# 梅梁湾、大太湖夏季和冬季 CDOM 特征及可能来源分析

## 张运林 秦伯强

(中国科学院南京地理与湖泊研究所, 江苏 南京 210008)

摘要:基于 2004 年夏季水华暴发期和冬季在梅梁湾及大太湖各 2 次采样,分析了夏季、冬季 CDOM 的特征及其可能的来源,发现夏季 CDOM 吸收系数、叶绿素 a 浓度均明显高于冬季,DOC 浓度、CDOM 吸收系数 *a*(355)的变化范围分别为 5.17~12.42 mg/L、2.57~6.77 m<sup>-1</sup>,最大值均出现在冬季(12 月 15 日)的直湖港入湖口。CDOM 吸收系数与DOC 浓度、定标后的荧光值一般都存在显著正相关,但夏季由于受浮游植物降解的影响,与 DOC 浓度和荧光的相关性明显低于冬季。表征 CDOM 组成和来源的参数比吸收系数、M 值、S 值存在显著的季节差异,夏季吸收系数a<sup>\*</sup>(355)值明显要大于冬季,而 S 值、M 值则要小于冬季。夏季水华暴发时 CDOM 吸收系数与叶绿素 a 浓度存在正相关,浮游植物降解产物可能是水体中 CDOM 的重要来源;相反,冬季 CDOM 吸收系数呈现从梁溪河入湖口、湾内往湾口递减的趋势,其来源可能主要以陆源为主,受入湖河流的影响较大。

**关 键 词**: 梅梁湾; 太湖; 夏季; 冬季; CDOM; 来源 **中图分类号**: X524 **文献标识码**: A **文章编号**: 1001-6791 (2007) 03-0415-09

有色可溶性有机物(chromophoric dissolved organic matter, CDOM)为水体内的一类重要的光吸收物质,其浓度 和组成能显著改变水下光场。由于其在紫外光波段吸收最强,因而它限制了生物有害的 UV-B 辐射(280~320 nm)穿透深度,保护了水生生物,对水体生态系统有明显影响<sup>[1~3]</sup>。CDOM 的吸收还延展到可见光的蓝光部分, 与浮游植物和非藻类颗粒物的吸收重叠,干扰了浮游植物生物量、初级生产力和悬浮物的定量遥感<sup>[4,5]</sup>。 CDOM 光化学降解将原来比较难于被微生物分解利用的高分子组成物质分解成丙酮酸盐和其它低分子羟基化合物,为微生物提供赖以生长的碳源和氮源<sup>[6,7]</sup>,增强微生物活性,刺激微生物生长。此外,CDOM 主要以溶解 性有机碳(dissolved organic carbon, DOC)为主,对其研究有利于全球碳循环研究。随着水色遥感、UV-B 辐射环境 效应、微食物网和全球碳循环研究的深入,CDOM 的研究将受到越来越多的重视。

国内关于 CDOM 的研究开始集中于海洋,主要为水色遥感和全球碳循环研究服务<sup>[8~10]</sup>,近年来笔者在太 湖已开展了 CDOM 的研究,分析了梅梁湾和东太湖 CDOM 的空间差异以及 CDOM 吸收对紫外辐射衰减的贡 献<sup>[3,11]</sup>,但关于其季节演替以及本身特征和来源分析并不深入。本文根据夏、冬季各 2 次采样,重点探讨夏季 水华暴发和冬季 CDOM 特征并对其可能来源进行分析,为内陆水体水色遥感、湖泊生态过程以及碳的光学-生 物地球化学循环和碳通量的估算提供科学依据。

收稿日期: 2006-02-13; 修订日期: 2006-07-18

基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目(BK2006580);中国科学院优秀博士学位论文、院长奖获得者科研启动专项资金 资助项目;中国科学院南京地理与湖泊研究所所长科研专项基金资助项目

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

大湖站

KAC

#### 材料与方法 1

### 1.1 采样时间与站位

湖站

直湖港

大



k

梅梁湾地处江苏省无锡市郊,面积约132 km<sup>2</sup>,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(5~10月),夏秋季整个湾内滋生大量蓝藻水华, 有些年份甚至全年大量蓝藻漂浮,近年来夏季在大太湖也 经常观测到水华。

