

不同水文情形下巢湖有色可溶性有机物来源及分布特征

李宇阳^{1,2}, 郭燕妮², 朱俊羽², 周 蕾^{2,3}, 周永强^{2,3}, 胡春华^{1*}

1. 南昌大学资源环境与化工学院, 鄱阳湖环境与资源利用教育部重点实验室, 江西 南昌 330031
2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 江苏 南京 210008
3. 中国科学院大学, 北京 100049

摘 要 于2018年1月(枯水)、4月(平水)、7月(丰水)对巢湖开展野外观测,探讨不同水文条件下有色可溶性有机物(CDOM)的光谱组成结构及分布特征。结果表明丰水期巢湖溶解性有机碳(DOC)均值(3.90 ± 0.40) $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 与枯水期均值(3.89 ± 0.19) $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 无显著差异(t -test, $p > 0.05$),丰水期 $S_{275-295}$ 均值(21.48 ± 1.56) μm^{-1} 显著大于枯水期均值(19.24 ± 0.98) μm^{-1} (t -test, $p < 0.001$)。平行因子分析得到了4个荧光组分,分别为短波类腐殖质组分 C1、类色氨酸组分 C2、类酪氨酸组分 C3 和长波类腐殖质组分 C4。TP, TN, Chl- α 和 DOC 浓度与短波类腐殖质组分 C1、长波类腐殖质组分 C4 都呈显著正相关($p < 0.01$); DOC 与类色氨酸组分 C2 也存在一定正相关($p < 0.05$)。此外巢湖 CDOM 的组成与来源有明显的季节差异性,丰水期陆源类腐殖酸输入是巢湖西部湖区 CDOM 库主要贡献源;平水期湖泊藻类生物降解为重要贡献源。为有效保护巢湖水质,应对十五里河及南淝河流域实施一定的管控措施。

关键词 巢湖; 有色可溶性有机物(CDOM); 平行因子分析(PARAFAC); 荧光; 水质

中图分类号: X143 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2021)10-3286-08

引 言

湖泊蓄调水源、维持区域生态、极大地促进了城市旅游发展、居民生活、工业生产、水产养殖等,是较为宝贵的自然资源。自然湖泊水源供给一般为区域降水,由上游河道汇入湖泊,因而对流域内产生的碳有着强烈的汇集。湖泊碳循环是全球碳循环过程中较为重要的一环,在生态系统物质交换中也扮演着重要角色,但随着人类活动导致的湖泊富营养化的加剧,其物质流循环与碳循环过程也愈发复杂。巢湖是长江中下游半封闭式湖泊,为我国五大淡水湖之一,在供给城乡用水、提供航道交通、保护地区生态、发展渔业资源等方面发挥着重要作用。巢湖作为重要的水源供给地哺育了周边合肥及巢湖市近千万人口,极大地支撑了社会经济发展及文明进步。但由于城市化开发导致的人为过量营养盐输入而导致水质污染,近三十年来巢湖藻华频发,生态环境退化显著。目前巢湖是我国“三湖三河”治理的重点和难点之一。

有色可溶性有机物(chromophoric dissolved organic mat-

ter, CDOM)结构复杂,由腐殖酸、富里酸、脂肪类及芳香烃类等组成。一般而言,自然湖泊中的 CDOM 主要来源于地表径流夹杂的大量陆源土壤有机质输入以及陆源腐殖质淋溶;大型富营养化浅水湖泊中,藻华颗粒死亡降解过程中也会释放大量内源性 CDOM。较高浓度的 CDOM 会使水体自净能力减弱,发黑发臭,且在水质净化与治理过程中产生大量致癌伴生产物,其来源组成直接影响水处理工艺与流程。湖泊中 CDOM 能降解矿化为无机盐及可生物利用小分子 CDOM,维持藻类大量繁殖,使得湖泊生态失衡,从而直接危害人类生产生活^[1]。

CDOM 为水体溶解性有机物中可强烈吸收紫外和可见光的重要组分。相关研究表明,光降解可消解自然水体中约 50% 的 CDOM,此外,微生物的摄取和降解也是 CDOM 消减的重要途径之一。CDOM 的动态变化关乎湖泊水生态健康,其迁移转化过程也影响着全球碳循环,所以关注其迁移转化尤为重要。

