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

张运林[1,2] , 秦伯强[1] , 马荣华[1] , 朱广伟[1] , 张路[1,2] , 陈伟民[1]
(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所 ,南京 210008 ; 2. 中国科学院研究生院 ,北京 100039)

摘要 :2004 年 4 月对太湖典型草 藻型湖区东太湖和梅梁湾有色可溶性有机物(CDOM) 的吸收和荧光特性进行了研究 .通过实验测定方法得到东太湖和梅梁湾 CDOM 的光谱吸收系数及其荧光值 .结果表明 ,溶解性有机碳(DOC) 的浓度在 6.3 ~ 17.2 mg/ L 间变化 ,其均值为 9.08 ±2.66 mg/ L ;CDOM 在 280 nm 和 355 nm 的吸收系数分别为 11.2 ~ 32.6 m^{-1}(平均值 17.46 m^{-1} ±5.75 m^{-1}) 和 2.4 m ~ 8.3 m^{-1}(平均值 4.17 m^{-1} ±1.47 m^{-1}) ;355 nm 波长处 CDOM 的比吸收系数为 0.31 ~ 0.64 L•(mg• m) $^{-1}$,平均值 0.46 L•(mg• m) $^{-1}$ ±0.08 L•(mg• m) $^{-1}$ .355 nm 的激发波长 、450 nm 的发射波长处的荧光值的变化范围 0.50 ~ 3.91 nm^{-1}(平均值 1.32 nm^{-1} ±0.84 nm^{-1}) .2 类草 、藻型湖区的 DOC 浓度 、CDOM 吸收系数 、355 nm 处荧光值均存在显著性差异 ,但 CDOM 比吸收系数和指数函数斜率则没有显著性差异 ,由此则反映了 CDOM 来源的一致性 .CDOM 的吸收系数与 DOC 浓度的相关性随波长的降低而增加 ,在短波部分存在明显的正相关 .355 nm 处的荧光值 、DOC 浓度与 CDOM 吸收系数存在如下显著性的正相关关系 : $F_n(355) = 0.544(\pm 0.035)\, a(355) - 0.946(\pm 0.152)$, $DOC = 1.537(\pm 0.196)\, a(355) + 2.683(\pm 0.862)$ .280 ~ 500 nm 、280 ~ 360 nm 、360 ~ 440 nm 指数函数斜率分别为 14.37 μm^{-1} ±0.73 μm^{-1} 、19.17 μm^{-1} ±0.84 μm^{-1} 、13.38 μm^{-1} ±0.82 μm^{-1} .

关键词 :有色可溶性有机物(CDOM) ;荧光 ;溶解性有机碳(DOC) ;指数函数斜率 ;太湖
中图分类号 : X524 文献标识码 : A 文章编号 :0250-3301(2005) 02-0142-06

Chromophoric Dissolved Organic Matter Absorption Characteristics with Relation to Fluorescence in Typical Macrophyte, Algae Lake Zones of Lake Taihu