> 2004年7月28日、8月15日水华暴发期间分别在梅梁 湾、大太湖0~6#、9~13#,0~8#、K1#~K6#进行两 次夏季采样;同年11月16日、12月15日在梅梁湾、大太 湖0~8#、K1#~K6#进行两次冬季采样测定水体中 CDOM(图 1),其中 0~6 # 为太湖湖泊生态系统研究站(太湖 站)常规采样点,Kl # ~ K6 # 位于太湖站附近水域。样品采 集后放入冷藏箱内保存,当天带回实验室进行过滤处理, 并冷藏保存。对 CDOM 吸收系数、荧光值、DOC 以及叶绿 素 a (Chlorophyll a: Chla) 的测定在 2~3 d 内完成。

### 1.2 CDOM 吸收系数、DOC 和 Chla 浓度的测定

CDOM 的光谱吸收系数测定采用通过 GF/F 玻璃纤维滤膜过滤的水样在 UV-2401 分光光度计下测定其吸光 度,然后根据式(1)计算得到波长的吸收系数<sup>[12]</sup>。

$$u() = 2.303 D() / r$$

式中 a()为波长, 为未校正的吸收系数,  $m^{-1}$ ; D()为吸光度; r为光程路径, m。为了消除过滤清液中残 留细小颗粒物的散射,利用 700 nm 处吸收系数进行散射效应订正<sup>(13)</sup>。由于 CDOM 的浓度无法测定,最常用方 法是用 355 nm、375 nm 和 440 nm 等波长处的吸收系数来表示 CDOM 浓度, 为了便于与荧光值进行数值分析, 本 文用 a(355) 来表示 CDOM 浓度。

DOC 测定是用 GF/F 玻璃纤维滤膜过滤后的水样在 1020 型 TOC 仪上测定,仪器监测范围为 0.5~500 mg/L, 相对误差为 ±3 %。Chla 的测定采用分光光度法,样品经 GF/C 滤膜过滤,放入冰箱内冷冻 48 h 后,用 90 %的 热酒精萃取后,经过滤得到清液,在 UV-2401 分光光度计上测量吸光度并计算得 Chla 浓度<sup>[14]</sup>。

## 1.3 荧光的测定与定标

采用 355 nm 作为激发波长, 380~600 nm 作为发射光谱范围, 用 Mill-Q 水做参照, 使用 RF-5301 荧光光度 计 1 nm 间隔得到荧光光谱, 仪器夹缝宽度为 5 nm。采用 Hoge 等<sup>[15]</sup>提出的方法对荧光强度进行定标处理, 即 0.01 mg/L 硫酸奎宁的稀硫酸溶液定义为 10 个归一化荧光单位(N. H. U.), 可表示为

$$F_n(355) = ([F_{s}/R_s]/[F_{qs}/R_{qs}]) \times 10$$
(2)

式中  $F_n(355)$ 为 10 个归一化荧光单位;  $F_s$ 、 $F_x$ 分别为样品和硫酸奎宁 355 nm 激发波长、450 nm 发射波长的荧 光信号; R<sub>s</sub>、R<sub>a</sub>分别为样品和硫酸奎宁在 355 nm 激发波长、405 nm 发射波长的水拉曼信号。

1.4 比吸收系数  $a^*()$ 、M 值、指数函数斜率 S 值的计算

CDOM 比吸收系数  $(a^*()) = a()/DOC)$  表示单位 DOC 浓度的 CDOM 对光的吸收能力。表征 CDOM 分子量 大小的 M 值定义为 250 nm 和 365 nm 波长处吸收系数的比值(M = a(250)/a(365)), M 值越小对应的分子量则 越大<sup>/16/</sup>。CDOM 分子量的大小大致能反映腐质酸、富里酸在 CDOM 中的比例,因为腐质酸的分子量一般较大, 而富里酸则较小,因而 CDOM 分子量越大,腐质酸的比例就越高。

(1)

CDOM 光谱吸收基本上呈现指数衰减的规律, Bricaud 等<sup>(12)</sup>提出如下公式:

$$a() = a(_{0}) \exp[S(_{0} - )]$$
(3)

式中 a()为 CDOM 的吸收系数, m<sup>-1</sup>; 为波长, nm; <sub>0</sub>为参照波长, nm; *S*为指数函数曲线斜率参数, 本文 在 280 ~ 500 nm 波段采用非线性拟合得 *S* 值。

#### 1.5 数据分析与处理

运用 SPSS11.0 进行数据统计分析,包括计算平均值、标准差、方差分析、线性及非线性拟合等。在 4 次 测定中 7 月 28 日的 12 # 和 8 月 15 日的 K4 # Chla 浓度分别高达 446.8 µg/L、779.5 µg/L,明显高于其它测点, 属异常值,在分析中将其剔除。

