

太湖梅梁湾水体组分吸收特性季节差异分析

乐成峰, 李云梅, 查勇, 孙德勇, 伍蓝, 王莉珍

(南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 南京 210046)

摘要 利用 2006 年 8 月、11 月和 2007 年 3 月太湖梅梁湾水样实验室测定的水体组分固有光学特性数据和水质分析数据, 分析水体中各组分在不同季节的吸收特性, 并讨论不同季节光谱吸收的主导因子。结果表明, 各组分在不同季节其吸收特性存在一定的差异, 总悬浮吸收系数在夏季最大, 在 440 nm 平均吸收系数为 $(7.49 \pm 3.0) \text{ m}^{-1}$, 春季最小, 440 nm 平均吸收系数为 $(2.86 \pm 0.73) \text{ m}^{-1}$, 且不同季节其吸收类型不同; 非藻类颗粒吸收特性的季节性差异相对较小, 其吸收系数和 S 值的差异主要是由于无机悬浮物含量和组成的不同导致的, 由于藻类含量的差异导致浮游藻类吸收系数在夏季最大, 675 nm 平均吸收系数为 $(5.49 \pm 3.5) \text{ m}^{-1}$, 秋季次之, 675 nm 平均吸收系数为 $(2.03 \pm 1.14) \text{ m}^{-1}$, 春季最小, 675 nm 平均吸收系数为 $(0.62 \pm 0.25) \text{ m}^{-1}$; 而有色可溶性有机物 (chromophoric dissolved organic matter, CDOM) 吸收系数和 S 值的季节性差异主要是由于其来源的不同, 导致其浓度和成分的不同形成的。春、秋季由于无机悬浮物含量较高, 非藻类颗粒物对总吸收的贡献大于其他组分, 是水体总吸收的主导因子。而夏季由于浮游藻类含量较高, 使其成为水下光谱的主要影响因素。

关键词 太湖; 吸收系数; 固有光学特性; 季节差异

中图分类号: X87 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)09-2448-08

Seasonal Variation of in Water Constituents' Absorption Properties in Meiliang Bay of Taihu Lake

LE Cheng-feng, LI Yun-mei, ZHA Yong, SUN De-yong, WU Lan, WANG Li-zhen

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

Abstract Seasonal variance in absorption properties of water constituents was analyzed and predominant factor of spectrum absorption in different seasons was discussed using the data sets collected in August and November 2006 and March 2007 from Meiliang Bay in Taihu Lake. The results indicate that, the absorption of water constitutions has seasonal variation characteristic. Total suspended sediment has the greatest absorption coefficient in summer, the average absorption at band 440 nm is $(7.49 \pm 3.0) \text{ m}^{-1}$, while the least absorption presents in spring, with average absorption value of $(2.86 \pm 0.73) \text{ m}^{-1}$ at band 440 nm. The total absorption type varies with seasons. Non-algal particle absorption has less seasonal variation than total absorption. The difference of non-algal particle absorption coefficient and slope S were caused by different concentration and composition of non-algal particles. Because of high chlorophyll a concentration, phytoplankton absorption coefficient was great in summer, with average absorption value of $(5.49 \pm 3.5) \text{ m}^{-1}$ at band 675 nm. The average of phytoplankton absorption at band 675 nm in autumn is $(2.03 \pm 1.14) \text{ m}^{-1}$, less than that in summer. The least absorption presents in spring, with average absorption value of $(0.62 \pm 0.25) \text{ m}^{-1}$ at band 675 nm. Difference of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) concentration and constitution, mainly resulted by different source of CDOM, causes the seasonal variation of its absorption coefficient and slope S value. The predominant absorption factor varies with seasons. In spring and autumn, non-algal particles were the predominant spectrum absorption factor in water, because the concentration of inorganic matter is higher than organic matters in the two seasons. While in summer, phytoplankton becomes the main effect factor of spectrum absorption in water.

Key words Taihu Lake; absorption coefficient; inherent optical property; seasonal various

水下光照直接影响水体生态系统的结构和功能, 是水体生态系统的重要环境因子。太阳辐射在水体中传输受水体中各组分的吸收和散射影响而衰减^[1], 水体组分主要包括纯水、非藻类颗粒物、浮游藻类和有色可溶性有机物 (chromophoric dissolved organic matter, CDOM), 不同水体的光学特性主要取决于非藻类颗粒物、浮游藻类和 CDOM 的浓度及其成分。它们对光谱的吸收是水体重要的固有光学特性, 是水色遥感生物-光学模型和辐射传输模型的重要参数^[2,3], 对其进行研究可以更好地了解水下光场

的分布, 从而更加精确地对水质参数进行遥感反演。国内外已有众多学者对这 3 种物质的吸收特性进行了研究^[4-13]。同一水体不同季节, 由于其气候差异和水动力环境的不同, 使得水体中各组分浓度及成分都具有较大的差异^[14,15], 从而导致其吸收特性具有

收稿日期: 2007-08-18; 修订日期: 2008-01-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(40571110); “十一五”国家科技支撑计划项目(2008BAC34B05); 教育部留学回国人员启动基金项目(20071108)

作者简介: 乐成峰(1982~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为环境遥感, E-mail: lcf320@126.com

