

太湖入湖河口和开敞区 CDOM 吸收和三维荧光特征*

刘明亮^{1,2}, 张运林^{1**}, 秦伯强¹

(1: 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室太湖湖泊生态系统研究站, 南京 210008)

(2: 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

摘要: 应用吸收和三维荧光光谱对 2007 年夏季太湖入湖河口和太湖开敞区有色可溶性有机物(CDOM)浓度及来源进行研究. 结果表明, 河口区和开敞区 CDOM 吸收系数 $a(355)$ 存在显著空间差异, 河口区明显大于开敞区(ANOVA, $P < 0.001$), $a(355)$ 最大值出现在大浦河口和竺山湾漕桥河口附近, 最小值出现在东太湖和胥口湾. $a(355)$ 与溶解性有机碳、化学耗氧量浓度存在显著正相关. 所有样品一般都含有 4 个明显的荧光峰, 包括 1 个可见光区的类腐殖质荧光 C 峰, 1 个紫外光区的类腐殖酸荧光 A 峰, 2 个类蛋白荧光 B 峰和 D 峰. 河口区外源输入的类腐殖质荧光非常强, 显著大于开敞区(ANOVA, $P < 0.05$), 而河口区和开敞区类蛋白荧光没有显著性差异, 反映开敞区除外源河流输入外, 内源生物降解等对类蛋白荧光贡献增加. 在河口区 B、C 峰的比值 $r(B/C)$ 小于 1, 均值为 0.62 ± 0.14 . 在开敞区 $r(B/C)$ 除 12[#] 是 0.92, 其他值均大于 1, 均值为 1.12 ± 0.13 , 初步判断 $r(B/C)$ 可以作为区分 CDOM 来源的重要参数. CDOM 吸收 $a(355)$ 与类腐殖质荧光 C 峰、A 峰均存在极显著的正相关, 而与类蛋白荧光相关性则明显下降, 与 D 峰存在显著正相关, 与 B 峰没有显著相关.

关键词: 有色可溶性有机物; 溶解性有机碳; 三维荧光光谱; 太湖

Characterization of absorption and three-dimensional excitation-emission matrix spectra of chromophoric dissolved organic matter at the river inflow and the open area in Lake Taihu

LIU Mingliang^{1,2}, ZHANG Yunlin¹ & QIN Boqiang¹

(1: *Taihu Lake Laboratory Ecosystem Research Station, State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R.China*)

(2: *College of Resources and Environmental Sciences, Naniing Agricultural University, Nanjing 210095, P.R.China*)

Abstract: Using absorption and three-dimensional excitation-emission matrix spectra (3DEEMs), concentration and source of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) were studied at the river inlet and open water area of the Lake Taihu in summer of 2007. Significantly spatial difference was recorded for CDOM absorption coefficient at the areas (ANOVA, $P < 0.001$), with the highest value in the river inflows of Dapu and Caoqiao and with the lowest value in East Lake Taihu and Xukou Bay. CDOM absorption coefficients are significantly correlated with dissolved organic carbon (DOC) and with chemical oxygen demand (COD) concentrations. Four EEMs peaks were identified in every samples, including a humic acid fluorescence peak (C) in visible range, a humic acid fluorescence peak in UV range (A) and two protein-like fluorescence peaks (B and D). Strong humic acid fluorescence was identified in the samples from the river inflows, with a significant spatial difference from humic acid fluorescence (Peaks A and C) at the river inlet and the open lake area (ANOVA, $P < 0.05$). However, there was no significant decrease for protein-like fluorescence (Peaks B and D) from the river inlet to the open area due to the dilution of lake water, showing that the dilution effect is increasing from internal source of phytoplankton degradation to protein-like fluorescence. The ratio of peak B over peak C ($r(B/C)$) was

* 国家自然科学基金重点项目(40730529)和中国科学院知识创新工程方向性项目(KZCX2-YW-419)联合资助. 2008-05-30 收稿; 2008-10-11 收修改稿. 刘明亮, 男, 1983 年生, 硕士研究生; E-mail: lmlyx@163.com.

** 通讯作者; E-mail: ylzhang@niglas.ac.cn.

lower than 1 with the average value of 0.62 ± 0.14 , but was larger than 1 at sample 12 with the average value of 1.12 ± 0.13 . The $r(B/C)$ can be preliminary used to distinguish the composition and source of CDOM. Significantly positive correlations were found between CDOM absorption coefficient and the fluorescence intensities of peaks A, C, D, but no significant correlation found with peak B.