## 2 结果与分析

#### 2.1 CDOM 时空分布

2004 年 7 月 28 日和8 月 15 日 355 nm 处 CDOM 吸收系数 *a* (355)的变化范围分别为 3.00 ~ 5.44 和 2.57 ~ 6.59 m<sup>-1</sup>; DOC 浓度的变化范围分别为 7.71 ~ 9.76 和 5.17 ~ 8.45 mg/L; Chla 浓度的变化范围分别为 45.9 ~ 216.9 和 19.1 ~ 157.1 µg/L。夏季 *a* (355)、DOC、Chla 的均值分别为 4.51 ±0.92 m<sup>-1</sup>、7.55 ±1.43 mg/L 和 105.7 ±47.4 µg/L。2004 年夏季水华暴发时 CDOM 的空间分布与 Chla 的分布较为一致,7月 28 日 a (355)的最高值为 5.44 m<sup>-1</sup>,出现在 Chla 浓度第二高值的 0 # 点,对应的 Chla 浓度为 207.5 µg/L,略低于 11 # 点的最高值 216.9 µg/L; 8 月 15 日的最高值为 6.59 m<sup>-1</sup>,出现在 Chla 最高值的 1 # 点,对应的 Chla 浓度为 157.1 µg/L; 7 月 28 日、8 月 15 日 *a* (355)的最低值分别 为 3.00 和 2.57 m<sup>-1</sup>,出现在 3 # 和8 # 点,均对应着 Chla 的最低值,分别为 45.9 和 19.1 µg/L。







对夏季 CDOM 吸收系数与浮游植物 Chla 浓度进行回归分析发现,两者存在正相关(图 2),CDOM 的浓度受 浮游植物变化的影响比较大。使用线性、指数、对数以及幂函数来拟合和模拟 CDOM 吸收系数随 Chla 浓度的 变化,发现幂函数拟合的相关性最高,并且拟合系数也非常接近。由于两次观测 Chla 浓度均非常高,除了河 流携带的陆源 CDOM 外,浮游植物残体腐烂降解的产物也是水体中 CDOM 的重要来源。另外 CDOM 是 DOC 的 重要组成部分,因而 Chla 与 DOC 也存在正相关,7月 28 日和 8 月 15 日的相关式分别为

DOC =  $0.007(\pm 0.003)$  Chla + 7.936( $\pm 0.338$ ) ( $R^2 = 0.42, N = 12, P < 0.05$ ) (4)

DOC = 
$$0.014(\pm 0.005)$$
 Chla + 5.086( $\pm 0.559$ ) ( $R^2 = 0.39$ ,  $N = 14$ ,  $P < 0.05$ ) (5)

由此可见,夏季水华暴发期浮游植物的降解产物也会影响到水体中 DOC 浓度的变化以及碳的生物地球化 学循环。

2004 年冬季 11 月 16 日、12 月 15 日 a(355)的变化范围分别为 2.75 ~ 5.36 m<sup>-1</sup>和 2.61 ~ 6.77 m<sup>-1</sup>; DOC 浓

度的变化范围分别为 7.83~10.53 mg/L 和 7.30~12.42 mg/L; Chla 的变化范围分别为 1.3~10.3µg/L 和 4.9~ 30.1µg/L。冬季 *a*(355)、DOC、Chla 的均值分别为 3.39 ±0.91 m<sup>-1</sup>、8.69 ±1.22 mg/L 和 10.6 ±6.4µg/L。与夏季 相比, *a*(355)、Chla 的值均有明显降低。

从 2004 年冬季 2 次采样的 *a*(355) 值空间分布来看,最高值和次高值均分别出现在直湖港和梁溪河的入湖 口的 6 #、0 #,明显大于湾内和大太湖的值(图 1、图 3),与 2003 年 12 月份在梅梁湾观测到的结果相似<sup>[3]</sup>。 *a*(355) 值、DOC 浓度的空间分布较为一致,但与 Chla 的空间分布迥异,对 CDOM 吸收系数与 Chla 进行统计分 析未发现两者存在显著性正相关,由此说明在冬季浮游植物浓度较低时,浮游植物自身降解的产物对水体中 CDOM 浓度的贡献很小,CDOM 主要以陆源为主,主要来自河流带来的流域土壤侵蚀、植被腐烂和周围城市工 农业生产生活的废水、污水。