ZHANG Yun-lin[1,2] , QIN Bo-qiang[1] , MA Rong-hua[1] , ZHU Guang-wei[1] , ZHANG Lu[1,2] , CHEN Wei-min[1]
(1. Nanjing Institute of Geography & Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract : Chromophoric dissolved organic matter (CDOM) represents one of the primary light-absorbing species in natural waters and plays a critical in determining the aquatic light field. CDOM shows a featureless absorption spectrum that increases exponentially with decreasing wavelength, which limits the penetration of biologically damaging UV-B radiation (wavelength from 280 to 320 nm) in the water column, thus shielding aquatic organisms. CDOM absorption measurements and their relationship with dissolved organic carbon (DOC), and fluorescence are presented in typical macrophyte and algae lake zone of Lake Taihu based on a field investigation in April in 2004 and lab analysis. Absorption spectral of CDOM was measured from 240 to 800 nm using a Shimadzu UV-2401 PC UV-Vis recording spectrophotometer. Fluorescence with an excitation wavelength of 355 nm, an emission wavelength of 450 nm is measured using a Shimadzu 5301 spectrofluorometer. Concentrations of DOC ranged from 6.3 to 17.2 mg/ L with an average of 9.08 ±2.66 mg/ L. CDOM absorption coefficients at 280 nm and 355 nm were in the range of 11.2 ~ 32.6 m^{-1} (average 17.46 m^{-1} ± 5.75 m^{-1}) and 2.4 ~ 8.3 m^{-1} (average 4.17 m^{-1} ±1.47 m^{-1}), respectively. The values of the DOC-specific absorption coefficient at 355 nm ranged from 0.31 to 0.64 L•(mg• m) $^{-1}$. Fluorescence emission at 450 nm, excited at 355 nm, had a mean value of 1.32 nm^{-1} ±0.84 nm^{-1}. A significant lake zone difference is found in DOC concentration, CDOM absorption coefficient and fluorescence, but not in DOC-specific absorption coefficient and spectral slope coefficient. This regional distribution pattern is in agreement with the location of sources of yellow substance: highest concentrations close to river mouth under the influence of river inflow, lower values in East Lake Taihu. The values of algae lake zone are obvious larger than those of macrophyte lake zone. In Meiliang Bay, CDOM absorption, DOC concentration and fluorescence tend to decreasing from inside to mouth of the Bay. The results show a good correlation between CDOM absorption and DOC coefficients during 280 ~ 500 nm short wavelength intervals. The R-square coefficient between CDOM absorption and DOC concentration decreases with the increase of wavelength from 280 to 500 nm. The significant linear regression correlations between fluorescence, DOC concentration and absorption coefficients were found at 355 nm. The exponential slope coefficients ranged from 13.0 to 16.4 μm^{-1} with a mean value 14.37 μm^{-1} ±0.73 μm^{-1}, 17.3 μm^{-1} ~ 20.3 μm^{-1} with a mean value 19.17 μm^{-1} ±0.84 μm^{-1} and 12.0 μm^{-1} ~ 15.8 μm^{-1} with a mean value 13.38 μm^{-1} ±0.82 μm^{-1} over the 280 ~ 500 nm, 280 ~ 360 nm and 360 ~ 440 nm intervals.

Key words : chromophoric dissolved organic matter (CDOM); fluorescence; dissolved organic carbon (DOC); spectral slope coeffi-

收稿日期 :2004-06-04 ;修订日期 :2004-09-14
基金项目 :中国科学院知识创新工程项目 (KZCX1 - SW - 12) ; 国家自然科学基金项目(40203007) ; 中国科学院领域前沿项目(CXNIGLAS - A02 - 014)
作者简介 :张运林(1976 ~) , 男 , 湖南邵阳人 , 博士生 , 主要从事湖泊光学和湖泊生态学研究 . E-mail: ylzhang@niglas.ac.cn

cient; Lake Taihu

有色可溶性有机物(chromophoric dissolved organic matter, CDOM),又称黄质,存在于所有水体中,它是溶解性有机物库的重要组成部分[1].由腐质酸,芳烃聚合物等一系列物质组成,主要是土壤和水生植物降解的产物[2],在内陆水体和海湾沿岸带CDOM以河流陆源排放为主,在远海CDOM浓度非常低其来源主要是海水中低等植物残体腐烂降解.CDOM的吸收光谱是在紫外光吸收最强,到近红外光趋向于0.由于CDOM化学组成极为复杂,要想从水体中提取CDOM相当困难,因而当前人们只能从其吸收和荧光等光学行为来开展对它的研究.国际上CDOM的研究主要集中以下5个方面:①光化学反应(Photochemical reactivity)及由此引起的光漂白(Photobleaching)[3];②可能导致叶绿素a高估和影响光合作用的光吸收特性[4];③基于CDOM的吸收和荧光来反演DOC浓度[5];④CDOM的光降解产物为微生物提供食物供给[6];⑤海洋中CDOM可以作为陆生溶解性有机物的示踪器[7].最近几年国内关于CDOM也有一部分研究,但主要集中在海洋里[8~10].

太湖梅梁湾和东太湖分别面临着富营养化水华暴发和沼泽化2类完全不同的环境问题[11].梅梁湾由于紧邻无锡市,其CDOM主要来自入湖河流和工农业排放的污水,以陆源为主,而东太湖由于其水生植物生长茂盛,除了陆源的CDOM外,秋、冬季水生植物腐烂降解的产物也可能是CDOM的重要来源.本文以梅梁湾、东太湖为研究区域,重点探讨CDOM以下4个方面问题:①梅梁湾和东太湖CDOM的空间分布及区域差异;②CDOM吸收系数与DOC的关系;③CDOM吸收系数与荧光强度的关系;④CDOM光谱吸收形状的变化,亦即指数函数斜率 S 的值.

1　材料与方法

1.1　采样时间与站位

2004年4月4日、5日分别在东太湖和梅梁湾共布设了26个点进行了水下光场的测定及样品的采集分析,站点位置见图1,其中M0~M6号点与中国科学院太湖湖泊生态系统研究站常规监测点的0~6号点吻合.