随季节变化的特征. Vivian 等^[16]对智利附近海域处于上升流和非上升流水动力条件下的水体光学特性分别进行了研究,结果表明在2种条件下浮游藻类和非藻类颗粒物的吸收系数都有明显的差异; Nelson 等^[17]对 Sargasso Sea 水体吸收特性的季节变化研究表明,不同季节水体的吸收特性具有不同的深度分布特征,且表层水体的吸收特性也具有较大差异; Churilova 等^[18]对黑海3种物质吸收系数研究中,发现随着时间的推移,水体中藻类、非藻类颗粒物和 CDOM 的吸收系数以及它们对总吸收的贡献率都不断变化; 俞宏等^[19]对太湖水体的吸收系数和散射系数的特性研究表明,太湖夏季水体吸收特性属于 CPY 型,而冬季属于 PY 型; 张运林^[20]对太湖夏、冬季节水体吸收特性进行了研究,得出夏季太湖浮游藻类吸收系数在颗粒物吸收中占重要位置,而冬季以非藻类颗粒物为主导. 对不同季节水体吸收特性进行研究可以更好地了解水体光学特性,其在水环境的治理和水体生态系统的恢复,以及不同季节生物-光学模型的建立等方面具有重要意义.

梅梁湾位于太湖北部,地处无锡市郊,面积 132 km²,平均水深 2.0 m,是无锡市主要水源地. 由于受到周边入湖河道工业污水排放的影响,加上该湖区与大太湖水体交换滞后,使得该湖区水体严重富营养化,蓝藻水华连年暴发,特别是夏、秋季节湾内滋生大量蓝藻水华. 本试验以该湖区水体为对象,利用 2006 年 8 月、11 月份和 2007 年 3 月份太湖梅梁湾采集的水样分析数据,对该区域水体吸收特性的季节性差异进行研究,重点探讨该水域春、夏、秋 3 个季节水体中总颗粒物、非藻类颗粒、浮游藻类以及 CDOM 的吸收特性,并在此基础上,以非藻类颗粒物、浮游藻类和 CDOM 在光合有效辐射波段范围(400~700 nm)的平均吸收系数为参数,分析不同季节影响水下光照的主导因子,以期利用水体的固有光学特性进行该湖区水质参数的分季节遥感反演提供理论依据,并为该湖区的环境监测和水体生态环境治理、修复提供参考资料.

1 材料与方法

1.1 采样时间和点位分布

2006 年 8 月 16~17 日、11 月 5 日、2007 年 3 月 29 日对梅梁湾 13 个点位(图 1)进行水样采集,采集的样品放入存储箱内保存,当天带回实验室进行过滤处理,测定各种水质参数. 采集水样的同时,利用自动风速风向仪实时测定风速风向.

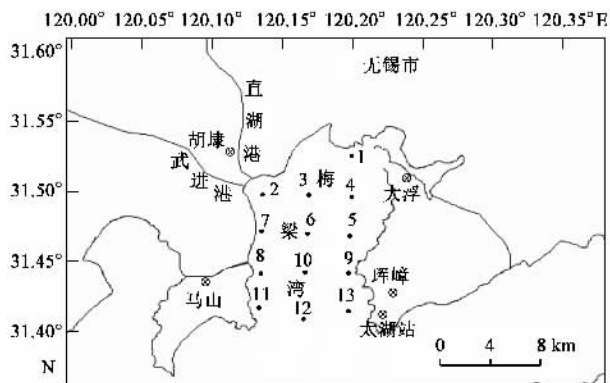


图 1 采样点分布

Fig. 1 Distribution of sample stations

1.2 测定参数

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、叶绿素 a 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、浮游藻类吸收系数.

黄质吸收系数的测定使用 0.22 μm 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,然后利用下面公式计算各波长的吸收系数^[21],并做散射校正:

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

$$a(\lambda) = a(\lambda') - a(750) \lambda / 750 \quad (2)$$

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 47 mm 的 GF/F 滤膜(Whatman 公司)过滤 200~400 mL 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 750 nm 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:

$$a_p(\lambda) = 2.303 \frac{l}{v} D_s(\lambda) \quad (3)$$

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

量取相同体积的水样,用一定体积的次氯酸钠漂白水体中的藻类,漂白 15 min 后用 GF/F 过滤膜过滤漂白过的水样,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 $a_n(\lambda)$. 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

数计算浮游藻类的光谱吸收系数 $a_{ph}(\lambda)$:

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

叶绿素浓度的测定采用“热乙醇法”,总悬浮物、有机悬浮物和无机悬浮物浓度的测定采用灼烧称重法。

1.3 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^[10],可表示为:

$$a_x(\lambda) = a_x(\lambda_0) \exp[-S_x(\lambda_0 - \lambda)] \quad (5)$$

式中,下标 x 分别用 d 和 g 代表时,为非藻类颗粒物和 CDOM, $a_x(\lambda)$ 为 λ 波长下吸收系数, λ 为波长, λ_0 为参照波长,一般取 400 nm 或 440 nm,文中取 440 nm. $a_x(\lambda_0)$ 为参考波长下的吸收系数, S_x 是指数函数曲线斜率. 利用最小二乘法拟合得到 S_x 值,其中非藻类颗粒物的拟合波段范围为 400 ~ 700 nm, CDOM 拟合的波段范围为 280 ~ 550 nm.

