 $9.4 \sim 12.0 \mu\text{m}^{-1}$,均值为 $(10.91 \pm 0.62) \mu\text{m}^{-1}$,非线性拟合的决定系数均大于 0.97。与已有的报道相比,太湖非藻类颗粒物指数斜率 S_d 值低于曹文熙等^[10]报道的珠江口的值,也低于 Roesler^[21]报道的美国东海岸岛屿地区以及 Bricaud 等^[22]报道的赤道太平洋及东地中海的 S_d 值,但高于 Gallegos^[23]在 Lower St. Johns 河口的研究结果。另外,朱建华等^[11]报道黄东海的非藻类颗粒物吸收光谱在 380~620 nm 指数拟合得到 S_d 值的变化范围在 $5 \sim 16 \mu\text{m}^{-1}$ 之间,大部分集中在

8~12 μm^{-1} 范围内,其中在 10~11 μm^{-1} 分布最多,小于 8 和大于 12 μm^{-1} 的样品占总样品的比例小于 5%。尽管非藻类颗粒物吸收系数随波长增加大致按指数规律衰减,但当水体中浮游藻类浓度非常高时,在 675 nm 附近会存在一个肩峰或弱峰值,这在其他研究中也得到证实^[6, 9, 22]。主要由两方面原因造成,一方面可能是甲醇对色素萃取不完全,Vähtalo 等^[9]的定量研究表明,许多样品的提取效果往往只有 90% 左右,有的甚至只有 70%。另一方面则是一些水溶性的或者不能溶于甲醇的色素无法被提取,如藻胆色素和真核藻类色素等,这在内陆水体表现尤为明显,因为大部分内陆水体都是以蓝藻和绿藻为主,而藻胆色素广泛存在于这两类藻内。为此,Tassan & Ferrari 提出利用次氯酸钠漂白法更适合于二类水体非藻类颗粒物和浮游藻类吸收系数的分离^[24],并得到许多人的认可^[6, 25, 26]。相对于甲醇浸泡法,次氯酸钠漂白法拥有以下 3 个优点:(1)除能漂白甲醇提取的色素外,还可以氧化提取那些不能被甲醇提取的色素和水溶性色素,如藻胆色素、藻蓝素等;(2)其氧化漂白的速度也非常快,一般 15 min 即可,这样不会破坏滤膜的组织结构,而甲醇浸泡法一般需要 1 h 以上;(3)一般不会造成非藻类颗粒物的损失。