三维荧光光谱(EEMs)结合平行因子(PARAFAC)是表征不同荧光物质组成特征的先进技术之一,与传统技术相

收稿日期: 2020-09-22, 修订日期: 2021-01-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(4180070993), 江苏省自然科学基金项目(BK20181104), 中国科学院南京湖泊地理研究所启动基金项目(NIGLAS2017QD08)资助

作者简介: 李宇阳, 1997 年生, 南昌大学资源环境与化工学院硕士研究生 e-mail: liyuyangqq@126.com

* 通讯作者 e-mail: nchuchunhua@163.com

比, 高分辨率荧光光谱可以更加清晰有效地揭示 CDOM 荧光组分峰团信息, 近年来被广泛运用于揭示不同水体中有色可溶性有机物来源与转化^[2]。刘兆冰等利用三维荧光光谱探讨了渤海和北黄海海域 CDOM 分布特征、影响因素和季节变化^[3]。石玉等也用此法分析了太湖水体 CDOM 在不同水文条件下的迁移转化^[4]。而近几年对巢湖 CDOM 动态变化的研究相对较少, 本文通过分析不同水文条件下巢湖 CDOM 组成结构及分布特征, 旨在为研究巢湖碳循环及为湖泊水治理提供参考。

1 实验部分

1.1 样品采集

巢湖位于安徽省中部, 入湖河流众多。东西长 55 km, 南北宽 21 km, 湖岸线周长 176 km, 水面面积 780 km², 平均水深 2.89 m, 流域总面积 13 486 km²。湖水多以地面径流补给, 主要河流为南淝河、十五里河、杭埠河、白石天河、兆河、裕溪河, 其中杭埠河年平均流量最高, 其次为南淝河和兆河。

在巢湖主湖区均匀设置 13 个采样点(图 1)。分别在 2018 年 1、4 和 7 月开展野外采样, 采集完成后, 通过聚乙烯瓶封存再转移至实验室, 共计 39 个水样。取 0.7 μm 的 Whatman GF/F 玻璃纤维滤膜过滤水样, 滤后水以测定溶解性有机碳(dissolved organic carbon, DOC)浓度, 留存滤膜萃取后以测定叶绿素 Chl-*a*。取 0.22 μm 孔径 Millipore 滤膜处理水样, 留存 100 mL 滤后水进行光谱吸收和三维荧光的测定。

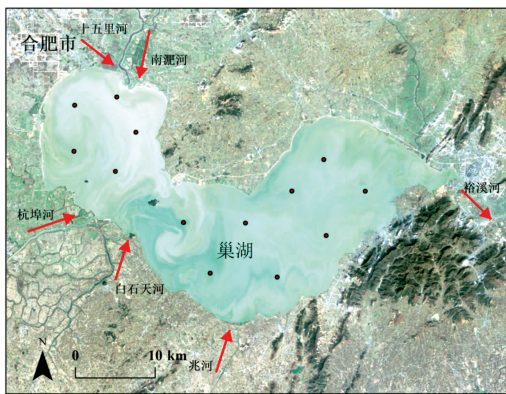


图 1 巢湖采样点位置

Fig. 1 Location of sampling sites in Lake Chaohu in January, April, and July 2018

1.2 水文数据

本研究全部水文数据来源于水利部长江水利委员会, 包括巢湖流域 2018 年 1 月、4 月和 7 月的降雨量、河道流量及相应巢湖平均水位。

1.3 主要水质参数测定

叶绿素 Chl-*a* 测定时, 取 90% 乙醇对留存滤膜高温萃取, 再用分光光度计分别测定波长在 665 和 750 nm 处的吸光度值以对 Chl-*a* 浓度进行计算。用 Shimadzu TOC-L 总有机碳分析仪, 采用 NPOC 扫吹模式, 温度设定为 680 °C 对水

样中溶解性有机碳(DOC)进行测定, 单位 mg · L⁻¹。用岛津公司 UV-2250 紫外分光光度计对总氮(total nitrogen, TN)、总磷(total phosphorus, TP)进行测量, 测量方法参照(GB11894—89)与(GB11893—89)^[5]。