2 结果与分析

2.1 总颗粒物吸收特性季节差异

不同季节,总颗粒物吸收系数的光谱特征和数值都存在较大差异.图 2 给出春、夏、秋 3 个季节的总颗粒物吸收系数曲线.从中可以看出不同季节总颗粒物的吸收系数具有明显的差异,夏季大部分采样

点表现出藻类的吸收曲线特征,在 440 nm 和 675 nm 附近有明显的吸收峰,在 550 nm 附近有吸收谷,而春季除在 675 nm 处有微弱的反射峰外,其他波段都表现出非藻类颗粒的吸收特性.随波段呈指数衰减,秋季大部分采样点同时表现出了藻类和非藻类颗粒物吸收曲线的共同特征,在 675 nm 有较强的吸收峰,在 550 nm 处有明显的吸收谷;而在 400 ~ 500 nm 波段范围内表现出非藻类颗粒的吸收特征,吸收系数随波段呈指数衰减.

表 1 给出了不同季节总悬浮颗粒物在 440 nm 和 675 nm 波段的吸收系数以及水体各组分含量.从数值上看,不同季节,总悬浮颗粒物吸收系数具有较大差异,其中夏季吸收系数最大,秋季次之,春季最小.从空间分布上看,夏季不同点位之间的吸收系数空间差异较大,而春、秋季空间差异相对较小.形成不同季节吸收系数数值和空间分布的差异性的主要原因是,由于不同季节水体组分的含量不同和空间分布不同导致的.从不同季节的水质参数可以看出,夏季梅梁湾水体悬浮物和浮游藻类含量都很高,尤其是浮游藻类含量要明显高于春、秋季节;且夏季水体受到风力影响,水动力复杂,使得该季节水质参数空间差异较大导致的.

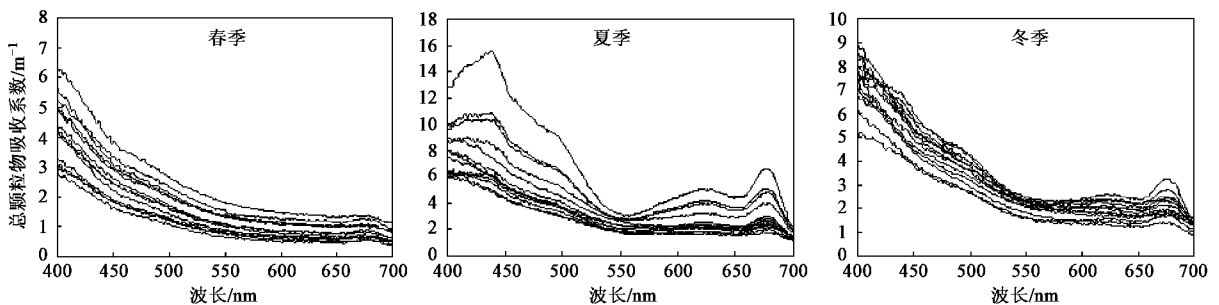


图 2 不同季节总颗粒物吸收系数曲线

Fig.2 Absorption curve of total particles in different seasons

表 1 不同季节总悬浮颗粒物 440 nm 和 675 nm 吸收系数及水质参数

Table 1 Total suspend sediment absorption in band 440 nm and 675 nm and water quality of different seasons

季节	$a_p(440) \text{ m}^{-1}$		$a_p(675) \text{ m}^{-1}$		悬浮物浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$		叶绿素浓度/ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	
	变化范围	平均值	变化范围	平均值	变化范围	平均值	变化范围	平均值
春季	1.89 ~ 4.3	2.86 ± 0.73	0.54 ~ 1.36	0.85 ± 0.27	13.4 ~ 40.1	23.94 ± 8.87	1.09 ~ 7.27	3.98 ± 1.84
夏季	4.88 ~ 15.37	7.49 ± 3.0	1.78 ~ 6.6	3.23 ± 1.43	27.91 ~ 87.6	55.33 ± 14.65	37.43 ~ 299.6	141.9 ± 75.7
秋季	4.16 ~ 6.8	5.53 ± 0.83	1.37 ~ 3.25	2.13 ± 0.51	24.2 ~ 70.53	45.65 ± 14.51	16.72 ~ 84.72	42.18 ± 19.84

分析浮游藻类和非藻类颗粒对总颗粒物吸收系数的贡献,可将总悬浮颗粒的吸收类型分类成 3 种类型,即①非色素颗粒物吸收主导型、②浮游藻类吸收主导型、③两者共同作用型.图 3 为不同季节总悬

浮颗粒物、非色素颗粒物和浮游藻类平均吸收曲线.从中可以看出,不同季节,总悬浮颗粒物吸收系数的主导因子不同,春季非色素颗粒物的吸收系数要明显大于浮游藻类,使得总悬浮颗粒物吸收系数除在

675 nm 附近出现微弱的峰值外,其他波段范围呈现出非藻类颗粒物的光谱特征,属于类型①.夏季由于浮游藻类含量很高,浮游藻类吸收系数明显大于非色素颗粒物,总颗粒物吸收系数呈现出浮游藻类吸收系数曲线特征,在 440 nm 和 675 nm 附近都出现明显的峰值,550 nm 附近有明显的谷值,属类型②.

秋季,总悬浮颗粒物吸收系数呈现出非色素颗粒物与浮游藻类的综合特征,在 440 nm 附近,由于非色素颗粒物影响较大,峰值不明显,在 550 nm 和 675 nm 附近,浮游藻类的影响较大,出现明显的谷值和峰值,总悬浮颗粒物吸收系数受到两者的共同影响.在不同波段,两者的影响大小不同,属于类型③.