Keywords: Chromophoric dissolved organic matter; dissolved organic carbon; three-dimensional excitation-emission matrix spectra; Lake Taihu

在过去的20-30年内由于流域和周围城市大量氮磷营养盐的输入, 太湖面临着严重的湖泊富营养化和蓝藻水华暴发, 其环境与生态问题也引起越来越多的关注^[1-2]. 2007年5月底6月初在贡湖湾口南泉水厂附近出现蓝藻水华异常堆积, 蓝藻水华死亡腐烂降解释放出大量溶解性有机物(Dissolved Organic Matter, DOM), 6月1日采样显示化学需氧量(Chemical Oxygen Demand, COD)高达 53.6 mg/L ^[3], 这些有机物很快就会消耗溶解在水中的氧, 使得厌氧条件下藻类代谢产生二甲基异苧醇等恶臭味致嗅物质^[4], 危及无锡人民的饮用水安全. DOM广泛存在于各类水体, 其含有丰富碳、氮、磷等湖泊生源要素, 在湖泊各种物理、化学和生物以及蓝藻水华暴发过程中都扮演了非常重要的角色^[5-7]. 有色可溶性有机物(Chromophoric Dissolved Organic Matter, CDOM)表征的是溶解性有机物中带发色团的那部分, 溶解性有机碳(Dissolved Organic Carbon, DOC)则是以碳含量来表征溶解性有机物的浓度, 而COD也能间接反映水体中有机物污染程度. 研究显示三者之间会存在定量关系, 可以相互替换^[3].

对于受人类活动影响频繁的湖泊水体, CDOM的来源各异, 成分复杂, 目前很难对其有机成分进行全面分析, 因而往往借助其吸收系数等光学特性来表示其浓度. 而近年来发展起来的荧光光谱技术特别是三维荧光光谱则能很好区分CDOM的组成和来源^[8-10]. 荧光光谱技术一般包括荧光发射光谱(Fluorescence Emission Spectra)、同步荧光光谱(Synchronous Fluorescence Spectra)、三维荧光光谱(Three-dimensional Excitation-Emission Matrix Spectra, 3DEEMs). 本文尝试应用吸收和三维荧光技术对入湖河口和开敞区有色可溶性有机物浓度及其组成、来源进行初步研究.

1 材料与方法

1.1 研究区域

2007年8月12日在全太湖共采15个点(图1), 其中1#-7#为河口区, 8#-15#为开敞区. 用中国科学院水生生物研究所研制的有机玻璃采水器采集表层水样(0-0.5m), 装入干净的塑料桶并置于冷藏箱内黑暗低温保存, 水样采回后立即送回实验室进行过滤等预处理, 滤后样品装入30ml玻璃瓶内置于冰箱4℃冷藏保存, 然后测定CDOM的吸收系数、三维荧光强度、DOC浓度, 各参数测定在1个月内完成.

1.2 测量及统计方法

CDOM的光谱吸收系数采用岛津UV2401分光光度计进行, 详细测定描述参见文献[11]. 本文以355nm的吸收系数来表示CDOM浓度并以此波长处的吸收与荧光强度建立关系.