1.4 CDOM 紫外可见吸收光谱参数的测定

CDOM 吸收光谱选用 5 cm 比色皿, 用 Shimadzu UV-2550 UV-Vis 进行扫描, 扫描条件为波长 200~800 nm, 且间隔为 1 nm, 测量时以超纯水 Milli-Q 作为空白计算 CDOM 吸光度。通过减去 700 nm 处吸光度以去除样品中潜在的细微颗粒散射, CDOM 吸收系数的计算公式为^[6]

$$a_{\lambda} = 2.303 \times A_{\lambda} / r \quad (1)$$

式(1)中, a_{λ} 为波长设定在 λ 时 CDOM 的吸收系数(m⁻¹), A_{λ} 表示校正后波长设定为 λ 的吸光度数值, r 即光程路径(m)。

a_{350} 为水样中 CDOM 在 350 nm 处的吸收系数, 吸收系数可以用来表示天然水体中 CDOM 的分子量、腐殖化程度和来源的差异, 一般高分子量 CDOM 在较长的波段有较高的吸收, 而分子量较低 CDOM 在较低波长吸收更强^[7]。本研究以 a_{350} 表征 CDOM 的相对浓度, a_{350} 越大, CDOM 含量越高。 $S_{275 \sim 295}$ 表示 CDOM 的光谱斜率, 是在波长在 275~295 nm 之间, 通过非线性拟合得出, 其值越小, CDOM 的陆源性腐殖酸所占比重越大^[3]。

光谱斜率计算公式为

$$a_{\lambda} = a_{\lambda_0} \times \exp[S(\lambda_0 - \lambda)] \quad (2)$$

式(2)中: S 为光谱斜率, λ 为测定波长, λ_0 为参照波长 440 nm。

1.5 荧光光谱的测定与平行因子分析

采用 Hitachi F-7000 荧光光度计测定水样中 CDOM 激光发射三维荧光光谱 EEMs, 以 Milli-Q 超纯水为空白, 光源为 700 V 氙灯, 激发波长与发射波长分别设定为 200~450 与 250~600 nm, 间隔分别为 5 和 1 nm。测量完成后, 通过 EEMs 扣除空白消除拉曼散射, 瑞利散射峰通过 drEEM 工具包计算消除, 内滤波效应校正采用 EEMs 对应激发发射波长的吸光度, 校正完成后通过将所有 EEMs 定标为当日超纯水空白拉曼信号, 使所得 EEMs 转化为拉曼单位(R. U.)。将所得的光谱数据转入 MATLAB 软件, 利用三维矩阵对其进行平行因子分析计算。

1.6 数据处理

用 ArcGIS 10.2 进行采样点与空间分布图的绘制, 平均数、 t 检验和标准差以 IBM SPSS Statistics 23 进行统计分析, CDOM 荧光组分与 TN, TP, Chl-*a* 和 DOC 浓度的相关性拟合采用 Origin 2018。

2 结果与讨论

2.1 水文条件的划分

根据巢湖流域年均逐月降雨量(1961—2018)见图 2, 将三次野外观测分别划分为枯水期(1 月, 降雨量为 35.64 mm)、平水期(4 月, 降雨量为 90.88 mm)、丰水期(7 月, 降雨量为 173.77 mm)。

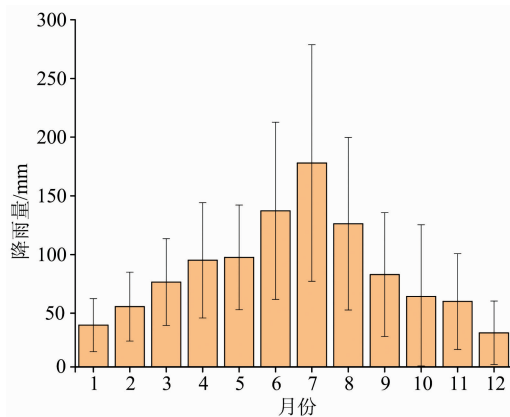


图 2 巢湖流域年平均逐月降雨量

Fig. 2 Monthly average rainfall in the Chaohu Lake Basin from (1961—2018)