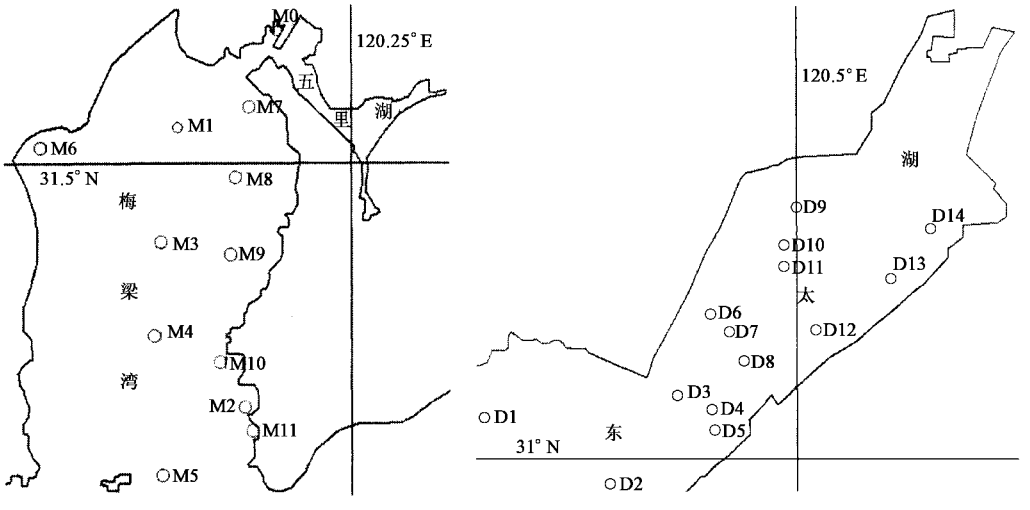


图1　梅梁湾和东太湖采样点位置

Fig.1　Location of sampling sites in Meiliang Bay and East Lake Taihu

1.2　CDOM吸收和DOC浓度测定

CDOM的光谱吸收系数测定采用通过0.45 μm GF/F过滤的水样在UV2401分光光度计下测定其吸光度,然后根据(1)式进行计算得到各波长的吸收系数[12].

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

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

由于过滤清液还有可能残留细小颗粒,可能会引起散射,为此作如下散射效应订正[13]:

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

式中,$a(\lambda)$为波长 λ 的吸收系数(m^{-1});$a(\lambda')$为波

长 λ 的未校正吸收系数(m^{-1}) ; λ 波长(nm) .由于 CDOM 的浓度无法测定,最常用方法是用 355 nm 或 375 nm 等波长处的吸收系数来表示 CDOM 浓度[14,15].本文以 355 nm 的吸收系数来表示 CDOM 浓度并以此波长处的吸收与 DOC 浓度及荧光值建立关系.溶解性有机碳 DOC 的测定方法是用 Whatman GF/ F 玻璃纤维滤膜(直径 25 mm,孔径 0.45 μm) 进行过滤,在 1020 型 TOC 仪上测定.

CDOM 的比吸收系数 $a^*(\lambda)$ 按(3) 式计算[16]:

$$a^*(\lambda) = a(\lambda)/\mathrm{DOC} \quad (3)$$

式中: $a^*(\lambda)$ 为比吸收系数[L•(mg• m) $^{-1}$]; $a(\lambda)$ 为波长 λ 的吸收系数(m^{-1}) ; DOC 为溶解性有机碳的浓度(mg/ L) .

1.3 荧光的测定

CDOM 在紫外光的激发下会产生荧光,本文选取国际上通用的 355 nm 作为激发波长,450 nm 作为发射波长,用 Mill- Q 水做参比样,在 5301 荧光光度计上测定其荧光值[1].

1.4 指数函数斜率 S 的计算

CDOM 对 500nm 以下光谱吸收基本上呈现指数衰减的规律, Bricaud[12]在 1981 年提出如下的公式:

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

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.

1.5 数据分析

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.