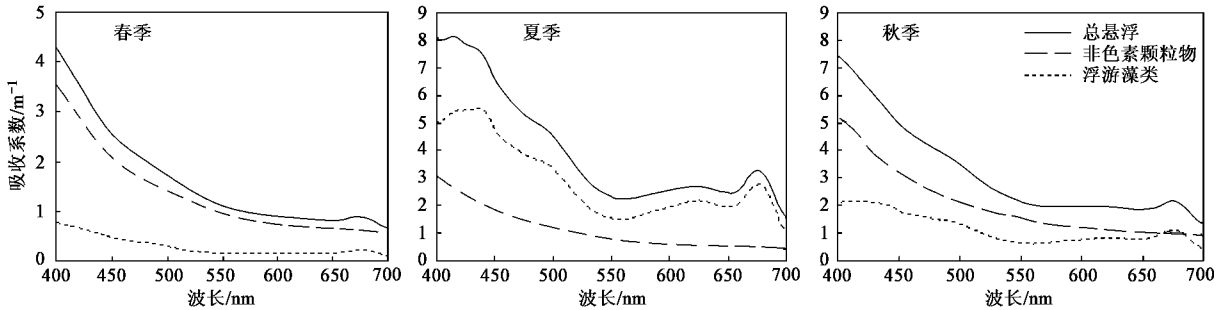


图3 不同季节颗粒物吸收平均曲线

Fig.3 Average absorption curve of different matter in different seasons

2.2 非色素颗粒物吸收特性季节差异分析

图4为不同季节非色素颗粒吸收曲线.从吸收曲线可以看出3季节吸收曲线相似,吸收系数都随波长的增加呈指数衰减,其差异性主要表现在吸收系数大小和曲线斜率 S 上,且各季节差异相对较

小.从不同季节吸收曲线的分布情况来看,夏季曲线分布较为分散,而春、秋季季节吸收曲线分布相对较为集中,这是由于夏季各样点非色素颗粒物吸收系数空间差异较大导致的.

表2为不同季节非色素颗粒物在 440 nm 处的

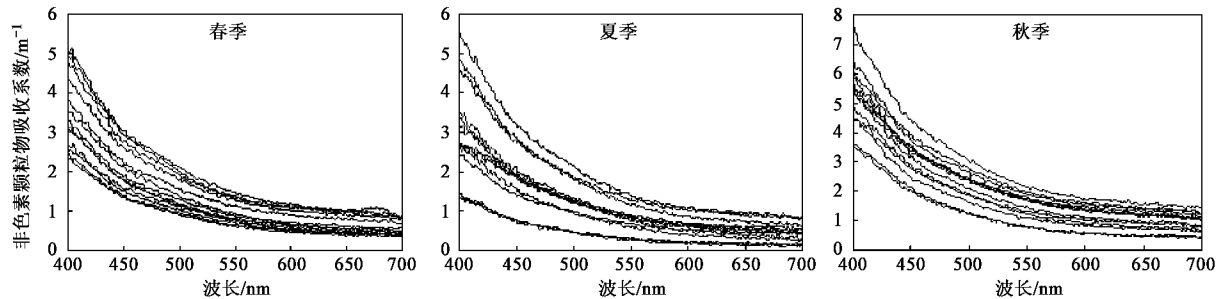


图4 不同季节非藻类颗粒吸收曲线

Fig.4 Absorption curve of non-algal particles in different seasons

吸收系数以及曲线斜率 S 值.从中可以看出,秋季吸收系数要大于春、夏两季节,而 S 值夏季最大.造成吸收系数和 S 值的季节差异性主要是由于不同季节非色素颗粒物组分和浓度的不同.夏季,太湖流域降水较多,而梅梁湾湖区分布多条入湖河流,使得非色素颗粒物来源复杂,导致 S 值及其空间变化较大.秋季的吸收系数较大可能是由于夏季浮游藻类大量繁殖,而到秋季由于气候的变化,使得浮游藻类大量死亡,降解为非藻类颗粒物导致的.

对不同季节 440 nm 处吸收系数 $a_d(440)$ 和 S 值与总悬浮物和无机悬浮物的相关性进行分析,得出

表2 不同季节非色素颗粒物 440 nm 吸收系数及指数斜率 S 值

Table 2 Absorption in band 440 nm of non-alga particles and exponent slope S value in different seasons

季节	$a_d(440)/\text{m}^{-1}$		$S/\mu\text{m}^{-1}$	
	变化范围	平均值	变化范围	平均值
春季	1.52 ~ 3.42	2.24 ± 0.59	5.7 ~ 7.4	6.38 ± 0.57
夏季	0.87 ~ 3.5	2.0 ± 0.89	6.0 ~ 8.9	7.19 ± 0.92
秋季	2.26 ~ 4.88	3.5 ± 0.75	5.3 ~ 7.8	6.24 ± 0.86

不同季节 $a_d(440)$ 与总悬浮物和无机悬浮物的相关性存在较大差异,春季 $a_d(440)$ 与总悬浮物和无机悬浮物呈很好相关性,相关系数均达到 0.95 以上;

夏季 $a_d(440)$ 与总悬浮物和无机悬浮物的相关系数分别为 0.23、0.61 秋季 $a_d(440)$ 与总悬浮物和无机悬浮物的相关系数分别为 0.13、0.63, 由此可以看出 3 个季节 $a_d(440)$ 与无机悬浮物相关性都较好, 但春季的相关性明显好于其他 2 个季节, 分析其原因可能是由于夏、秋季节浮游藻类含量较高, 成分复杂, 藻类漂白不充分或部分色素无法漂白, 干扰了非藻类颗粒物的吸收系数, 而春季浮游藻类含量较低, 对色素的漂白相对较充分导致的. 夏、秋季节 $a_d(440)$ 与总悬浮物相关性较差, 其原因主要是由于这 2 个季节有机悬浮物含量较高造成的. 3 个季节 S 值与总悬浮和无机悬浮浓度的相关性都较差, 由此可以推测 S 值季节差异的主要原因可能是非藻类颗粒物的组成不同引起的.