2.2 不同水文条件下巢湖 CDOM 光学特性和 DOC 的响应

由表 1 可知, 巢湖湖区的 CDOM 吸收系数 a_{350} 均值在丰水期和枯水期没有较大差异, 其丰水期高值主要分布于西部湖区, 即上游十五里河、南淝河入湖口; 枯水期高值主要分布于兆河入湖口; 这意味着丰水期由于地表径流夹杂大量陆源 CDOM 汇入, 使西部湖区 CDOM 浓度显著高于其他湖区。与 a_{350} 相比, 丰水期光谱斜率 $S_{275\sim 295} \mu\text{m}^{-1}$ 低值主要分布于西部湖区, 恰好说明了随着十五里河、南淝河的到来水量输入, 西部湖区 CDOM 的芳香性不断提升, 即丰水期巢湖湖区 CDOM 主要来源于陆源输入。由图 3 可知, 巢湖湖区枯水期、平水期、丰水期 DOC 分布与 a_{350} 有极大的相似性, 而 $S_{275\sim 295} \mu\text{m}^{-1}$ 分布与之恰好相反, 进一步证实了 DOC 浓度与 CDOM 吸收系数 a_{350} 有着显著正相关关系。

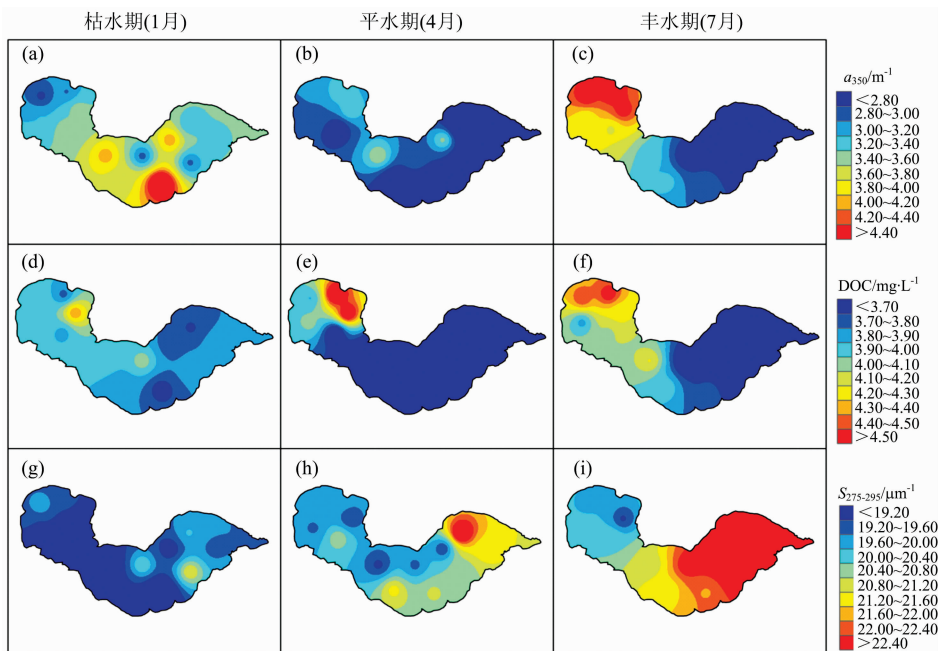


图 3 巢湖枯水、平水和丰水期 a_{350} , DOC, $S_{275\sim 295}$ 空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of dead, flat water and water-rich a_{350} , DOC, $S_{275\sim 295}$

表 1 巢湖 CDOM 光学组成指标在枯水期和丰水期均值对比及 t 检验结果

Table 1 Comparison of mean and t -test results of the CDOM optical indices of Lake Chaohu during the dry and the wet seasons