三维荧光光谱用美国Perkin Elmer公司的LS50-B荧光分光光度计测定, 激发和发射夹缝宽度为5nm, 激发波长为200-435nm,

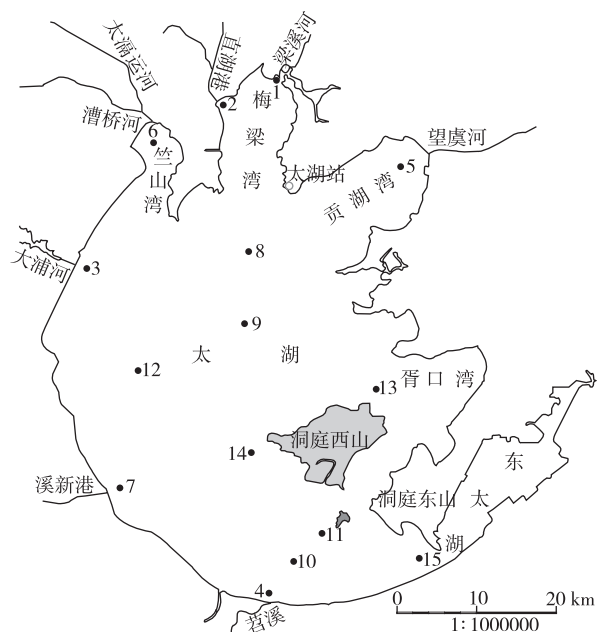


图1 太湖采样点分布

Fig.1 Location of sampling sites in Lake Taihu

间隔为 5nm, 发射波长 250–600nm, 以 1nm 间隔得到荧光光谱, 减去 Milli-Q 超纯水三维荧光光谱以校正水的拉曼散射。

DOC 的测定方法是用 GF/F 膜过滤水样得到过滤后清液, 用美国 OI 公司 1020 型 TOC 仪进行测定, 仪器检测范围为 0.5–500mg/L, 相对误差为 $\pm 3\%$ 。化学需氧量 COD 的测定采用酸性高锰酸钾法^[12]。

运用 SPSS11.0 进行均值、标准差、组间方差以及线性拟合等数据统计分析。

2 结果与讨论

2.1 CDOM 吸收特征及空间变化

CDOM 在可见光波段吸收较小, 当波长过渡到紫外区时, 吸收系数呈指数增长。由表 1 可知, 河口区 CDOM 吸收系数 $a(355)$ 的变化范围和均值分别为 $3.38\text{--}5.65\text{m}^{-1}$ 、 $4.07\pm 0.87\text{m}^{-1}$ 。而开敞区的 $a(355)$ 的变化范围和均值分别为只有 $1.42\text{--}2.46\text{m}^{-1}$ 、 $1.83\pm 0.39\text{m}^{-1}$ 。单因素组间方差分析显示, 入湖河口和开敞区 CDOM 的光谱吸收存在显著空间差异(ANOVA, $P < 0.001$), 河口区 CDOM 的吸收系数明显大于开敞区, 河口区均值是开敞区的 2.2 倍, 这也反映了入湖河流带了大量的 CDOM 入湖, 这与 2004 年张运林等对梅梁湾的研究结果一致^[13]。Frenette 等^[14]也认为河流入湖区的 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^[6,15]。 $a(355)$ 的最高值出现在 3[#]和 6[#], 3[#]是大浦河口, 6[#]是竺山湾, 两处所临城市均较发达, 接受了几乎全部城市的工业废水, 并且 6[#]所在的竺山湾是围网养殖区, CDOM 浓度比较高。 $a(355)$ 最低值则出现在东太湖口的 15[#]和胥口湾的 13[#], 两处均为水草区, 水质清澈。

DOC 和 COD 的空间分布与 CDOM 吸收系数类似, 都存在显著空间差异, 河口区显著要高于开敞区(ANOVA, $P < 0.01$), 但最高值、最低值出现的位置存在一定差异。另外, 5[#]的 COD 浓度小于开敞区外, 这是由于 5[#]点处在望虞河口, 是引江济太工程的主要河道, 2007 年 6 月份无锡水危机事件之后望虞河一直在引江济太, 使得该水域 COD 污染被长江水稀释。对 $a(355)$ 与 DOC、COD 浓度进行统计相关分析, 发现他们之间存在显著性正相关, 说明 3 个参数均可以用来反映水体的有机物污染程度。

$$DOC = 0.660(\pm 0.137)a(355) + 4.793(\pm 0.430) \quad (r^2 = 0.64, P < 0.001, n = 15) \quad (1)$$

$$COD = 0.696(\pm 0.235)a(355) + 3.360(\pm 0.740) \quad (r^2 = 0.40, P < 0.05, n = 15) \quad (2)$$

表 1 CDOM 特征波长吸收、DOC 和 COD 浓度*

Tab.1 CDOM absorption coefficient, DOC and COD concentrations

	样点	$a(355)$ (m^{-1})	DC (mg/L)	DIC (mg/L)	DOC (mg/L)	COD (mg/L)
入湖河口	1	3.58	23.97	16.40	7.57	5.81
	2	3.66	23.42	16.10	7.32	5.91
	3	5.65	30.37	21.03	9.34	6.79
	4	3.62	21.09	13.51	7.58	7.15
	5	3.38	28.12	22.44	5.68	3.68
	6	4.96	34.12	26.53	7.59	6.56
	7	3.65	22.30	15.30	7.00	8.34
开敞区	8	2.36	19.75	14.41	5.34	3.38
	9	1.61	21.91	15.74	6.17	3.75
	10	1.94	21.72	14.50	7.22	5.46
	11	1.63	20.58	14.91	5.67	5.17
	12	2.46	23.28	17.35	5.93	4.82
	13	1.54	22.39	16.43	5.97	4.22
	14	1.71	23.63	17.42	6.21	5.52
	15	1.42	14.57	8.79	5.78	3.89