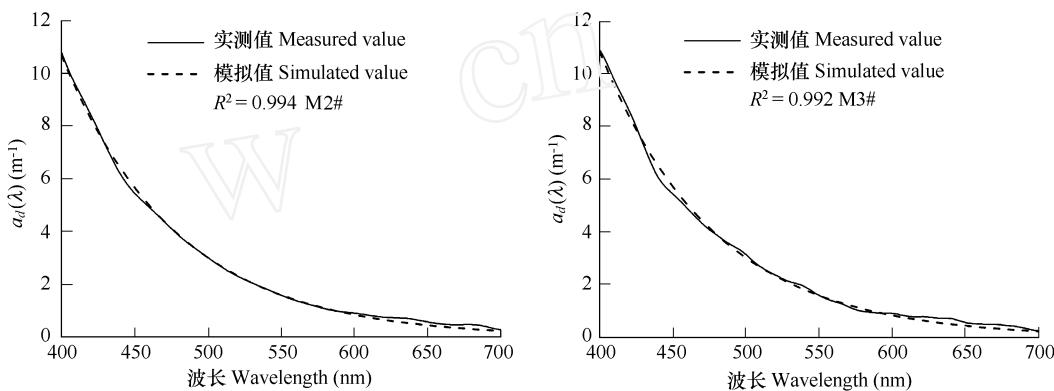


图 4 典型采样点非藻类光谱吸收系数实测值与模拟值对比

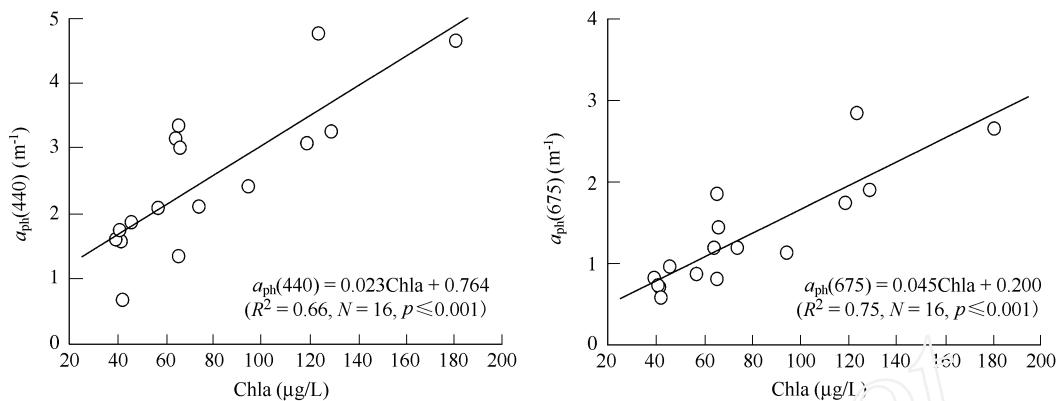
Fig. 4 Comparison of $a_d(\lambda)$ of measured and simulated

$a_d(440)$ 、 $a_d(675)$ 与总悬浮物浓度相关性最好,这在其他人的研究中也得证实^[6],其次是无机颗粒物;而与有机颗粒物、叶绿素 a 没有相关性(表 2)。说明非藻类颗粒物中生物降解的产物不多,基本上为无机物,这与远海以及富营养而又没有风浪扰动的湖泊和时段不一样。如 Bricaud 等^[22]基于对世界各大海区 1166 个样品研究发现, $a_d(440)$ 与叶绿素 a 也存在非常好的幂函数关系,决定系数高达 0.73。2004 年夏季水华暴发而又风平浪静的情况下曾观测到梅梁湾、五里湖非藻类颗粒物吸收系数与叶绿素 a 浓度存在显著线性关系,并且 $a_d(675)$ 与叶绿素 a 浓度相关性明显高于 $a_d(440)$ 。对于这类区域和时段,认为水体的非藻类颗粒物很大一部分来源于浮游藻类的降解产物。同样,在一些河口的研究则显示非藻类颗粒物吸收系数与叶绿素 a 浓度之间没有明显相关性^[10]。

2.3 浮游藻类吸收光谱

浮游藻类的吸收光谱表现为色素在 440、675 nm 附近有 2 个特征吸收峰,但不同采样点由于色素浓度差异很大,相应的浮游藻类的吸收系数变化也很大。 $a_{ph}(440)$ 、 $a_{ph}(675)$ 的变化范围分别为 0.68~4.76、0.58~2.84 m^{-1} ,均值分别 (2.55 ± 1.14) 、 $(1.34 \pm 0.69) \text{ m}^{-1}$,对应的叶绿素 a 浓度的变化范围为 39.3~180.2 $\mu\text{g/L}$ 。浮游藻类吸收系数主要受水体中浮游藻类的浓度及种群组成的影响,随叶绿素 a 浓度的变化而变化。

在远海一类水体和河口区、沿岸带等二类水体的一些研究结果均显示浮游藻类吸收系数与叶绿素 a 浓度存在线性或非线性关系。如 Gallegos^[23] 在 Lower St. Johns 河口研究显示两者有很好的线性关系;曹文熙等^[10]

图 5 游植物吸收系数 a_{ph} (440)、 a_{ph} (675) 叶绿素 a 的关系Fig. 5 Correlations between a_{ph} (440), a_{ph} (675) and chlorophyll a concentration