2 结果与讨论

2.1 CDOM 的光谱吸收和空间分布

图 2 给出梅梁湾和东太湖典型站点 CDOM 的吸收光谱,其吸收曲线表现出高度的一致性,在 700 nm 附近的红外波段趋向于 0,在 280 ~ 320 nm 紫光外波段最大, CDOM 吸收对数值随波长大致表现为直线变化,直线斜率即后面论述的指数函数斜率.26 个采样点 280 nm、355 nm 波长处平均吸收系数分别为 17.46 m^{-1} ±5.75 m^{-1}、4.17 m^{-1} ±1.47 m^{-1}.各站点特征波长处的吸收系数见表 1 .由表 1 可知,东太湖和梅梁湾 CDOM 吸收差异明显,其中梅梁湾各点 355 nm 处吸收系数均在 4 m^{-1} 以上,最大值出现在位于直湖港入湖口的 M6 号点,而东太湖除了 DI 2 号点外其他各点 355 nm 波长处的吸收系数均小于 4 m^{-1},通过组间方差分析(One- Way Anova) 发

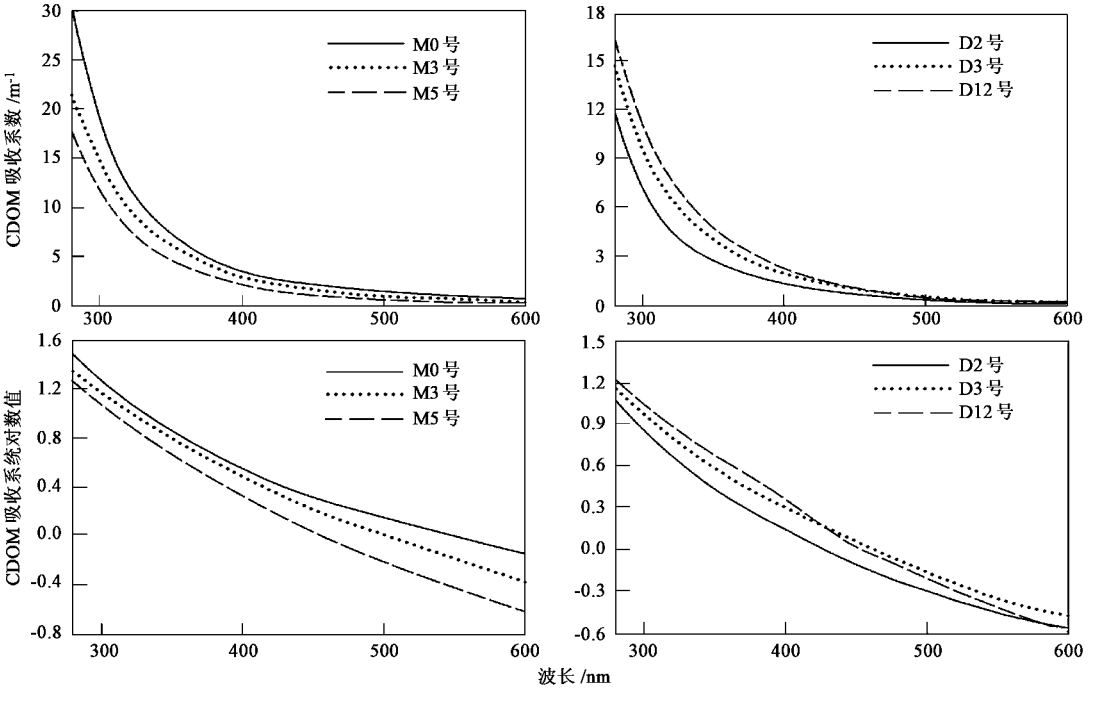


图 2 梅梁湾和东太湖典型站位 CDOM 吸收曲线

Fig .2 Spectral absorption coefficients of CDOM of typical sampling sites in Meiliang Bay and East Lake Taihu

现 2 类湖区 CDOM 吸收系数存在显著性差异(N = 26 , $p \leqslant 0.0001$) ,草型湖区的东太湖 CDOM 浓度明显要小于藻型湖区的梅梁湾.在梅梁湾, CDOM 吸收系数大致呈现从湾内向湾口递减的趋势,并且位

于梁溪河和直湖港入湖口的 M0、M6 号点 CDOM 吸收系数明显要大于其他各点,受湖水稀释,到湾口的 M5 号逐渐降到最低值,体现了入湖河流带来大量 CDOM. Frenette 等[17]对大型浅水湖泊 Saint-Pierre 湖的研究也显示在河流入湖区的 CDOM 浓度均明显高于湖体本身,而在许多海湾的 CDOM 的研究中这种分布趋势更为明显[16,18,19].