* $a(355)$: CDOM 吸收系数; DC: 总溶解性碳; DIC: 溶解性无机碳; DOC: 溶解性有机碳; COD: 化学需氧量。

2.2 CDOM 三维荧光特征

在入湖河口和开敞区的所有采样点的三维荧光光谱图中, 都出现了 4 个峰(图 2), 包括 1 个可见光区的类腐殖酸荧光 C 峰, 1 个紫外光区的类腐殖酸荧光 A 峰, 以及 2 个类蛋白荧光 B 峰和 D 峰. 一般认为 C、A 峰反映的是外源输入的腐殖酸和富里酸形成的荧光峰值, 而 B、D 峰则反映的是生物降解来源的色氨酸和酪氨酸形成的荧光峰值^[16-17]. 但近年来也有部分研究显示浮游植物生长过程中也会产生 C、A 峰等类腐殖质荧光^[18], 而来源于一些化工产的城市污水中可能会包含 B、D 峰等类蛋白荧光^[19]. 各个峰的位置及其峰值荧光强度如表 2 所示. 从图 2 和表 2 可以发现, 河口区和开敞区荧光峰值出现的位置和强度的不一样证明 CDOM 中不同的荧光物质, 暗示河口区和开敞区 CDOM 的来源不一样.

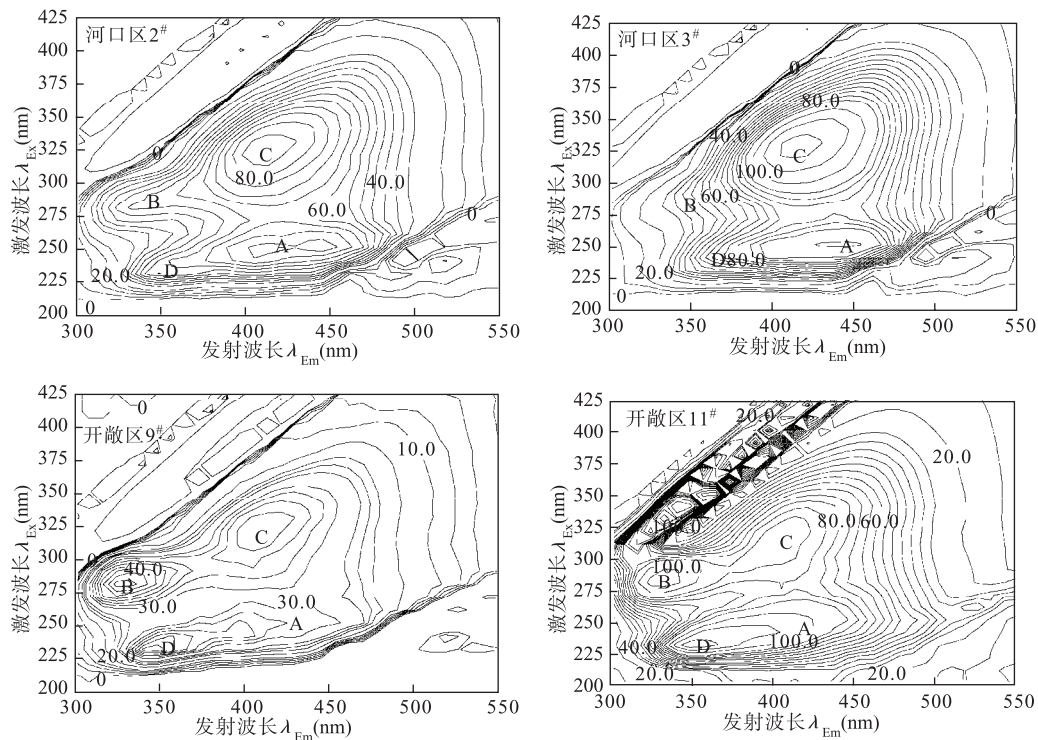


图 2 入湖河口和开敞区典型站点三维荧光图谱

Fig.2 The 3DEEMs of typical sampling sites at the river inflow and the open area

本研究中1[#]-7[#]均在河流的入湖口, 河流带来了大量的工业废水、生活污水以及土壤成分, 所以在河口区CDOM的来源主要是陆源, 类腐殖酸荧光A峰和C峰比较强, 这与Baker等对河流中DOM三维荧光研究结果类似, 河流中类腐殖质荧光显著要大于类蛋白荧光^[19]. 当然在河口区的1[#]-7[#]由于受城市污水中类蛋白荧光的影响, 其在B、D峰的荧光峰值也不低, 但一般都明显低于A、C峰. 此外, 河口区由于氮磷营养盐丰富, 生物活动剧烈, 生物降解的类蛋白应该也会有很大贡献, 而并非全部来自河流输入. 组间方差分析显示, 类腐殖酸荧光A、C峰之间以及类蛋白荧光B、D峰之间没有显著的差异, 但类腐殖酸荧光和类蛋白荧光峰却存在显著的差异(ANOVA, $P < 0.05$). 8[#]-15[#]是在远离河口区, 受河流影响减小, 由于湖水的不断稀释, 外源输入的贡献有所降低, 其内源影响逐渐显现, 从荧光峰值中也体现了这一点. 由表2可知, 河口区陆源的类腐殖酸荧光峰值明显强于开敞区, 王志刚等^[20]在巢湖的研究得出了同样的观点. 这也反映了河口区CDOM的主要组分为类腐殖酸成分. 在开敞区, 受河流影响减弱, 类腐殖酸荧光强度也明显降低, 而类蛋白荧光强度却并没有等比例降低, 这表明, 在开敞区浮游植物的降解作用产生了新的

表 2 三维荧光峰位置及荧光强度

Tab.2 Location of fluorescence peaks and fluorescence intensity of the 3DEEMs

样点	A 峰		C 峰		B 峰		D 峰		$r(B/C)$	
	Ex/Em	峰值	Ex/Em	峰值	Ex/Em	峰值	Ex/Em	峰值		
入湖河口	1	255/431	143.33	325/412	179.12	280/337	112.91	230/351	107.64	0.63