图 3 CDOM 吸收系数和 DOC 浓度的空间分布 Fig. 3 Spatial distributions of *a*(355) and DOC concentration

#### 2.2 CDOM 吸收系数与 DOC 浓度、荧光关系

CDOM 代表了溶解性物质中有颜色的那部分,因而许多研究均显示 CDOM 吸收系数与 DOC 浓度存在显著的正相关<sup>[17~19]</sup>。从 2004 年夏、冬 4 次观测结果来看,其中有 3 次 *a* (355) 与 DOC 浓度存在正相关,只有在 Chla





浓度非常高的 7 月 28 日那次相关性不显著(图 4),且冬季相关性明显要高于水华暴发期的夏季。如果将夏季两次、冬季两次样点数据放在一块进行分析则发现夏季两者之间基本上没有什么相关性,而冬季则存在显著的正相关(*N* = 30, *R*<sup>2</sup> = 0.78, *P* < 0.0001),这与以往冬、春季的观测结果吻合<sup>[3,11]</sup>。从全年数据分析来看,两者也没有显著性正相关,造成 CDOM 吸收与 DOC 浓度相关性下降的主要原因可能来自于夏季浮游植物的大量生长,降解后产生大量无色的 DOC。在海洋里有时也发现 CDOM 吸收系数与 DOC 浓度没有相关性<sup>[20,21]</sup>,另外,Rochelle-Newall<sup>[22]</sup>1994 - 1997 年在 Chesapeake 湾的 7 次观测也发现,在 CDOM 吸收系数和 Chla 浓度存在正相关的 3 次样点中 DOC 浓度与 CDOM 吸收系数则不存在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与 DOC 的组成有关。

分析光的吸收能力,DOC 一般可分为有色的和无色的,有色和无色 DOC 占总 DOC 的比例随不同地区和来 源存在很大差异,如在大西洋中部无色的 DOC 占总 DOC 的比例大约是 50 %<sup>[17]</sup>,而在波罗的海南部却高达 70 %<sup>[18]</sup>。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。通 常,来自河流携带的陆源 DOC 含有更多的有色 DOC,而浮游植物自身降解产生 DOC 含有更多的无色 DOC<sup>[22]</sup>。 梅梁湾夏季由于浮游植物大量生长、腐烂降解,产生更多无色 DOC,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 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将丧失颜色,增加无色的 DOC 成分,即通常讲的光漂白作用,如 Vodaeck 等<sup>[23]</sup>发现在高度分层的水体中 CDOM 的光吸收特性将丧失 70 %。

表1 F<sub>n</sub>(355)与 CDOM 吸收系数 a(355)的线性关系式

Table 1 Linear regressions between  $F_n(355)$  and a(355)

时间	关系式	a(355)范围/m <sup>-1</sup>	п	$R^2$	Р
7月28日	$F_n(355) = 1.52(\pm 0.49) a(355) + 5.08(\pm 2.17)$	3.00 ~ 7.06	12	0.49	< 0.05
8月15日	$F_n(355) = 1.59(\pm 0.55) a(355) + 4.96(\pm 2.60)$	2.57~6.59	14	0.41	< 0.05
11月16日	$F_n(355) = 1.56(\pm 0.30) a(355) + 4.91(\pm 1.04)$	2.75~5.36	15	0.68	< 0.001
12月15日	$F_n(355) = 2.38(\pm 0.21) a(355) + 3.34(\pm 0.71)$	2.61~6.77	15	0.91	< 0.001
全部	$F_n(355) = 1.65(\pm 0.18) a(355) + 4.90(\pm 0.72)$	2.57~7.06	56	0.61	< 0.001

CDOM 在紫外短波光的激发下会发出长于吸收光波长的荧光。因而许多研究者均采用荧光来探测 CDOM 浓度、时空分布及组成,并建立了各自研究区域内荧光强度与吸收系数的定量线性关系<sup>[15,17,21~23]</sup>。2004 年夏、 冬季 4 次采样 *a*(355) 与 *F<sub>n</sub>*(355) 均存在线性相关,相关性跟吸收系数与 DOC 浓度的类似,即冬季相关性明显高 于夏季(表 1)。与 DOC 浓度不同之处就是 4 次以及全年数据均存在显著正相关,并且前 3 次以及全年数据回归 分析发现线性斜率和截距都相差不大,反映了即便 CDOM 来源和组成存在一定差异,但仍存在正相关,并且相 关式相对恒定,这为利用荧光遥感探测水体中 CDOM 浓度奠定了基础。