在珠江口得出幂函数关系;Bricaud 等^[27]在马尾藻海、河口与海湾、地中海、大西洋等海区的一类和二类水体得出指数函数关系;Cleveland^[28]对温带/热带海区的研究发现两者为非线性关系。此次在太湖梅梁湾的研究显示两者有很好的线性关系(图 5),说明其比吸收系数相对比较恒定, $a_{ph}^*(440)$ 、 $a_{ph}^*(675)$ 的均值分别为(0.0345 ± 0.0106)、(0.0176 ± 0.0044) $m^2/mgChla$ 。相比而言,675 nm 处的相关性要好于 440 nm,主要是由于 440 nm 浮游藻类吸收系数会受非藻类颗粒物的影响,因为在太湖这种无机颗粒物浓度非常高的浅水湖泊,采用甲醇浸泡来分离浮游藻类和非藻类颗粒物吸收在浸泡前后往往两次过滤中往往会造成非藻类颗粒物以及非光合作用色素的损失,从而导致在 500 nm 以下波段浮游藻类吸收人为增加,降低了吸收系数与叶绿素 a 浓度的相关性。而在 675 nm 非藻类颗粒物的吸收系数很小,其对浮游藻类吸收系数的干扰要小得多,因而相关性会提高,这在一些同类研究中也得到证实^[10]。

2.4 CDOM 吸收光谱

CDOM 的光谱吸收曲线变化与非藻类颗粒物相似,随波长增加按指数规律递减,在长波的 700 nm 趋向于零,越到短波其差异越显著。 $a_g(440)$ 的变化范围为 $1.06 \sim 1.70 m^{-1}$,均值为 $(1.37 \pm 0.23) m^{-1}$ 。从图 1 和表 1 还可得知,CDOM 的空间分布与冬、春季在梅梁湾观测的结果不一样,在冬、春季浮游藻类浓度较低,CDOM 主要来自于入湖河流,一般河口 CDOM 吸收系数较高,从河口往湾内、湾口逐渐递减^[14, 15]。但在夏季由于水体中浮游藻类浓度较高,CDOM 除了来自河流外,浮游藻类死亡降解的产物也是 CDOM 的重要来源。对 CDOM 吸收系数与叶绿素 a 浓度进行线性、指数、对数以及幂函数来拟合发现幂函数拟合的相关性最高,关系式如下:

$$a_g(440) = 0.4432Chla^{0.2627} \quad (R^2 = 0.55, N = 16, p = 0.001) \quad (10)$$

CDOM 代表了溶解性物质中有颜色的部分,因而许多研究均显示 CDOM 吸收系数与 DOC 浓度存在非常显著的正相关^[29~31]。先前冬、春季的观测的结果也证实了这种相关性^[14, 15]。但此次夏季的观测却显示两者没有显著性相关,主要原因是由于夏季浮游藻类大量生长,降解后产生大量无色的溶解性有机碳。在海洋里有时也发现 CDOM 吸收系数与 DOC 浓度没有相关性^[32, 33]。另外,Rochelle-Newall^[12]从 1994 ~ 1997 年在 Chesapeake 湾的 7 次测定也发现,在 CDOM 吸收系数和叶绿素 a 浓度存在显著正相关的 3 次样品中,DOC 浓度与 CDOM 吸收系数无显著正相关或相关性很弱。夏、冬季 CDOM 吸收系数与 DOC 浓度相关性存在很大变化系与 DOC 的组成有关。从光吸收能力角度来讲,DOC 一般可以分为有色的和无色的,两者占总 DOC 的比例随不同地区和来源存在很大差异。当 DOC 中无色的部分为常数或变化不大时,CDOM 吸收系数会与 DOC 浓度存在非常好的相关性。一般来讲,来自河流携带的陆源 DOC 含有更多的有色 DOC,而浮游藻类自身降解产生的 DOC 中含有更多的无色 DOC^[2]。梅梁湾夏季由于浮游藻类大量生长、腐烂降解,产生更多无色 DOC 成

分,从而使得 CDOM 吸收系数与 DOC 浓度相关性明显下降。造成夏季无色的 DOC 成分增多还有可能与紫外辐射的光降解有关,夏季到达水面的紫外辐射较强,CDOM 吸收紫外辐射后发生光降解丧失颜色而增加了无色的 DOC 成分,即通常讲的光漂白作用。如 Vodaec 等^[34]发现在高度分层的水体中 CDOM 的光吸收特性将丧失 70%。