	2	250/441	159.78	325/411	178.04	280/334	113.17	235/366	132.26	0.64
	3	245/436	206.15	330/415	250.05	280/355	89.83	235/356	120.72	0.36
	4	245/400	152.26	325/412	161.25	285/341	124.44	225/354	116.57	0.77
	5	245/439	133.03	325/417	111.93	285/339	87.06	235/356	105.79	0.78
	6	250/453	335.26	335/424	212.00	285/351	126.78	235/362	149.76	0.60
	7	245/395	160.81	325/413	167.33	290/359	92.15	240/361	116.96	0.55
开敞区	8	245/392	76.84	310/403	78.57	280/327	99.21	230/344	91.03	1.26
	9	245/386	76.05	325/411	78.46	280/329	98.51	230/347	91.41	1.26
	10	240/379	122.74	305/401	110.60	285/338	116.03	230/351	131.72	1.05
	11	240/376	118.01	305/399	94.59	285/333	117.25	230/349	128.40	1.24
	12	245/394	130.52	320/406	118.67	285/338	108.66	235/357	129.08	0.92
	13	245/394	80.13	320/407	71.53	280/329	79.90	230/348	81.82	1.12
	14	245/391	105.35	320/409	92.42	285/335	92.95	235/363	105.85	1.01
	15	240/394	77.16	305/403	63.70	280/330	71.48	230/348	77.44	1.12

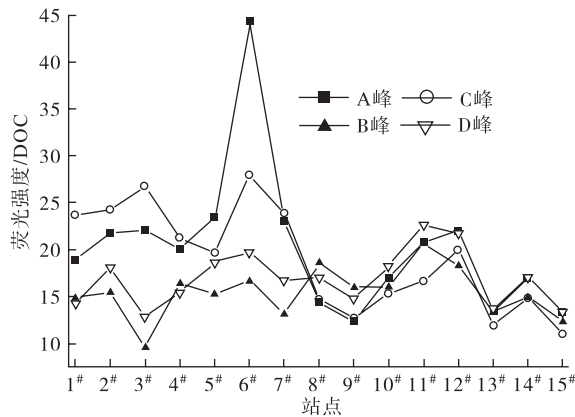


图 3 4 个荧光峰强度与 DOC 比值

Fig.3 The ratios of 4 fluorescence peaks to DOC

类蛋白组分, CDOM中浮游植物降解形成的比例增加, 而河流外源输入的比例降低. 根据傅平青等^[21]对云南洱海的研究发现, 沉积物孔隙水中有较强的类蛋白荧光组分, 这是由于生物以及微生物残骸中的蛋白质成分被分解后进入了沉积物孔隙中. Coble^[22]对海洋沉积物孔隙水的研究中也发现了强的类蛋白荧光. 因此, 太湖中类蛋白荧光也有可能是太湖沉积物孔隙水中类蛋白荧光组分的释放. 图3给出了单位浓度DOC中各个荧光峰值的变化, A、C峰在河口区明显大于B、D峰, 且大于开敞区的A、C峰, 而B、D峰在开敞区和河口区差别不大. 这也可以从侧面说明在河口区DOC中类腐殖质物质浓度比较高, 并随湖水对河水的稀释作用而降低, 而类蛋白物质因为内源的补充并没有大的变化.