2.3 比吸收系数、S 值、M 值的变化

2004 年夏、冬两季比吸收系数  $a^*$  (355)的变化范围分 别为 0.36 ~ 0.90 L/(mg .m)(均值为 0.61 ±0.15 L/(mg m))和 0.31 ~ 0.54 L/(mg .m)(均值为 0.39 ±0.05 L/(mg m)); 280 ~ 500 nm 指数拟合的 *s* 值变化范围分别 为 14.0 ~ 18.5 µm<sup>-1</sup>(均值为 15.5 ±1.2 µm<sup>-1</sup>)和 14.3 ~ 20.1 µm<sup>-1</sup>(均值为 17.0 ±1.5 µm<sup>-1</sup>); *M* 值的变化范围为 5.59 ~ 8.65(均值为 6.88 ±0.75)和 7.09 ~ 8.99(均值为 8.09 ±0.56)。夏季吸收系数  $a^*$ (355)值明显大于冬季,而 *s* 值、*M* 值则夏季小于冬季。对两季 CDOM 比吸收系数  $a^*$ (355)值、*s* 值、*M* 值进行单要素组间方差分析(One-





Way Anova) 发现存在显著差异(P < 0.001),说明冬、夏季 CDOM 的组成和来源存在一定差异,具有明显季节变化。另外,尽管研究的水域和采样时间不一样,一些研究均发现 CDOM 吸收系数与 *s* 值存在负相关关系<sup>[24~26]</sup>,随吸收系数增加 *s* 值降低。如 Kowalczuk 等<sup>[26]</sup>利用在波罗的海的 11 年连续观测资料建立 *s* 值与 a(375)的双曲线函数,并由此可以通过单波长 CDOM 吸收系数的测定来粗略地估计 CDOM 的吸收光谱。研究进一步证实了 CDOM 吸收与 *s* 值的负相关关系(图 5)。

## 3 讨论

#### 3.1 CDOM 可能来源途径

夏季水华暴发期在梅梁湾和大太湖观测到 CDOM 吸收系数与 Chla 浓度存在正相关,这与富营养化湖泊 ——巢湖和远海的一些观测结果相似。李素菊 2002 年 9 月份在巢湖也观测到 CDOM 吸收系数与 Chla 浓度存在 正相关,对应着 Chla 浓度也较高,均值为 41.0 ±50.4 µg/L<sup>[27]</sup>。在远海 CDOM 浓度非常低,因受陆源的影响非 常小,CDOM 浓度与海洋生物活动密切相关,其来源主要以浮游植物腐烂降解产物为主,因而经常观测到 CDOM 吸收系数与 Chla 浓度存在显著正相关<sup>[28,29]</sup>,Kowalczuk<sup>[28]</sup>认为浮游植物降解形成的 CDOM 是总 CDOM 的 重要组成部分。Sasaki 等<sup>[30]</sup>认为 CDOM 是浮游植物细胞死亡降解后的副产品,尽管他们在 Funka 湾浮游植物水 华出现时没有发现 CDOM 吸收系数与 Chla 存在显著正相关,但水华出现后浮游植物、非藻类颗粒物和 CDOM 吸收系数先后依次出现峰值,说明水华出现时首先是浮游植物吸收增加,随着浮游植物的死亡,非藻类颗粒物 吸收系数增加,而到浮游植物细胞降解、水华结束时,CDOM 吸收系数开始增加。另外,Eheridge 等在 Quantuck 湾的研究发现当赤潮出现时 CDOM 吸收系数的变化与浮游植物吸收系数变化一致<sup>[31]</sup>。所有这些研究都在 证了在梅梁湾和大太湖夏季水华暴发时,浮游植物死亡降解的产物是水体中 CDOM 的重要来源这一结论。

当然夏季在梅梁湾和大太湖除了 Chla 影响对 CDOM 的贡献外,夏季河流陆源输入也会很大程度上影响到 CDOM 浓度。如 2004 年夏季在梁溪河口和湾内的 0 #、1 #、6 # 点 CDOM 吸收系数均较高,而在大太湖的 7 #、8 # 点 CDOM 吸收系数均较低。但是对于夏季河流陆源输入和浮游植物降解对水体中 CDOM 的贡献率有多大,其中哪种来源占主导有待进一步研究。