太湖 CDOM 吸收系数与 Frenette 等人在河相的大型浅水湖泊 Saint-Pierre 湖的研究结果比较接近[17],此外与 Morris 等人在美国东北部及科罗拉多州、阿拉斯加州的湖泊调查结果一致[20],并且都落在 Kirk 报道的吸收系数范围之内[2],但明显高于沿岸带和海洋中的值[2,21].由于 CDOM 在紫外和蓝光波段吸收最强烈,因而许多研究也常常借助 CDOM 的吸收系数来反映 UV-B 辐射在水体的衰减情况,建立了漫射衰减系数与 CDOM 吸收系数的线性回归关系[20,22].梅梁湾的 CDOM 浓度显著高于东太湖,一方面说明了梅梁湾水生生物遭受 UV-B 辐射的损伤要比东太湖小,另一方面由于 CDOM 容易发生光降解,也会带来 UV-B 辐射在湖泊中穿透深度的增加.

2.2　CDOM 吸收与 DOC 关系

表 1　特征波段吸收系数、比吸收系数、指数函数斜率和 DOC 浓度及荧光

Table 1　Absorption coefficients, DOC-specific absorption coefficients, spectral slope coefficients, DOC concentrations and fluorescence

样点	$a(\lambda)$/ m^{-1}			$a^*(\lambda)$ / L·(mg·m)$^{-1}$			S/μm^{-1}			DOC / mg·L^{-1}	$F_n(355)$ / nm^{-1}
	280	355	440	280	355	440	280 ~ 500	280 ~ 360	360 ~ 440		
M0 号	30.7	6.7	2.2	2.40	0.52	0.17	13.8	20.3	12.8	12.8	3.31
M1 号	22.6	5.5	1.8	2.29	0.56	0.18	14.2	19.0	13.2	9.9	1.95
M2 号	18.7	4.3	1.3	1.35	0.31	0.09	15.1	19.9	13.9	13.9	1.44
M3 号	22.0	5.5	1.8	2.54	0.64	0.21	14.0	18.5	13.1	8.7	2.11
M4 号	25.1	6.7	2.3	2.20	0.58	0.21	13.0	17.7	12.1	11.4	2.25
M5 号	18.3	4.2	1.2	1.74	0.39	0.11	15.2	20.0	14.3	10.5	1.44
M6 号	32.6	8.3	3.0	1.90	0.48	0.17	13.0	18.4	12.0	17.2	3.91
M7 号	21.1	4.9	1.5	1.94	0.45	0.14	14.5	19.5	13.7	10.9	1.71
M8 号	21.2	5.0	1.5	1.90	0.45	0.14	14.6	19.3	13.7	11.2	1.75
M9 号	18.1	4.2	1.3	1.94	0.45	0.14	14.6	19.6	13.4	9.4	1.29
M10 号	18.1	4.2	1.3	1.85	0.43	0.14	14.4	19.4	13.3	9.8	1.21
M11 号	19.2	4.5	1.4	1.84	0.43	0.13	14.6	19.5	13.6	10.5	1.25
D1 号	11.5	2.6	0.9	1.51	0.34	0.12	13.5	19.6	12.1	7.6	0.50
D2 号	11.7	2.6	0.9	1.70	0.37	0.12	13.9	20.3	12.5	6.9	0.56
D3 号	14.9	3.7	1.2	2.14	0.53	0.17	13.9	18.0	13.3	7.0	0.84
D4 号	11.2	2.4	0.7	1.58	0.35	0.10	15.2	20.2	14.0	7.1	0.72
D5 号	11.6	2.6	0.8	1.73	0.39	0.12	14.8	20.0	13.5	6.7	0.64
D6 号	14.2	3.6	1.1	2.07	0.52	0.17	13.8	17.8	13.2	6.8	0.81
D7 号	11.9	2.8	0.9	1.72	0.40	0.13	14.1	19.1	13.0	6.9	0.73
D8 号	12.0	2.7	0.9	1.78	0.41	0.13	14.4	19.6	13.1	6.7	0.77
D9 号	14.9	3.4	1.1	1.87	0.42	0.14	14.0	19.9	12.8	8.0	0.92
D10 号	14.5	3.6	1.1	2.02	0.50	0.15	14.4	18.5	13.6	7.2	0.86
D11 号	11.6	2.7	0.9	1.75	0.41	0.13	14.1	19.2	13.0	6.6	0.65
D12 号	16.6	4.5	1.3	2.11	0.57	0.16	14.8	17.3	14.3	7.9	0.93
D13 号	15.0	3.7	1.0	2.05	0.50	0.14	15.2	18.7	14.5	7.3	0.88
D14 号	14.7	3.4	0.9	2.01	0.47	0.12	16.4	19.1	15.8	7.3	0.90