时期	DOC/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$S_{275\sim 295} /$ μm^{-1}	$a_{350} /$ m^{-1}	荧光强度/R. U.			
				C1	C2	C3	C4
枯水期	3.89 ± 0.19	19.24 ± 0.98	3.50 ± 0.64	0.84 ± 0.07	0.71 ± 0.16	0.26 ± 0.05	0.15 ± 0.02
丰水期	3.90 ± 0.40	21.48 ± 1.56	3.31 ± 0.90	0.76 ± 0.17	0.48 ± 0.07	0.25 ± 0.03	0.17 ± 0.05
p 值	>0.05	<0.001	>0.05	>0.05	<0.001	>0.05	<0.05

2.3 平行因子分析结果

用 PARAFAC 模型对巢湖水样的三维荧光光谱矩阵进行解析和对半检验, 计算得出了四种荧光组分(见图 4)。波长在 250/410 nm 处的短波类腐殖质 C1 组分, 一般可归为土壤有机质或陆生植物残体, 通常由地表径流带入湖泊^[8]。一

个发射波长在 330 nm, 两个激发波长在 230 和 285 nm 处的是类色氨酸组分 C2, 一般为藻源性 DOM 经生物降解或者生活污水产生。类酪氨酸组分 C3 波长为 275/315 nm 处, 一般为具有多芳香性的类蛋白组分, 通常是生物降解或者微生物矿化产物。发射波长在 235 nm, 两个激发波长在 265 和 460

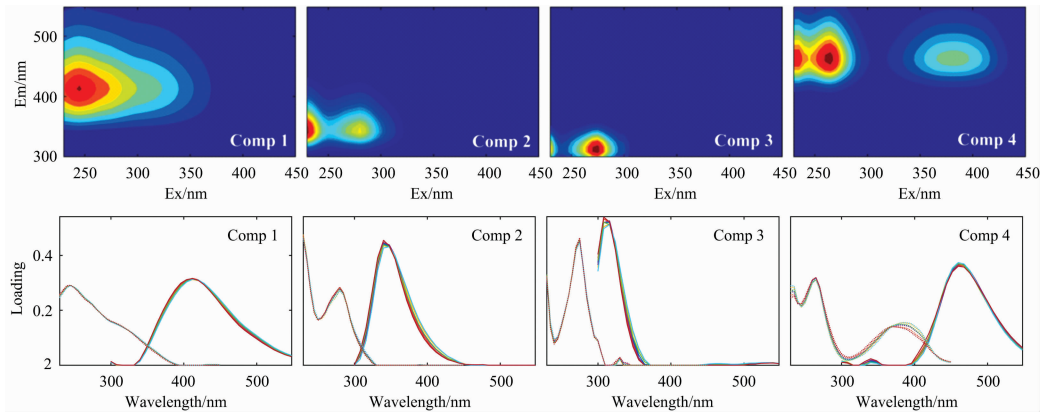


图 4 平行因子分析得到的 3 个荧光组分激发发射荧光图谱和对半检验

Fig. 4 The three fluorescent components obtained using parallel factor analysis and the split-half validation results were also shown

nm 处的是长波类腐殖质 C4，一般为陆生源，亦即土壤及地表有机碎屑淋溶输入。

2.4 荧光组分空间分布

由表 1 可知，丰水期荧光组分 C2 显著低于枯水期 (t 检验, $p < 0.001$)；组分 C4 显著高于枯水期 (t 检验, $p < 0.05$)；组分 C1、C3 在丰水期、枯水期并无显著差异 (t 检验, $p > 0.05$)。从空间分布(图 5、表 2)来看，各组分荧光强度因水文条件改变而有所不同，陆源类腐殖质组分 C1 和 C4 高值主要分布于十五里河、南淝河入湖口，且随着来水量的增大其荧光强度不断提高，这可能是由于地表径流所携带的

大量陆源类腐殖质通过十五里河、南淝河汇入巢湖湖区，且南淝河常年流量较大，流速较快，较高的流速对河岸进行冲刷也会使更多的类腐殖质物质进入湖区，这也与 2.2 中 DOC 和 CDOM 吸收系数 a_{350} 结果相吻合。组分 C2 高值主要分布于西部湖区东沿岸，这可能与当地排放工业废水和生活污水有关，且随着水量增加的稀释作用，其荧光强度逐渐降低。组分 C3 高值出现在平水期，分析认为随着季节变化，温度逐渐升高，加之氮磷营养盐的浓度的提升，湖内藻类开始生长繁殖致使组分 C3 荧光强度升高。