冬季 CDOM 吸收系数与 Chla 没有相关性,说明梅梁湾和大太湖夏、冬季 CDOM 来源存在差异,冬季水体中 CDOM 基本上以陆源为主,主要来自于入湖河流,最高值出现在河流入湖口,在 2003 年 12 月和 2004 年 4 月 藻类浓度比较低季节均观测到这种趋势<sup>[3,11]</sup>。而夏季除了入湖河流的影响外,浮游植物大量生长后的降解产物 也是水体中 CDOM 的重要来源。无独有偶,Rochelle-Newall 等<sup>[22]</sup>1994 - 1997 年在 Chesapeake 湾进行了 7 次采样 测定发现其中有 3 次 *a*(355) 与 Chla 存在正相关,而这 3 次均对应着春、夏季浮游植物 Chla 浓度较高的情况。 3.2 CDOM 组成变化

*M* 值能反映 CDOM 分子量大小,其值越小分子量则越大,夏季 *M* 值小于冬季,说明夏季 CDOM 分子量要 大于冬季,CDOM 中腐质酸的比例较高。尽管在大部分的研究中认为 *s* 值的变化很小,在水色遥感中对 CDOM 吸收系数进行参数化时常选择平均值 14.1 $\mu$ m<sup>-1</sup>来代替,但事实上不同水域、不同季节 *s* 值还是存在很大的差 异,反映了 CDOM 组成和生物光学特性的变化。从 2004 年夏、冬两季的观测结果来看,其均值为 16.28 ±1.54  $\mu$ m<sup>-1</sup>,高于 2004 年 4 月在东太湖、梅梁湾观测值<sup>[11]</sup>,从季节演替来看冬季值明显高于夏季值(*P* < 0.001),反 映了不同区域、不同时段 CDOM 组成存在一定的差异。此外,对 *s* 值有影响的还有波段的选择和光化学降解, 一般短波段拟合得到的 *s* 值要明显高于长波段<sup>[11]</sup>。关于光降解对 *s* 值的影响研究结果不甚一致,Vodaeck 等<sup>[23]</sup>在实验条件观测到光化学降解会降低 *s* 值,但其野外以及 De Haan<sup>[16]</sup>的观测结果却发现光化学降解会导 致 *s* 值增加。造成这种差异其实还是与 CDOM 组成有关,不同的 CDOM 其光化学降解的产物不甚一样,其光 吸收特性也存在差异,从而造成 *s* 值的变化不一样。Carder 等<sup>[32]</sup>曾发现来自密西西比河浑水流中富含富里酸 的海生样品其 *s* 值明显要高于来自于墨西哥湾富含腐质酸的海生样品。在梅梁湾夏季 *s* 值小于冬季也说明夏 季 CDOM 中腐质酸的比例相对较高。由于 *s* 值存在一定的时空差异,在进行高精度水质遥感时必须要引入 *s* 值的参数化方案。

比吸收系数、*S* 值、*M* 值均用来反映 CDOM 组成和来源,综们之间存在一定的关系。对 2004 年夏、冬季 观测到的比吸收系数  $a^*(355)$ 、*S* 值、*M* 值进行相关分析发现,比吸收系数与 *S* 值、*M* 值均存在显著性负相关 (图 6)。表征 CDOM 组成的 3 个参数(比吸收系数、*M* 值、*S* 值)的关系大致是:比吸收系数越大,*M* 值和 *S* 值就 越小,对应的 CDOM 分子量就越大,腐质酸的比例越高。关于 CDOM 比吸收系数与分子量之间关系,Yacobi 等<sup>[33]</sup>曾发现高的比吸收系数  $a^*(440)$  一般对应着高比例的大 CDOM 分子,进一步证实了本文的研究结果。



图 6 比吸收系数、M 值、S 值线性回归分析 Fig. 6 Linear regressions between  $a^*$  (355) and M, S values

## 4 结 论

2004 年夏、冬季 CDOM 共 4 次观测结果显示,夏季水华暴发时 CDOM 吸收系数与 Chla 浓度的空间分布较 为一致,吸收系数与 Chla 浓度存在正相关,除入湖河流的影响外,浮游植物降解产物可能是水体中 CDOM 的 重要来源;相反,冬季 CDOM 吸收系数呈现从河口、湾内往湾口递减的趋势,其来源则可能主要以陆源为主, 受入湖河流的影响。夏季 CDOM 吸收系数由于受浮游植物降解的影响,与 DOC 浓度、荧光值的相关性明显低 于冬季。反映 CDOM 组成的参数比吸收系数、*M* 值、*S* 值均存在显著季节差异,比吸收系数越大,*M* 值和 *S* 值就越小,对应的 CDOM 分子量就越大,腐质酸的比例越高。由于太湖 CDOM 来源复杂,关于水华暴发浮游植 物降解对 CDOM 的贡献率以及对 CDOM 组成参数比吸收系数、*M* 值、*S* 值的影响需采集水华回实验室进行降 解实验,从而验证野外观测的结果并定量反映浮游植物降解对总 CDOM 的贡献份额。