DOC 浓度最高值为 17.2 mg/L,出现在直湖港入湖口的 M6 号点,与 CDOM 吸收最高值同步,最低值为 6.6 mg/L,位于东太湖正中央.对梅梁湾和东太湖 DOC 浓度进行方差分析发现,2 个区域之间 DOC 浓度存在显著性差异($N=26$, $p \leqslant 0.0001$).将 DOC 浓度与 CDOM 吸收系数进行线性回归发现,在紫外和蓝绿光短波段部分,两者存在显著性相关,并且随波长的降低,相关性逐渐增加,到 290 nm 附近后相关系数又开始有所下降(图 3),这与 2003 年冬天在梅梁湾观测的结果比较吻合[23].已有的许多研究都显示 CDOM 吸收系数与 DOC 浓度存在显著性正相关,并可以用这些相关式来模拟 DOC 浓度的变化[1,16],但必须注意到是这些关系式的系数存在区域性,随水体生物光学特性的变化而变化.

CDOM 比吸收系数可以作为区分 CDOM 来源和类型的参数,一般较低的 CDOM 吸收系数对应低的比吸收系数,如果比吸收系数差异不明显证明其 CDOM 来源的一致性.355 nm 处 CDOM 比吸收系数为 0.31 ~ 0.64 L·(mg·m)$^{-1}$,平均值为(0.46 ± 0.08) L·(mg·m)$^{-1}$,与 Morris 等人报道的美国东北部及科罗拉多州、阿拉斯加州的湖泊中的值较为一致[20].关于 CDOM 比吸收系数的变化不同研究者得到完全相反的 2 种结果,Stedmon 等用方差检验和线性回归分析发现 Danish 沿岸带水域比吸收

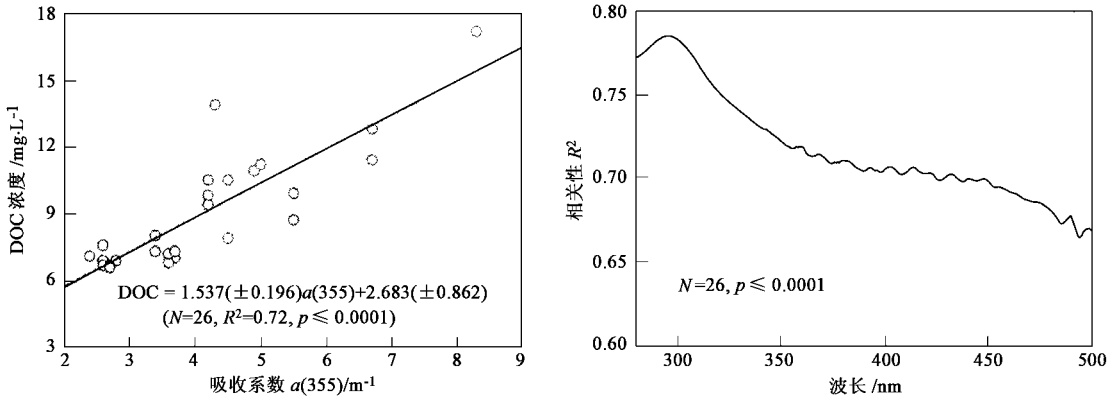


图 3 CDOM 吸收系数与 DOC 浓度的线性相关

Fig.3 Linear relationship between CDOM absorption coefficients and DOC concentrations

系数不存在显著性变化,可以用平均值代替整个区域[15].然而 Gallie 的研究却发现 CDOM 比吸收系数与湖泊 pH 值、DOC 浓度存在显著的正相关[24].在我们此次研究中通过方差分析发现两类湖区 280 nm、355 nm、440 nm 波长处 CDOM 比吸收系数均没有显著性差异,这也许可以从一方面反映了 CDOM 来源一致性,由于采样是在 4 月份进行,水生植物和浮游植物刚处于生长期,腐烂和分解较少,因而可能浮游植物本身降解产生的 CDOM 在总的 CDOM 中还并不占主导地位.通过对 2 类湖区 CDOM 吸收系数与叶绿素 a 浓度进行相关分析发现两者之间存在负的显著性相关(梅梁湾: $N=12$, $p \leqslant 0.05$;东太湖: $N=14$, $p \leqslant 0.01$),这从另一个侧面反映了浮游植物降解产生的 CDOM 对总 CDOM 的贡献不大,如果 CDOM 主要来源于浮游生物降解的产物,那么 CDOM 吸收系数应该与叶绿素 a 浓度存在显著性正相关.