从河口区和开敞区类腐殖质荧光和类蛋白荧光统计分析来看, 河口区类腐殖质荧光 A、C 峰值明显高于开敞区(ANOVA, $P < 0.01$), 而类蛋白荧光 2 类区域没有显著空间差异, 这也从一个侧面反映出开敞区有其它来源的类蛋白荧光物质, 因为在开敞区由于湖水的稀释, 河流带来的荧光物质肯定会降低(A、C 荧光峰值降低可以说明这一点), 如果没有其它类蛋白荧光物质的补充, B、D 峰值势必也会显著下降.

$r(B/C)$ 是类蛋白荧光峰 B 与类腐殖酸荧光峰 C 的比值. 由表 2 可知, 入湖河口区和开敞区 $r(B/C)$ 有明显差异, 组间方差分析显示存在显著的统计检验差异(ANOVA, $P < 0.001$). 河口区 $r(B/C)$ 均小于 1, 均值

为 0.62 ± 0.14 , 而在开敞区, 除 12# 是 0.92, 其他值都大于 1, 均值为 1.12 ± 0.13 . 由此可见, $r(B/C)$ 也应该可以作为区分 CDOM 来源的重要参数, 值 1 可以作为临界值, 也就是说当类蛋白荧光 B 峰大于类腐殖酸荧光 C 峰时, CDOM 中生物来源的内源比例较高; 反之, 则是河流输入的外源比例比较高.

对紫外区类腐殖酸荧光峰 A 和可见区类腐殖酸荧光峰 C 进行相关分析时发现, 虽然两个湖区 CDOM 的来源和组成有些差异, 但两者依然存在着较好的线性关系 ($r^2=0.68, P<0.001$), 暗示腐殖酸荧光峰 A 和 C 物质的来源和结构具有相似性. 傅平青等^[16]对贵州多个湖泊的研究中也发现了这种线性关系, 岳兰秀等^[23]分析红枫湖和白花湖溶解性有机物 A、C 峰荧光物质分子量时发现其分布基本相似, 也可以进一步佐证了 A、C 荧光峰物质来源的相似性. 尽管 A、C 峰荧光物质来源具有某种相似性, 但对河口区和开敞区 A、C 峰之间关系单独分析, 发现不同区域类腐殖酸荧光之间关系存在一定差异. 开敞区的 A、C 峰线性相关的决定系数为 0.88, 明显高于河口区的 0.36, 此外两线性模型的斜率也有所不同, 这可能部分解释两区域 CDOM 组成的差异性, 而这个差异性很可能来自河流输入. Baker^[24]等研究了紫外区类腐殖酸荧光与可见区类腐殖酸荧光的主要组成成分, 其中紫外区类腐殖酸荧光主要是由于一些低分子量、高荧光效率的有机物质所引起, 而可见区类腐殖酸荧光则是由相对稳定、高分子量的芳香性类富里酸物质所产生. 对于同样来源于生物来源的 B、D 荧光峰, 两者之间也存在极显著正相关 ($r^2=0.60, P<0.001$). 但类腐殖酸荧光峰 A、C 和类蛋白荧光峰 B、D 之间的线性关系则明显要小于 A、C 之间和 B、D 之间的关系, 反映了类腐殖酸和类蛋白荧光来源的差异性.

2.3 CDOM 吸收与荧光峰值的关系

对 CDOM 吸收 $a(355)$ 与其 4 个荧光峰值进行统计相关分析发现, $a(355)$ 类腐殖质荧光 C 峰、A 峰均存在极显著的正相关, 而与类蛋白荧光相关性则明显下降, 与 D 峰存在显著正相关, 与 B 峰没有显著相关. 图 4 为 $a(355)$ 与 C 峰和 D 峰的线性相关图.