最小二乘法拟合得到 280~500 nm 波段指数函数斜率 S_g 的变化范围为 14.7~16.4 μm^{-1} ,平均值为 $(15.52 \pm 0.49) \mu\text{m}^{-1}$,与先前的观测结果极为接近^[14, 15]。与已有的报道相比,尽管由于各自选取的波段存在一些差异,但其值总体上相差不大,如 Yacobi^[35]曾报道美国 Georgia 河 300~450 nm 波段 S_g 值为 $15.1 \mu\text{m}^{-1}$,Del Castillo^[36]报道 Orinoco 入海口 400~500 nm 波段的 S_g 值为 $14.2 \mu\text{m}^{-1}$ 。

2.5 各组分吸收份额及吸收对衰减的贡献

表 3 给出各组分 400~700 nm PAR 波段积分吸收系数、各自的贡献份额以及吸收对衰减的比值。由表 3 可知,吸收系数主要来自于颗粒物,而颗粒物的吸收又以非藻类颗粒物吸收为主,仅 M8、M9 和 M13 点浮游藻类吸收大于非藻类颗粒物吸收。从各组份吸收对总吸收的贡献份额来看,纯水吸收的贡献率在 4% 左右,所占份额最小,CDOM 的贡献率在 10.06%~19.89% 之间,贡献率最大的是非藻类颗粒物,除 M8、M9 和 M13 点外,其他各点的贡献率均在 40% 以上,最大的达 67.19%,浮游藻类吸收的贡献率为 13.89%~52.20%,除 M16 最小值 13.89% 低于 CDOM 的贡献率 14.33% 外,其他各点均位居第二位。颗粒物的吸收对总吸收的贡献率均在 70% 以上,说明在梅梁湾颗粒物特别是非藻类的吸收和散射是引起水下光衰减的主导因素。从吸收对漫射衰减的比值来看,其值一般高于 40%,并且在叶绿素 a 浓度较高而悬浮物浓度又较低的 M8、M9 和 M13 点贡献率最高,能够达到甚至超过 60%。与海洋里相比,浅水湖泊等内陆水体各组份的贡献率存在很大差异。如 Sasaki 等^[20]在北太平洋和南白令海的研究显示,各组份 PAR 波段积分吸收系数对总吸收系数贡献最大的来自纯水本身,占到 59.9%~84.6%,其次则是 CDOM,非藻类颗粒物的贡献最小,仅为 1.3%~4.6%,而在太湖这种内陆浅水湖泊恰好相反,说明一类、二类水体光学成分浓度水体光学性质的巨大差别。

表 3 各组分 PAR 波段积分吸收系数、贡献率及吸收对衰减的比值

Table 3 Absorption coefficients of pure water (a_w), CDOM (a_g), nonalgal particles (a_d), phytoplankton (a_{ph}), total (a), their relative contributions integrated over the range of PAR (400~700 nm) and the ratios of total absorption coefficient (a) to PAR diffuse attenuation coefficients (K_d (PAR))

No.	a_w (m^{-1})	a_g (m^{-1})	a_d (m^{-1})	a_{ph} (m^{-1})	a_p (m^{-1})	a (m^{-1})	a_w/a (%)	a_g/a (%)	a_d/a (%)	a_{ph}/a (%)	a_p/a (%)	a_d/a_p (%)	a_{ph}/a_p (%)	a/K_d (PAR) (%)
M1 #	0.17	0.48	2.50	0.77	3.28	3.93	4.33	12.23	63.71	19.73	83.44	76.36	23.64	39.49
M2 #	0.17	0.44	2.79	0.75	3.54	4.15	4.10	10.60	67.19	18.11	85.30	78.77	21.23	42.09
M3 #	0.17	0.55	2.80	0.72	3.53	4.25	4.00	12.95	66.02	17.03	83.04	79.50	20.50	45.32
M4 #	0.17	0.48	3.16	0.96	4.13	4.78	3.56	10.05	66.24	20.16	86.40	76.67	23.33	47.26
M5 #	0.17	0.55	3.01	1.63	4.64	5.36	3.17	10.26	56.08	30.49	86.56	64.78	35.22	53.06
M6 #	0.17	0.73	2.85	1.55	4.40	5.30	3.21	13.77	53.74	29.29	83.03	64.72	35.28	52.40
M7 #	0.17	0.75	2.78	1.74	4.52	5.44	3.12	13.79	51.19	31.90	83.09	61.60	38.40	57.03
M8 #	0.17	0.68	1.28	1.68	2.95	3.80	4.47	17.88	33.55	44.10	77.65	43.20	56.80	71.61
M9 #	0.17	0.59	1.39	2.35	3.74	4.50	3.78	13.10	30.93	52.20	83.12	37.21	62.79	65.73
M10 #	0.17	0.58	2.51	1.19	3.70	4.45	3.82	13.04	56.38	26.75	83.13	67.82	32.18	46.27
M11 #	0.17	0.57	2.37	1.19	3.56	4.30	3.95	13.26	55.15	27.63	82.79	66.62	33.38	48.52
M12 #	0.17	0.63	1.75	1.57	3.32	4.12	4.13	15.30	42.55	38.01	80.57	52.82	47.18	48.44
M13 #	0.17	0.69	2.00	2.58	4.58	5.44	3.13	12.70	36.80	47.38	84.18	43.71	56.29	58.95
M14 #	0.17	0.62	1.81	1.07	2.88	3.67	4.63	16.88	49.38	29.11	78.49	62.91	37.09	47.16
M15 #	0.17	0.46	0.98	0.70	1.68	2.31	7.35	19.89	42.49	30.27	72.76	58.40	41.60	44.56
M16 #	0.17	0.42	1.93	0.41	2.34	2.93	5.80	14.33	65.97	13.89	79.87	82.60	17.40	43.35