2.3 浮游藻类颗粒吸收特性季节差异分析

浮游藻类光谱吸收曲线由进行光合作用的活性叶绿素 a 和其他辅助色素浓度决定, 而它们的浓度随着水体环境和藻类的不同而变化. 图 5 为不同季节浮游藻类吸收曲线. 从中可以看出, 不同季节由于

水体中藻类浓度和组成的差异, 导致吸收曲线形状和吸收系数都存在较大的差异性, 即夏季所有采样点吸收曲线在 440 nm 和 675 nm 附近有吸收峰, 在 550 nm 附近有吸收谷, 春季除在 675 nm 附近有吸收峰外, 大部分点吸收曲线在 440 nm 附近的吸收峰不明显或消失, 而秋季采样点却同时出现了春季和夏季的吸收曲线特征. 其中春季和秋季部分点吸收曲线在 440 nm 吸收峰不明显, 其原因可能是由于这些采样点总颗粒物吸收曲线属于非藻类颗粒物主导型, 藻类含量较低引起的. 赵巧华等^[21]指出, 部分浮游藻类吸收系数在 400~520 nm 范围具有非藻类颗粒物吸收的特点是由于在藻类提取时, 将非藻类颗粒物中的其他色素一并提取, 从而放大了浮游藻类的吸收系数造成的, 对于非藻类颗粒物来源丰富的内陆湖泊而言, 其放大效应更为明显. 春季有机悬浮物含量比例较小, 藻类含量较低, 使得非藻类颗粒物的这种放大现象可能成为导致藻类系数吸收在 440 nm 吸收峰不明显的原因之一.

表 3 为不同季节浮游藻类在 440 nm 和 675 nm

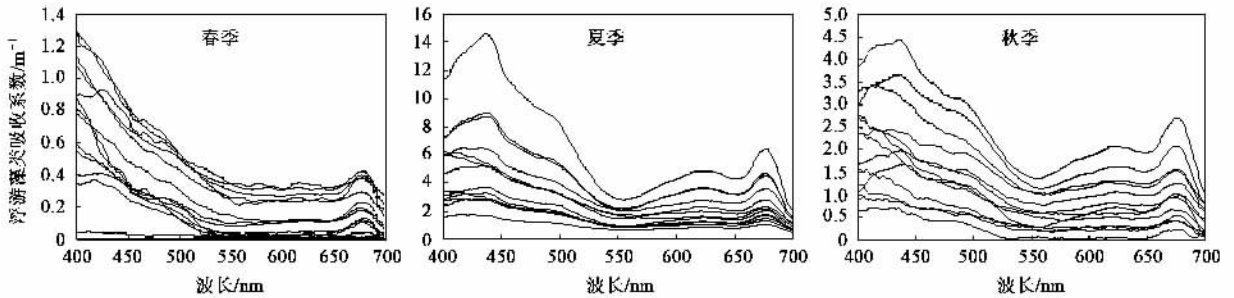


图 5 不同季节浮游藻类吸收曲线

Fig.5 Absorption curve of phytoplankton in different season

处的吸收系数. 从中可以看出, 夏季浮游藻类吸收系数要明显大于春、秋季节, 且空间分布的差异性也要大于春、秋季节. 这主要是夏季气温较高, 光照条件较好, 使得浮游藻类大量繁殖导致的. 从表 1 中叶绿素浓度可以看出, 夏季的叶绿素浓度及其空间分布差异都要大于春、秋季节. 秋季浮游藻类吸收系数大于春季, 主要是由于秋季浮游藻类含量高于春季引起的. 夏季藻类大量繁殖, 在秋季虽有大量藻类死亡, 但浮游藻类的含量相对仍然较高. 浮游藻类在冬季后进入休眠期, 水体浮游藻类含量很低, 大部分沉积在湖底, 春季温度随有所升高, 但由于冬季水体中浮游藻类含量很低, 藻类繁殖速度较慢, 使得春季水体中浮游藻类含量要低于秋季.

分析各季节浮游藻类 440 nm 和 675 nm 处吸收

系数与有机悬浮物和叶绿素浓度相关性, 得出春、夏两季节两者与有机悬浮物浓度都有较好的相关性, 440 nm 吸收系数与有机悬浮物相关系数分别为 0.79、0.74, 675 nm 处吸收系数与有机悬浮物的相关系数分别为 0.65、0.82, 而秋季二者与有机悬浮物的相关性相对较差, 相关系数分别为 0.44、0.56. 3 个季

表 3 不同季节总悬浮物颗粒物吸收系数

Table 3 Absorption in band 440 nm and 675 nm of phytoplankton in different seasons

季节	$a_{ph}(440) m^{-1}$		$a_{ph}(675) m^{-1}$	
	变化范围	平均值	变化范围	平均值
春季	0.31 ~ 1.05	0.62 ± 0.25	0.05 ~ 0.41	0.25 ± 0.13
夏季	1.73 ~ 14.4	5.49 ± 3.5	1.08 ~ 6.43	2.75 ± 1.58
秋季	0.63 ~ 4.5	2.03 ± 1.14	0.16 ~ 2.7	1.1 ± 0.71