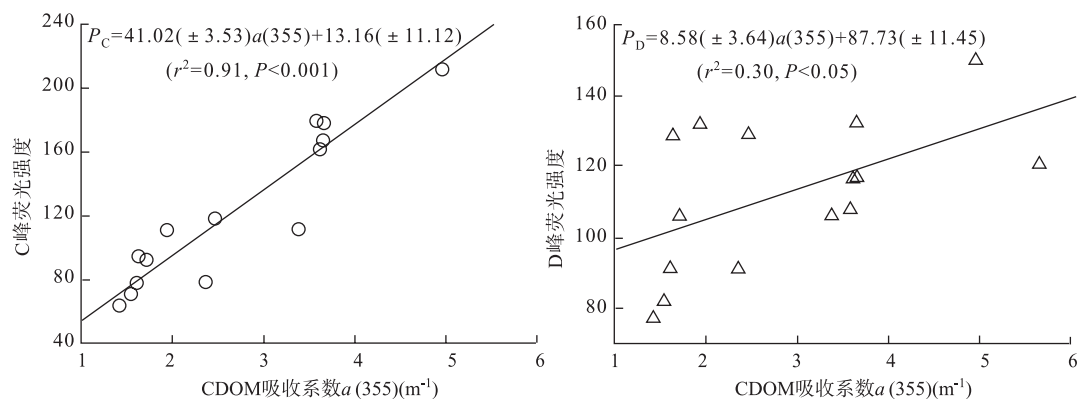


图4 $a(355)$ 与C峰和D峰的线性相关回归

Fig.4 Correlations between CDOM absorption coefficient $a(355)$ and fluorescence intensity of peak C and D

$a(355)$ 与类蛋白荧光相关性比较低一方面可能是受河流输入高的类腐殖酸荧光的影响, 另一方面与类蛋白质中色氨酸和酪氨酸组成有关. Wu等^[25]对以外源输入为主的河流DOM的荧光与DOC浓度的相关分析发现, 类腐殖酸荧光与DOC浓度存在极显著正相关, 而类蛋白荧光与DOC浓度的时空变化要离散得多. 尽管本文的研究结果基本上能初步区分河流输入和生物来源荧光的主导性, 但对类腐殖质和类蛋白荧光从河流往河口及湖泊开敞区的梯度变化过程仍不是很清楚. 此外, 内源生物来源荧光中既有浮游植物降解来源的, 也浮游动物捕食消耗后释放和沉积物孔隙水释放出来的, 而他们之间尚无法有效区分. 因此需要对CDOM荧光从河流往河口和湖泊开敞区的剖面变化过程进行观测, 同时采集水华回实验室进行稀释降解实验, 确定完全来自河流输入和藻降解产物CDOM的三维荧光图谱, 并通过平行因子分析法解析三维荧光图谱, 对CDOM中的特征荧光物质进行定性、定量描述.

3 结论

(1)河口区 $a(355)$ 的变化范围和均值分别为 $3.38-5.65\text{m}^{-1}$ 、 $4.07\pm 0.87\text{m}^{-1}$, 显著大于开敞区的 $1.42-2.46\text{m}^{-1}$ 、 $1.83\pm 0.39\text{m}^{-1}$. $a(355)$ 最大值出现在大浦河口和竺山湾, 最小值出现在东太湖口和胥口湾. DOC 和 COD 的空间变化与 $a(355)$ 类似.

(2)三维荧光光谱显示所有样品一般都含有 4 个明显的荧光峰, 既 2 个类腐殖质荧光 C 峰和 A 峰, 2 个类蛋白荧光 B 峰和 D 峰. 河口区外源输入的类腐殖质荧光强度非常强, 显著大于开敞区, 而开敞区类蛋白荧光相比河口区没有显著下降, 说明开敞区其他来源的类蛋白荧光增加. $r(\text{B/C})$ 可以作为初步区分 CDOM 来源和组成的重要参数, 临界值为 1.

(3) $a(355)$ 与类腐殖质荧光存在极显著的正相关, 而与类蛋白荧光的相关性则明显下降, 暗示 CDOM 中河流来源输入的腐殖酸比例要高于生物来源的类蛋白物质. 但由于太湖属于高初级生产力的富营养化水域, 其有机物的来源和组成非常复杂, 本研究尚无法区分外源和内源各自的贡献率.

致谢: 野外采样得到季江、钱荣树、蔡永久、晁建颖等同志的帮助, 谨表谢意.