2.3 CDOM 吸收与荧光关系

CDOM 吸收可以直接用分光光度计测量得到,也可通过荧光值反演推算得到.国外大多研究表明[16, 21, 25],即便 CDOM 来源和化学组成差异万千,CDOM 吸收与荧光强度均存在显著线性关系.本次研究也发现 CDOM 吸收系数与其荧光值存在显著性正相关(图 4),荧光高值出现在直湖港和梁溪河入湖口的 M6 号、M0 号点,分别为 3.91、3.31 nm^{-1},最低值出现在东太湖的 D1 号点,两类湖区 355 nm 处的荧光值存在显著性差异($N=26$, $p \leqslant 0.0001$).CDOM 吸收与荧光强度的显著性正相关的结论进一步证实用荧光来反演 CDOM 浓度的可行性,这为利用荧光来进行 CDOM 的水色遥感提供了坚实的理论基础.

2.4 指数函数斜率 S 值

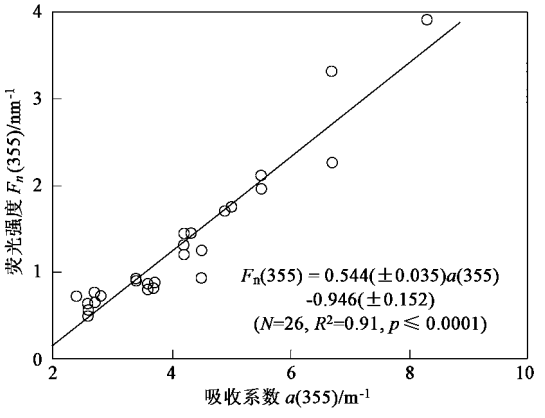


图 4 CDOM 吸收系数与荧光强度线性回归

Fig.4 Regression plot of $a(355)$ versus $F_n(355)$

表 1 给出了 280~500 nm、280~360 nm、360~440 nm 3 个波段基于最小二乘法得到的指数函数斜率值,3 个波段 26 个采样点的平均值分别为(14.37±0.73)、(19.17±0.84) μm^{-1}、(13.38±0.82) μm^{-1}.同一波段内各点 S 值差异很小,但不同的波段间 S 值存在一定差异,一般短波波段值要高于长波波段,说明 CDOM 的吸收越到短波增加越明显,这也反映了 S 值与波长的选择及 CDOM 物质组成有关.从 3 波段指数拟合得到的 S 值来看,都很好的落于 Markager 报道的淡水湖中 10~25 μm^{-1} 范围内[26],并且也一般高于沿岸带和海洋中的研究结果,进一步验证了内陆淡水湖泊中 S 值比海洋中略高的结论.从 S 值的区域来看,通过方差分析发现梅梁湾和东太湖 2 组数据之间没有显著性差异.国际上同类研究显示,S 值的变化一般来自于 CDOM 组成的差异[27],其值也可作为区分 CDOM 来源和组成的参数,由于此次研究没有发现不同湖区 S 值存在显著性差异,因而可以认为梅梁湾和东太湖 CDOM 组成的相似性,可能都是陆源性为主.

3　结语

本研究报道了太湖典型草、藻型湖区 CDOM 浓度及其光学特性,初步分析了 CDOM 的来源.研究发现 2 类湖区 DOC 浓度、CDOM 吸收系数及荧光强度均存在明显的区域差异,而比吸收系数、指数函数斜率则没有湖区差异,反映了梅梁湾受外源来水的污染明显要大于东太湖,2 类湖区对比比较明显,但 CDOM 来源比较一致,均来自流域河流输入.建立的典型湖区 CDOM 的吸收光谱模型及荧光强度、DOC 浓度与 CDOM 吸收系数的线性相关式将有助于太湖水质遥感模型的建立.但关于太湖 CDOM 的研究还有待进一步加强,包括其来源的精确鉴定,尤其是随着全球 UV-B 辐射的增强,其势必将对太湖湖泊生态系统的结构和功能产生一定影响,因而有必要研究 CDOM 与 UV-B 衰减的关系,它的光化学反应和代谢产物及在降低 UV-B 辐射对浮游生物损伤中发挥的作用.另外基于遥感来监测太湖的水质和蓝藻水华暴发情况势在必行,但要成功地反演太湖的叶绿素 a 浓度必须要研究 CDOM 的吸收特性并消除其对叶绿素 a 浓度反演的影响.

参考文献:

[1] Rochelle-Newall E J, Fisher T R. Chromophoric dissolved organic matter and dissolved organic carbon in Chesapeake Bay [J]. Marine Chemistry, 2002, **77**: 23 ~ 41.

[2] Kirk J T O. Light and photosynthesis in aquatic ecosystem [M]. Cambridge: Cambridge University Press, Britain, 1994.