节中,夏季吸收系数与叶绿素相关性最好,440 nm 和 675 nm 处吸收系数与叶绿素浓度相关系数分别为 0.79、0.85,而春、秋两季节两者与叶绿素相关性较差,相关系数均在 0.4 以下.这种差异主要由不同季节藻类含量和藻种的差异所导致,夏季藻类含量较高,且有明显的优势藻种^[23],使得吸收系数与有机悬浮物和叶绿素 a 的相关性都较高,而春季主要是由于藻类含量较低,没有绝对优势藻种,其他辅助色素的干扰相对较大,从而导致春季吸收系数虽然与有机悬浮物相关性较好,与叶绿素 a 浓度相关性却相对较差.这也是导致浮游藻类吸收系数在春季 440 nm 处不明显或消失的原因之一.王桂芬等^[24]对南海北部藻类粒径结构和色素组成对浮游藻类吸收系数的影响的研究中,发现浮游藻类中辅助色素对浮游藻类总吸收的贡献主要在蓝绿光波段,贡献率

平均可达 30%,部分水域非叶绿素 a 贡献率高达 50% 以上,并认为藻类吸收系数与叶绿素 a 相关性的时空差异主要是受到藻类种群、色素组成等因素的影响而导致的. Shubha 等^[25]对阿拉伯海不同季节藻类光学特性的研究也得出类似的结论.秋季浮游藻类大量死亡,虽有机物含量较高,但是可进行光合作用的活体叶绿素 a 却相对较低,使得浮游藻类吸收系数与有机悬浮物和叶绿素 a 的相关性都较差.

2.4 CDOM 吸收特性季节差异分析

CDOM 的吸收曲线与非藻类颗粒物吸收曲线相似(图 6) 随波段的增加呈指数逐渐递减规律,从中可以看出,不同季节 CDOM 对光谱的吸收主要都表现在短波的紫外光和蓝光波段,到 550 nm 后,其吸收系数接近于 0.但不同季节吸收系数,特别是在短波紫外波段的吸收系数具有明显的差异性.

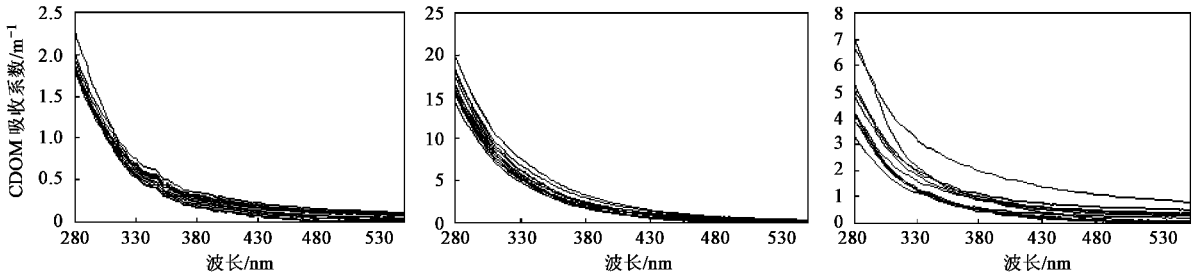


图 6 不同季节 CDOM 吸收系数曲线

Fig.6 Absorption curve of CDOM in different seasons

表 4 为不同季节 CDOM 在 280 nm 和 355 nm 吸收系数以及不同季节吸收曲线斜率 S 值.不同季节 CDOM 吸收系数的差异主要表现为吸收系数数值的差异和 S 值的差异,这主要是由于水体中 CDOM 浓度和组成不同引起的.而不同水体,同一水体不同季节 CDOM 浓度和组成的差异主要是由于其来源的不同导致^[15,17].张运林等^[26]对太湖梅梁湾 CDOM 吸收系数的研究认为,该湖区 CDOM 主要来源于入湖河流,以陆源为主,湾内部分点浮游藻类的降解也是 CDOM 来源之一.在对典型藻、草型湖区的 CDOM 吸收特性的研究中,认为由于两湖区的 S 值差异不大,可以认为两湖区 CDOM 的组成和来源相似^[13];

马荣华等^[27]对东太湖的 CDOM 吸收特性的研究,则认为浮游植物的降解是该水域 CDOM 的主要来源,对 CDOM 的吸收起主导作用.对于梅梁湾而言,不同季节 CDOM 的来源具有一定的差异性,春季有机悬浮物含量较小,藻类含量低,CDOM 主要来源于入湖河流和工农业污水排放;夏季入湖河流上游降雨量的增大,导致入湖河流流量的增强,且夏季藻类大量繁殖,有机物含量较高,入湖河流和浮游藻类的降解都成为 CDOM 的主要来源.秋季降雨量相对减小,浮游藻类含量虽仍然较高,但与夏季相比却有所下降.由于上述原因,使得夏季 CDOM 吸收系数最大,秋季次之,春季最小. S 值的差异主要是由于不同季节

表 4 不同季节 CDOM 280 nm 和 355 nm 吸收系数及指数斜率 S 值

Table 4 Absorption of CDOM in band 280 nm, 355 nm and its exponent slope S value in different seasons

季节	$a_{\text{CDOM}}(280 \text{ nm})/\text{m}^{-1}$		$a_{\text{CDOM}}(355 \text{ nm})/\text{m}^{-1}$		$S/\mu\text{m}^{-1}$	
	变化范围	平均值	变化范围	平均值	变化范围	平均值
春季	1.78 ~ 2.3	1.89 ± 0.14	0.27 ~ 0.48	0.37 ± 0.07	10.9 ~ 23	14.25 ± 3.97
夏季	14.41 ~ 20.03	16.6 ± 1.52	2.85 ~ 5.0	3.59 ± 0.63	15.4 ~ 25	19.55 ± 3.78
秋季	3.33 ~ 7.22	4.78 ± 1.13	0.74 ~ 2.48	1.13 ± 0.5	7.8 ~ 19.4	13.85 ± 1.45