在富营养化的梅梁湾,营养盐基本上不会对浮游藻类的生长起到限制作用,非藻类颗粒物的吸收一般要远远大于浮游藻类,因而其浓度的变化影响到浮游藻类和沉水植物对光的利用和初级生产力。而高浓度的 CDOM 也往往使得浮游藻类吸收对总吸收的贡献明显下降。并且非藻类颗粒物和 CDOM 对光的吸收随波长

增加按指数规律下降,相比于海洋,在太湖这种浅水湖泊 PAR 中的长波部分的光对浮游藻类的生长就起到至关重要的作用。在太湖,与其它光吸收组份的竞争使得浮游藻类不利于获得绿蓝光,这也可能成为其种群结构演替的重要驱动因素。蓝藻体内含有独特的藻胆色素,在 630 nm 附近存在最大吸收峰,能有效地利用桔红光,因而在浅水湖泊中常常成为优势种。由此可见,高浓度非藻类颗粒物和 CDOM 的吸收影响到浮游藻类光谱利用,也对浮游藻类种群组成起到一个选择性影响。另外,就水质遥感而言,对于太湖这种大型浅水湖泊,建立浮游藻类浓度和生产力的遥感反演模型的关键和难点是如何消除 CDOM、非藻类颗粒物的干扰。

3 结论

(1) 在梅梁湾大多数情况下总颗粒物的吸收光谱与非藻类颗粒物吸收光谱比较相似, $a_d(\lambda)$ 大于 $a_{ph}(\lambda)$, 反映非藻类颗粒物是主导该地区光衰减的首要因子。颗粒物吸收对总吸收的贡献率在 70% 以上,而颗粒物中又以非藻类颗粒物占主导,一般超过 40%。总吸收与漫射衰减的比值也在 40% 以上。

(2) 总颗粒物的吸收系数从 400 nm 到 600 nm 大致呈下降趋势,到 675 nm 附近由于叶绿素 a 的特征吸收会出现明显峰值,之后又随波长增加而降低, $a_p(440)$ 在 $3.58 \sim 9.86 \text{ m}^{-1}$ 间变化。浮游藻类的光谱吸收表现为在 440、675 nm 附近存在两个明显的峰值,均值分别为 $(2.55 \pm 1.14) \text{ m}^{-1}$ 、 $(1.34 \pm 0.69) \text{ m}^{-1}$ 。

(3) 非藻类颗粒物和 CDOM 的吸收随波长增加大致按指数规律下降, $a_d(440)$ 和 $a_g(440)$ 的变化范围分别为 $2.23 \sim 7.07$ 、 $1.06 \sim 1.70 \text{ m}^{-1}$; 非藻类颗粒物在 400 ~ 700 nm 波段的指数函数斜率 S_d 的平均值为 $(10.91 \pm 0.62) \mu\text{m}^{-1}$ 、CDOM 在 280 ~ 500 nm 波段指数函数斜率 S_g 的平均值为 $(15.52 \pm 0.49) \mu\text{m}^{-1}$ 。