[3] Mopper K, Zhou X, Kieber R J, *et al*. Photochemical degradation of dissolved organic carbon and its impact on the oceanic carbon cycle [J]. Nature, 1991, **353**: 60 ~ 62.

[4] Rochelle-Newall E J, Fisher T R. Production of chromophoric dissolved organic matter fluorescence in marine and estuarine environments: an investigation into the role of phytoplankton [J]. Marine Chemistry, 2002, **77**: 7 ~ 21.

[5] Ferrari G M. 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) [J]. Marine Chemistry, 2000, **70**: 339 ~ 357.

[6] Reche I, Pace M L, Cole J J. Interactions of photobleaching and inorganic nutrients in determining bacterial growth on colored dissolved organic carbon [J]. Microbial Ecology, 1998, **6**: 270 ~ 280.

[7] De Sousa Sierra M M, Donard O F X, Lamotte M. Spectral identification and behavior of dissolved organic fluorescent material during estuarine mixing processes [J]. Marine Chemistry, 1997, **58**: 51 ~ 58.

[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] 张绪琴, 吴永森, 张士魁, 等. 胶州湾海水黄色物质荧光分布初步研究[J]. 遥感学报, 2002, **6**(3): 229 ~ 232.

[10] 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.

[11] 秦伯强, 吴庆龙, 高俊峰, 等. 太湖地区的水资源与水环境——问题、原因与管理[J]. 自然资源学报, 17(2): 221 ~ 228.

[12] Bricaud A, Morel A, Prieur L. Absorption by dissolved organic matter of the sea (yellow substance) in the UV and visible domain [J]. Limnology and Oceanography, 1981, **26**: 43 ~ 53.

[13] Keith D J, Yoder J A, Freeman S A. Spatial and temporal distribution of coloured dissolved organic matter (CDOM) in Narragansett Bay, Rhode Island: implications for phytoplankton in coastal waters [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2002, **55**: 705 ~ 717.

[14] 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 II, 2000, **47**: 1563 ~ 1579.

[15] Stedmon C A, Markager S, Kaas H. Optical Properties and Signatures of Chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in Danish coastal waters [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2000, **51**: 267 ~ 278.

[16] Seritti A, Russo D, Nannicini L, *et al*. DOC, absorption and fluorescence properties of estuarine and coastal waters of the Northern Tyrrhenian Sea [J]. Chemical Speciation and Bioavailability, 1998, **10**(3): 95 ~ 106.

[17] Frenette J J, Arts M T, Morin J. Spectral gradients of downwelling light in a fluvial lake (LakeSaint-Pierre, St-Lawrence River) [J]. Aquatic Ecology, 2003, **37**: 77 ~ 85.

[18] 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 [J]. Marine Chemistry, 1999, **66**: 35 ~ 51.

[19] Clementson L A, Parslow J S, Turnbull A R, *et al*. Properties of light absorption in a highly coloured estuarine system in southeast Australia which is prone to blooms of the toxic dinoflagellate *Gymnodinium catenatum*[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2004, **60**: 101 ~ 112.

[20] Morris D P, Zagarese H, *et al*. The attenuation of solar UV radiation in lakes and the role of dissolved organic carbon [J]. Limnology and Oceanography, 1995, **40**: 1381 ~ 1391.

[21] Ferrari G M, Dowell M D. CDOM Absorption Characteristics with relation to fluorescence and salinity in coastal areas of the Southern Baltic Sea [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1998, **47**: 91 ~ 105.

[22] Laurion I, Ventura M, Catalan J, *et al*. Attenuation of ultraviolet radiation in mountain lakes: Factors controlling the among- and within-lake variability [J]. Limnology and Oceanography, 2000, **45**: 1274 ~ 1288.

[23] 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.

[24] Gallie E A. Variation in the specific absorption of dissolved organic carbon in Northern Ontario lakes [R]. In Ocean Optics XIII, Steven G A, Robert F, editors, Proc. SPIE 2963, 1997, 417 ~ 422.

[25] 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]. Limnology and Oceanography, 1993, **38**: 1394 ~ 1402.

[26] Markager W, Vincent W F. Spectral light attenuation and absorption of UV and blue light in natural waters [J]. Limnology and Oceanography, 2000, **45**: 642 ~ 650.

[27] Carder K L, Steward R G, Harvey G R, *et al*. Marine humic and fulvic acids: Their effects on remote sensing of ocean chlorophyll [J]. Limnology and Oceanography, 1989, **34**: 68 ~ 81.