CDOM 组成的不同导致的。

2.5 不同季节各组分吸收对总吸收的贡献

由上面分析可知,水体光谱总吸收是由非藻类颗粒物、浮游藻类和 CDOM 共同作用的,非藻类颗粒物的吸收主要是无机悬浮物产生的,浮游藻类的吸收主要是由于活性叶绿素 a 产生的,不同季节,水体中各组分的含量不同,导致其对水下光照吸收相对贡献率的变化。为了研究不同季节水体光谱吸收主导因子的差异,本研究分析了不同季节不同组分对

水体光谱总吸收的贡献差异。由于不同组分的吸收曲线不同,故选用总颗粒物与 CDOM 在光合有效辐射(PAR)波段范围(400~700 nm)的平均吸收系数之和作为水体光谱总吸收,以非藻类颗粒物、浮游藻类和 CDOM 在该波段范围内平均吸收系数与总吸收系数的比值作为各自对总吸收的贡献率,从而分析不同季节水体总吸收的主导因子。图 7 给出了不同季节 13 个样本中各组分对总吸收贡献率曲线。

从图 7 可以看出,不同季节,水体各组分对总吸

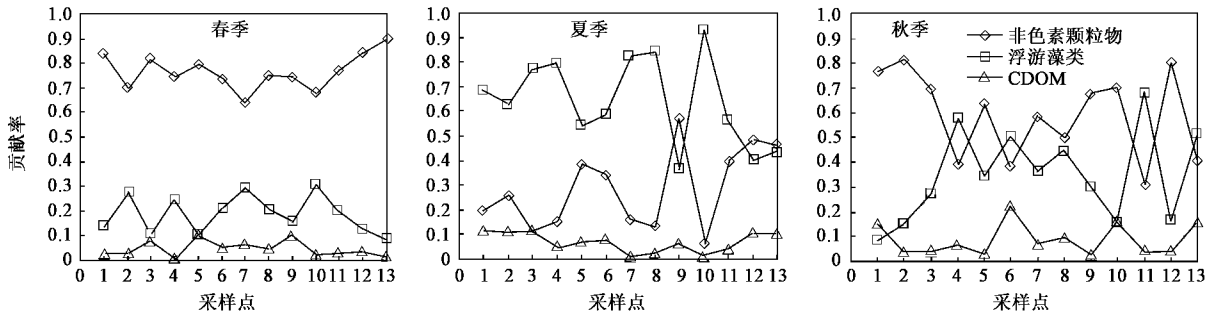


图 7 不同季节水体各组分吸收对总吸收的贡献

Fig. 7 Contributions to total absorption of each composition in different season

收的贡献率都存在较大差异,春季非藻类颗粒物的贡献率明显大于浮游藻类和 CDOM,所有采样点对总吸收的平均贡献率高达 0.766 ± 0.072 ,而浮游藻类和 CDOM 的平均贡献率分别只有 0.188 ± 0.074 、 0.046 ± 0.03 。夏季大部分采样点浮游藻类的贡献率要大于非藻类颗粒物和 CDOM,其平均贡献率为 0.664 ± 0.182 ,而非藻类颗粒物和 CDOM 的平均贡献率为 0.287 ± 0.165 、 0.069 ± 0.039 。秋季不同采样点各组分贡献率的差异较大,非藻类颗粒物、浮游藻类、CDOM 贡献率的变化范围分别为 $0.31 \sim 0.825$ 、 $0.086 \sim 0.66$ 、 $0.019 \sim 0.098$,但总体上非藻类颗粒物贡献率要高于浮游藻类,其平均贡献率为 0.599 ± 0.176 ,而浮游藻类和 CDOM 的平均贡献率分别为 0.326 ± 0.17 、 0.075 ± 0.06 。从分析结果可以看出,春季非藻类颗粒物的贡献率占绝对优势而成为水体光谱吸收的主导因子,夏季浮游藻类贡献率要大于非藻类颗粒物,是水下光谱吸收的主要因素,但非藻类颗粒物也有较大影响,秋季则反之,非藻类颗粒物是水下光谱的主要影响因子,而浮游藻类影响也较大。3 个季节 CDOM 对水体总吸收的贡献率都较小,均在 0.1 以下。

3 结论

(1) 总颗粒物吸收系数夏季最大,春季最小。其

吸收曲线可分为 3 种类型,即非藻类颗粒物主导型、浮游藻类吸收主导型和两者共同作用型。春季属于非藻类颗粒物吸收主导型,而夏季多为浮游藻类吸收主导型,秋季属于两者共同作用型。

(2) 3 个季节非藻类颗粒物的吸收特性差异相对较小,其差异主要表现为吸收系数和吸收曲线斜率 S 值的差异。其在 440 nm 处吸收系数与无机悬浮物浓度在 3 个季节都表现出较好的相关性,表明非藻类颗粒物吸收主要为无机悬浮物的吸收,不同季节由于藻类的影响,使得其相关性有所差异。

(3) 浮游藻类吸收系数在不同季节具有明显的差异性,夏季由于其藻类含量较大,且有明显的优势种群,使得其吸收系数最大,且在 440 nm 和 675 nm 处具有明显的吸收峰,而春季和秋季部分采样点的吸收曲线出现在 440 nm 处吸收峰不明显甚至消失的现象。