(4) $a_p(440)$ 与 TSS、OSS、ISS 均存在显著性正相关,而 $a_d(440)$ 则只与 TSS、ISS 有显著性相关, $a_{ph}(440)$ 只与 OSS、Chla 有显著性相关。CDOM 吸收系数与 DOC 浓度没有显著正相关,但与 Chla 则存在显著的幂函数关系。浮游藻类的降解产物是水体中 CDOM 的重要来源之一。

References:

- [1] Kirk J T O. Light and photosynthesis in aquatic ecosystem. Cambridge, Britain: Cambridge University Press, 1994. 1 ~ 431.
- [2] Rochelle-Newall E J, Fisher T R. Chromophoric dissolved organic matter and dissolved organic carbon in Chesapeake Bay. Mar. Chem., 2002, 77: 23 ~ 41.
- [3] Rijkeboer M, Dekker A G, Gons H J. Subsurface irradiance reflectance spectra of inland waters differing in morphometry and hydrology. Aquatic Ecology, 1998, 31: 313 ~ 323.
- [4] Bricaud A, Stramski D. Spectral absorption coefficients of living phytoplankton and nonalgal biogenous matter: A comparison between the Peru upwelling and the Sargasso Sea. Limnol. Oceanogr., 1990, 35, 562 ~ 582.
- [5] Lutz V A, Sathyendranath S, Head E J H. Absorption coefficient of phytoplankton: regional variations in the North Atlantic. Mar. Ecol. Prog. Ser., 1996, 135: 197 ~ 213.
- [6] Babin M, Stramski D, Ferrar G M, 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: 1 ~ 20.
- [7] Sasaki H, Miyamura T, Saitoh S I, et al. Seasonal variation of absorption by particles and colored dissolved organic matter (CDOM) in Funka Bay, southwestern Hokkaido, Japan. Estuar. Coast. Shelf S., 2005, 64: 447 ~ 458.
- [8] Dekker A G, Malthus T J, Wijnen M M, et al. Remote sensing as a tool for assessing water quality in Loosdrecht lakes. Hydrobiologia, 1992, 233: 137 ~ 189.
- [9] Väinölä A V, Wetzel R G, Paerl H W. Light absorption by phytoplankton and chromophoric dissolved organic matter in the drainage basin and estuary of the Neuse River, North Carolina (U.S.A.). Freshwater Biol., 2005, 50(3): 477 ~ 493.
- [10] Cao W X, Yang Y Z, Xu X Q, et al. Regional patterns of particulate spectral absorption in the Pearl River estuary. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(21): 2344 ~ 2351.
- [11] Zhu J H, Li T J. Spectral model research about absorption coefficient of the de-pigment particulate and yellow substance in Yellow Sea and East China Sea. Ocean Technology, 2004, 23(2): 7 ~ 13.
- [12] Yu H, Cai Q M. Optical properties of waters in Taihu Lake and parameterizing schemes. In: Cai Q M ed. Ecological and Environmental Studies of Taihu Lake. Beijing, Meteorology Press, 1998. 63 ~ 73.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Zhang YL, Qin B Q, Chen WM, et al. A preliminary study of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in Lake Taihu, a shallow subtropical lake in China. *Acta Hydroch. Hydrobiol.*, 2005, 33(4): 315~323.
- [16] Cleveland J S, Weidemann A D. Quantifying absorption by aquatic particles: A multiple scattering correction for glass-fiber filters. *Limnol. Oceanogr.*, 1993, 38, 1321~1327.
- [17] Bricaud A, Morel A, Prieur L. Absorption by dissolved organic matter of the sea (yellow substance) in the UV and visible domain. *Limnol. Oceanogr.*, 1981, 26: 43~53.
- [18] Sosik H M, Mitchell B G. Light absorption by phytoplankton, photosynthetic pigments and detritus in the California Current System. *Deep Sea Research Part I*, 1995, 42: 1717~1748.
- [19] Dupouy C, Neveux J, Andr éM J. Spectral absorption coefficient of photosynthetically active pigments in the equatorial Pacific Ocean (165 °E~150 °W). *Deep-Sea Research*, 1997, 44: 1881~1906.