### 致谢: 季 江、龚志军、钱荣树参加样品的采集, 在此表示感谢。

#### 参考文献:

- Williamson C E, Stemberger R S, Morris D P. Ultraviolet radiation in North American lakes: Attenuation estimates from DOC measurements and implications for plankton communities[J]. Limnol Oceanogr, 1996, 41(5): 1024 - 1034.
- [2] Laurion I, Ventura M, Catalan J, et al. Attenuation of ultraviolet radiation in mountain lakes: Factors controlling the among and within-lake variability[J]. Limnol Oceanogr, 2000, 45: 1274 - 1288.
- [3] 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.
- [4] Carder KL, Hawes S K, Baker KA, et al. Reflectance model for quantifying chlorophyll a in the presence of productivity degradation products
   [J]. J Geophys Res, 1991, 96: 20599 20611.
- [5] Doxaran D, Froidefond J M, Lavender S, et al. Spectral signature of highly turbid waters Application with SPOT data to quantify suspended particulate matter concentrations[J]. Remote Sens Environ, 2002, 81: 149 161.
- [6] Gao H, Zeep R G Factors influencing photoreactions of dissolved organic matter in a coastal river of the southeastern United States[J]. Environ

Sci Technol, 1998, 32: 2940 - 2946.

- [7] Kieber D J. Photochemical production of biological substrates[A]. In de Mora S, Demers S, Vernet M eds, "The effect of UV radiation in the marine environment "[C]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. 130 - 148.
- [8] 吴永森,张士魁,张绪琴,等.海水黄色物质光吸收特性实验研究[J].海洋与湖沼,2002,33(4):402-406.
- [9] 陈楚群, 潘志林, 施 平. 海水光谱模拟及其在黄色物质遥感反演中的应用[J]. 热带海洋学报, 2003, 22(5): 33-39.
- [10] Callahan J, Dai M H, Chen R F, et al. Distribution of dissolved organic matter in the Pearl River Estuary, China [J]. Mar Chem, 2004, 89: 211 224.
- [11] 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.
- [12] Bricaud A, Morel A, Prieur L. Absorption by dissolved organic matter of the sea (yellow substance) in the UV and visible domain[J]. Limnol Oceanogr, 1981, 26: 43 - 53.
- [13] Green S, Blough N. Optical absorption and fluorescence properties of chomophoric dissolved organic matter in natural waters[J]. Limnol Oceanogr, 1994, 39(8): 1903 - 1916.
- [14] 陈宇炜,高锡云. 浮游植物叶绿素 a 含量测定方法的比较测定[J]. 湖泊科学, 2000, 12(2): 185 188.
- [15] Hoge F E, Vodacek A, Blough N V. Inherent optical properties of the ocean: retrieval of the absorption coefficient of chromophoric dissolved organic matter from fluorescence measurements[J]. Limnol Oceanogr, 1993, 38: 1394 - 1402.
- [16] De Haan H. Solar UV-light penetration and photodegradation of humic substances in peaty lake water [J]. Limnol Oceanogr, 1993, 38: 1072
   1076.
- [17] 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[J]. Limnol Oceanogr, 1995, 40: 411 - 415.
- [18] Ferrari GM, Dowell MD, Grossi S, et al. Relationship between the optical properties of chromophoric dissolved organic matter and total concentration of dissolved organic carbon in the southern Baltic Sea region[J]. Mar Chem, 1996, 55: 299 - 316.
- [19] Del Vecchio R, Blough N V. Spatial and seasonal distribution of chromophoric dissolved organic matter and dissolved organic carbon in the Middle Atlantic Bight [J]. Mar Chem, 2004, 89: 169 - 187.
- [20] Nelson N B, Siegel, D A, Michaels A F. Seasonal dynamics of colored dissolved organic material in the Sargasso Sea[J]. Deep-Sea Res Pt I, 1998, 45: 931 - 957.
- [21] Chen Z Q, Li Y, Pan J M. Distributions of colored dissolved organic matter and dissolved organic carbon in the Pearl River Estuary, China [J]. Cont Shelf Res, 2004, 24: 1845 - 1856.
- [22] Rochelle-Newall E J, Fisher T R. Chromophoric dissolved organic matter and dissolved organic carbon in Chesapeake Bay[J]. Mar Chem, 2002, 77: 23 - 41.
- [23] 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[J]. Limnol Oceanogr, 1997, 42: 674 - 686.
- [24] Del Castillo C E, Coble P G Seasonal variability of the colored dissolved organic matter during the 1994 ~ 1995 NE and SW Monsoons in the Arabian Sea[J]. Deep-Sea Research , 2000, 47: 1563 - 1579.
- [25] Rochelle-Newall E J, Delille B, Frankignoulle M, et al. Chromophoric dissolved organic matter in experimental mesocosms maintained under different pCO2 levels[J]. Mar Ecol Prog Ser, 2004, 272: 25 - 31.
- [26] Kowalczuk P, Stedmon C A, Markager S. Modeling absorption by CDOM in the Baltic Sea from season, salinity and chlorophyll [J]. Mar Chem, 2006, 101: 1 - 11.
- [27] 李素菊. 利用分析方法建立湖泊水质参数反演算法研究 ——以安徽巢湖为例[D]. 北京 :北京大学 , 2003.
- [28] Kowalczuk P. Seasonal variability of yellow substance absorption in the surface layer of the Baltic Sea[J]. J Geophys Res, 1999, 104: 30047 - 30058.
- [29] Kahru M, Mitchell B G Seasonal and nonseasonal variability of satellite-derived chlorophyll and dissolved organic matter concentration in the California Current [J]. J Geophys Res, 2001, 106: 2517 - 2529.
- [30] Sasaki H, Miyamura T, Saitoh S, et al. Seasonal variation of absorption by particles and colored dissolved organic matter (CDOM) in Funka Bay, southwestern Hokkaido, Japan[J]. Estuar Coast Shelf S, 2005, 64: 447 - 458.