(4) 由于不同季节 CDOM 来源不同,而导致其浓度和成分的不同,使得 CDOM 在不同季节其吸收系数与吸收曲线斜率 S 值有所差异,夏季吸收系数最大,春季最小。 S 值最大值也出现在夏季,但春、秋两季节 S 值差别不大。

(5) 不同季节,水体中各组分对水下光谱吸收的贡献率不同,春季非藻类颗粒物吸收系数在水体总吸收中占绝对优势而成为光谱吸收的主导因子,

夏季由于其藻类含量较高,使得浮游藻类成为水体光谱的主要影响因素,但非藻类颗粒物影响也有较大影响,秋季则反之,非藻类颗粒物成为重要影响因子,浮游藻类影响也较大,3个季节CDOM对水下光谱的影响都较小,且季节变化不明显。

参考文献:

- [1] 张运林,秦伯强,陈伟民,等.太湖水体光学衰减系数的特征及参数化[J].海洋与湖沼,2004,35(3):209-213.
- [2] 丘仲锋,席红艳,何宜军,等.东海赤潮高发区半分析算法色素浓度反演[J].环境科学,2006,27(8):1516-1521.
- [3] 张运林,秦伯强.基于水体固有光学特性的太湖浮游植物色素的定量反演[J].环境科学,2006,27(12):2439-2444.
- [4] Bricaud A, Stramski D. Spectral absorption coefficients of living phytoplankton and non-algal biogenous matter: A comparison between the Peru upwelling area and Sargasso Sea[J]. Limnol Oceanogr, 1990, 35(3):562-582.
- [5] Stramski D, Rassoulzadegan F, Kiefer D A. Changes in the optical properties of a particle suspension caused by protist grazing[J]. Journal of Plankton Research, 1992, 14(7):961-977.
- [6] Stramski D, Wozniak S B. Optical properties of Asian mineral dust suspended in seawater[J]. Limnol Oceanogr, 2004, 49(3):749-755.
- [7] Duarte C M, Agusti S, Kalf J. Particulate light absorption and the prediction of phytoplankton biomass and planktonic metabolism in northeastern Spanish aquatic ecosystems[J]. Can J Fish Aquat Sci, 2000, 57:25-33.
- [8] Maske H, Latasa M. Solar ultraviolet radiation dependent decrease of particle light absorption and pigment in lake phytoplankton[J]. Can J Fish Aquat Sci, 1997, 54:697-704.
- [9] 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.
- [10] 张运林,秦伯强,杨龙元.太湖梅梁湾水体悬浮颗粒物和CDOM的吸收特性[J].生态学报,2006,26(12):3969-3979.
- [11] 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[J].科学通报,2003,48(17):1876-1882.
- [12] 赵巧华,张运林,秦伯强.太湖梅梁湾水体中介质吸收谱特性的空间变化[J].湖泊科学,2006,18(6):627-635.
- [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[J].环境科学,2005,26(2):142-147.
- [14] Tempomeras M, Kristiansen J, Moutsaka-Gouni M. Seasonal variation in phytoplankton composition and physical-chemical features of the shallow Lake Doirani, Macedonia, Greece[J]. Hydrobiologia, 2000, 424:109-122.
- [15] Carlos E, Castillo D, Coble P G. Seasonal variability of the colored dissolved organic matter during the 1994-95 NE and SW Monsoons in the Arabian Sea[J]. Deep-Sea Research II, 2000, 47:1563-1579.
- [16] Montecino V, Astoreca R, Alarcon G, et al. Bio-optical characteristics and primary productivity during upwelling and non-upwelling conditions in a highly productive coastal ecosystem off central Chile(-36°S)[J]. Deep-Sea Research II, 2004, 51:2413-2426.
- [17] Nelso N B, Siegel D A, Michaels A F. Seasonal dynamics of colored dissolved material in the Sargasso Sea[J]. Deep-Sea Research I, 1998, 45:931-957.
- [18] Churilova T Y, Beraeueva G P. Absorption of light by Phytoplankton, Detritus, and dissolved organic substances in the coastal region of the Black Sea (July-August 2002)[J]. Physical Oceanography, 2004, 14(4):221-233.
- [19] 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[J].水科学进展,2003,14(1):46-49.
- [20] 张运林.太湖水体生物-光学特性及其生态学意义[D].南京:中国科学院南京地理与湖泊研究所,2005.38-55.
- [21] Bricaud A, Morel A, Prieur L. Absorption by dissolved organic matter in the sea (yellow substance) in the UV and visible domain [J]. Limnol and Oceanogr, 1981, 26:43-53.
- [22] 赵巧华,张运林,秦伯强.太湖梅梁湾水体悬浮颗粒物吸收系数的分离[J].湖泊科学,2006,18(4):356-362.
- [23] 李军,刘丛强,肖化云,等.太湖北部夏季浮游藻类多样性与水质评价[J].生态环境,2006,15(3):453-456.
- [24] 王桂芬,曹文熙,许大志,等.南海北部藻类粒级结构及色素成分对浮游植物吸收系数的影响[J].海洋学报,2007,29(1):38-48.
- [25] Sathyendranath S, Stuart V, Irwin B D, et al. Seasonal variations in bio-optical properties of phytoplankton in the Arabian Sea[J]. Deep-Sea Research II, 1999, 46:633-653.
- [26] 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.
- [27] 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[J].湖泊科学,2005,17(2):120-126.