4 参考文献

- [1] 秦伯强, 杨柳燕, 陈非洲等. 湖泊富营养化发生机制与控制技术及其应用. 科学通报, 2006, **51**(16): 1857-1866.
- [2] 孔繁翔, 高 光. 大型浅水富营养化湖泊中蓝藻水华形成机理的思考. 生态学报, 2005, **25**(3): 589-595.
- [3] 张运林, 杨龙元, 秦伯强等. 太湖北部湖区COD浓度空间分布及与其它要素的相关性研究. 环境科学, 2008, **29**(6): 1457-1462.
- [4] Yang M, Yu J, Li Z *et al.* Taihu Lake not to blame for Wuxi's woes. *Science*, 2008, **319**: 158.
- [5] Biers EJ, Zepp RG, Moran MA. The role of nitrogen in chromophoric and fluorescent dissolved organic matter formation. *Mar Chem*, 2007, **103**: 46-60.
- [6] Clementson LA, Parslow JS, Turnbull AR *et al.* Properties of light absorption in a highly coloured estuarine system in south-east Australia which is prone to blooms of the toxic dinoflagellate *Gymnodinium catenatum*. *Estuar Coast Shelf S*, 2004, **60**: 101-112.
- [7] 吴丰昌, 王立英, 黎 文等. 天然有机质及其在地表环境中的重要性. 湖泊科学, 2008, **20**(1): 1-12.
- [8] Kowalczyk PT, Stoń-Egiert J, Cooper WJ *et al.* Characterization of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in the Baltic Sea by excitation emission matrix fluorescence spectroscopy. *Mar Chem*, 2005, **96**: 273-292.
- [9] Baker A, Spencer RGM. Characterization of dissolved organic matter from source to sea using fluorescence and absorbance spectroscopy. *Sci Total Environ*, 2004, **333**: 217-232.
- [10] Chen RF, Bissett P, Coble P *et al.* Chromophoric dissolved organic matter (CDOM) source characterization in the Louisiana Bight. *Mar Chem*, 2004, **89**: 257-272.
- [11] Zhang YL, Zhang B, Wang X *et al.* A study of absorption characteristics of chromophoric dissolved organic matter and particles in Lake Taihu, China. *Hydrobiologia*, 2007, **592**: 105-120.
- [12] 水和废水监测分析方法编委会. 水和废水监测分析方法. 北京: 中国环境科学出版社, 1998.
- [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] Frenette JJ, Arts MT, Morin J. Spectral gradients of downwelling light in a fluvial lake(Lake Saint-Pierre, St-Lawrence River). *Aquatic Ecol*, 2003, **37**: 77-85.
- [15] Del Castillo CE, Coble PG, Morell JM *et al.* Analysis of the optical properties of the Orinoco River plume by absorption and fluorescence spectroscopy. *Mar Chem*, 1999, **66**: 35-51.
- [16] 傅平青, 刘丛强, 吴丰昌等. 溶解有机质的三维荧光光谱特征研究. 光谱学与光谱分析, 2005, **25**(12): 2024-2028.
- [17] 郭卫东, 程远月, 吴 芳. 海洋荧光溶解有机物研究进展. 海洋通报, 2007, **26**(1): 98-106.
- [18] 任保卫, 赵卫红, 王江涛. 胶州湾围隔实验中溶解有机物三维荧光特征. 环境科学, 2007, **28**(4): 712-718.
- [19] Baker A. Fluorescence excitation-emission matrix characterization of river waters impacted by a tissue mill effluent. *Environ Sci Technol*, 2002, **36**: 1377-1382.

- [20] 王志刚, 刘文清, 李宏斌等. 三维荧光光谱法分析巢湖 CDOM 的空间分布及其来源. *环境科学学报*, 2006, **26**(2): 275-279.
- [21] 傅平青, 刘丛强, 吴丰昌等. 洱海沉积物孔隙水中溶解有机质的三维荧光光谱特征. *第四纪研究*, 2004, **24**(6): 695-700.
- [22] Coble PG. Characterization of marine and terrestrial DOM in seawater using excitation-emission matrix spectroscopy. *Mar Chem*, 1996, **51**: 325-346.
- [23] Yue LX, Wu FC, Liu CQ *et al.* Relationship between fluorescence characteristics and molecular weight distribution of natural dissolved organic matter in Lake Hongfeng and Lake Baihua, China. *Chinese Sci Bull*, 2006, **51**(1): 89-96.
- [24] Baker A, Curry M. Fluorescence of leachates from three contrasting landfills. *Water Res*, 2004, **38**: 2605-2613.
- [25] Wu FC, Kothawala DN, Evans RD *et al.* Relationships between DOC concentration, molecular size and fluorescence properties of DOM in a stream. *Appl Geochem*, 2007, **22**: 1659-1667.