- [20] Sasaki H, Saitoh S I, Kishino M. Bio-optical properties of seawater in the western subarctic Gyre and Alaskan Gyre in the subarctic north Pacific and the southern Bering Sea. *J. Oceanogr.*, 2001, 57: 275~284.
- [21] Roesler C S. Theoretical and experimental approaches to improve the accuracy of particulate absorption coefficients derived from the quantitative filter technique. *Limnol. Oceanogr.*, 1998, 43: 1649~1660.
- [22] 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.
- [23] Gallegos C L. Optical water quality of a blackwater river estuary: the Lower St. Johns River, Florida, USA. *Estuar. Coast. Shelf S.*, 2005, 63: 57~72.
- [24] Tassan S, Ferrari GM. An alternative approach to absorption measurements of aquatic particles retained on filters. *Limnol. Oceanogr.*, 1995, 40(8): 1358~1368.
- [25] Darecki M, Weeks A, Sagan S, et al. Optical characteristics of two contrasting Case 2 waters and their influence on remote sensing algorithms. *Cont. Shelf Res.*, 2003, 23(3-4): 237~250.
- [26] Strömbeck N, Pierson D C. The effects of variability in the inherent optical properties on estimations of chlorophyll a by remote sensing in Swedish freshwaters. *The Science of the Total Environment*, 2001, 268: 123~137.
- [27] Bricaud A, Babin M, Morel A, et al. Variability in the chlorophyll-specific absorption coefficients of natural phytoplankton: analysis and parameterization. *J. Geophys. Res.*, 1995, 100: 13321~13332.
- [28] Cleveland J S. Regional models for phytoplankton absorption as a function of chlorophyll a concentration. *J. Geophys. Res.*, 1995, 100: 13333~13344.
- [29] Vodacek A, Hoge F E, Swift R N, et al. The use of in situ and airborne fluorescence measurements to determine UV absorption coefficients and DOC concentrations in surface waters. *Limnol. Oceanogr.*, 1995, 40: 411~415.
- [30] Ferrari GM. The relationship between chromophoric dissolved organic matter and dissolved organic carbon in the European Atlantic coastal area and in the West Mediterranean Sea (Gulf of Lions). *Mar. Chem.*, 2000, 70: 339~357.
- [31] Del Vecchio R, Blough N V. Spatial and seasonal distribution of chromophoric dissolved organic matter and dissolved organic carbon in the Middle Atlantic Bight. *Mar. Chem.*, 2004, 89: 169~187.
- [32] Nelson N B, Siegel D A, Michaels A F. Seasonal dynamics of colored dissolved organic material in the Sargasso Sea. *Deep-Sea Research I*, 1998, 45: 931~957.
- [33] Chen Z Q, Li Y, Pan J M. Distributions of colored dissolved organic matter and dissolved organic carbon in the Pearl River Estuary, China. *Cont. Shelf Res.*, 2004, 24: 1845~1856.
- [34] Vodacek A, Blough N V, Degrandpre M D, et al. Seasonal variation of CDOM and DOC in the Middle Atlantic Bight: terrestrial inputs and photooxidation. *Limnol. Oceanogr.*, 1997, 42: 674~686.
- [35] Yacobi Y Z, Alberts J J, Tak ás M, et al. Absorption spectroscopy of colored dissolved organic carbon in Georgia (USA) rivers: the impact of molecular size distribution. *J. Limnol.*, 2003, 62: 41~46.
- [36] Del Castillo C E, Coble P G, Morell J M, et al. Analysis of the optical properties of the Orinoco River plume by absorption and fluorescence spectroscopy. *Mar. Chem.*, 1999, 66: 35~51.

参考文献:

- [10] 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.
- [11] 朱建华, 李铜基. 黄东海非色素颗粒与黄色物质的吸收系数光谱模型研究. *海洋技术*, 2004, 23(2): 7~13.
- [12] 俞宏, 蔡启铭. 太湖水体的光学特性及其参数化方案. 见: 蔡启铭主编. *太湖环境生态研究(一)*. 北京: 气象出版社, 1998. 63~73.
- [13] 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.
- [14] 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.