- [31] Etheridge S M, Roesler C S. Temporal variations in phytoplankton, particulates, and colored dissolved organic material based on optical properties during a Long Island brown tide compared to an adjacent embayment [J]. Harmful Algae, 2004, 3: 331 - 342.
- [32] Carder KL, Steward R G, Harvey G R, et al. Marine humic and fulvic acids: Their effects on remote sensing of ocean chlorophyll[J]. Limnol Oceanogr, 1989, 34: 68 - 81.
- [33] 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]. Journal of Limnology, 2003, 62: 41 - 46.

## Feature of CDOM and its possible source in Meiliang bay and Da Taihu lake in Taihu lake in summer and winter<sup>\*</sup>

ZHANG Yun-lin, QIN Bo-qiang

(Nanjing Institute of Geography & Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

**Abstract :** The feature Chromophoric dissolved organic matter (CDOM) and its source in Meiliang bay and Da Taihu lake in Taihu Lake are analysed based on every 2 time s samplings in summer with algal bloom and winter. CDOM absorption coefficients and chlorophyll a concentration are significant higher in summer than winter. The DOC concentration and the CDOM absorption coefficients a(355) are in the range of 5. 17 - 12. 42 mg/L , 2. 57 - 6. 77 m<sup>-1</sup>, respectively, with the maxima at the mouth of Zhihu river on Dec. 15. Significant positive correlations are generally found within a(355), DOC concentration and normalized fluorescence  $F_n(355)$ . The determination coefficients between a(355), DOC concentrations and  $F_n(355)$  are significantly lower in summer than winter due to the phytoplankton degradation. As the parameters representing the CDOM composition and the source , the DOC-specific absorption coefficients  $a^*(355)$  are remarkably larger in summer than winter. However, M and S values are smaller in summer than winter with the seasonal variations. The spatial distribution of the CDOM absorption coefficients is found between a(355) and chlorophyll-a concentration in summer with algal bloom. A significant and positive correlation is found between a(355) and chlorophyll-a concentration is found between a(355) and chlorophyll a concentration is found between a(355) and chlorophyll a concentration is found between a(355)

Key words: Meiliang bay; Taihu lake; summer; winter; CDOM; source

<sup>\*</sup> The study is financially supported by the Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK2006580), and by Scientific Research Special Foundation for Excellent Doctoral Dissertation and Decanal Schalarship of the CAS and the Scientific Resarch Special Foundation from Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Acdemy of Sciences.