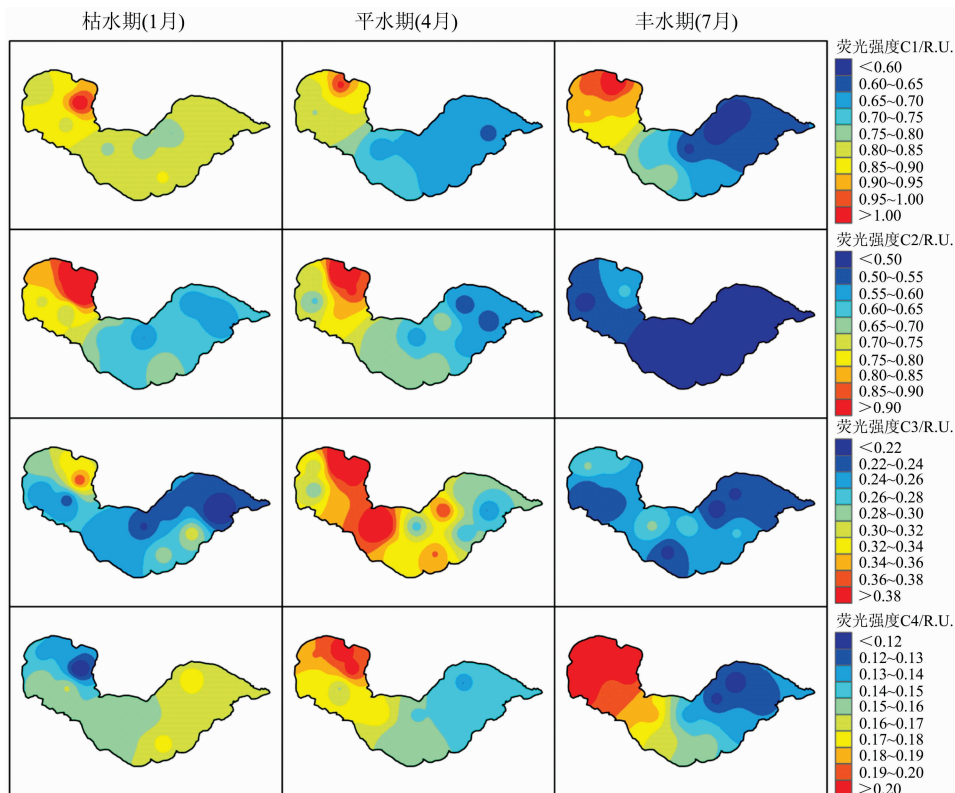


图 5 巢湖枯水、平水和丰水期四种荧光组分的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of the four fluorescent components in the dry, the wet-to-dry transition, and the wet seasons

2.5 水质参数的空间分布及与荧光组分的相关性分析

采样期间, Chl-*a* 值从枯水的 $6.2 \sim 23.7 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 增大到丰水期的 $25.0 \sim 2860.6 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。从空间分布来看, Chl-*a* 高值主要分布于十五里河、南淝河入湖口, 且由入湖口向主湖区逐步扩散, 与 TP 和 TN 的分布相类似, 也意味着湖区藻类爆发主要源于十五里河、南淝河氮磷的输入。

在杭埠河入湖口出现了较明显的低值, 可能是因为杭埠河流量较大, 入湖口流速较快, 较强的水力扰动抑制了藻类

生长, 且随着来水量的增大, 稀释了水体中的氮磷。

在本研究中, DOC 与短波类腐殖质 C1 相关性最好 ($r^2 = 0.60, p < 0.001$); TN, TP 与短波类腐殖质 C1 也有较显著的相关性 ($r^2 = 0.33, p < 0.001$; $r^2 = 0.26, p < 0.01$); DOC 与类色氨酸 C2 显著正相关 ($r^2 = 0.13, p < 0.05$); TN, TP 与长波类腐殖质 C4 显著正相关 ($r^2 = 0.48, p < 0.001$; $r^2 = 0.50, p < 0.001$), 见图 6 与表 2。

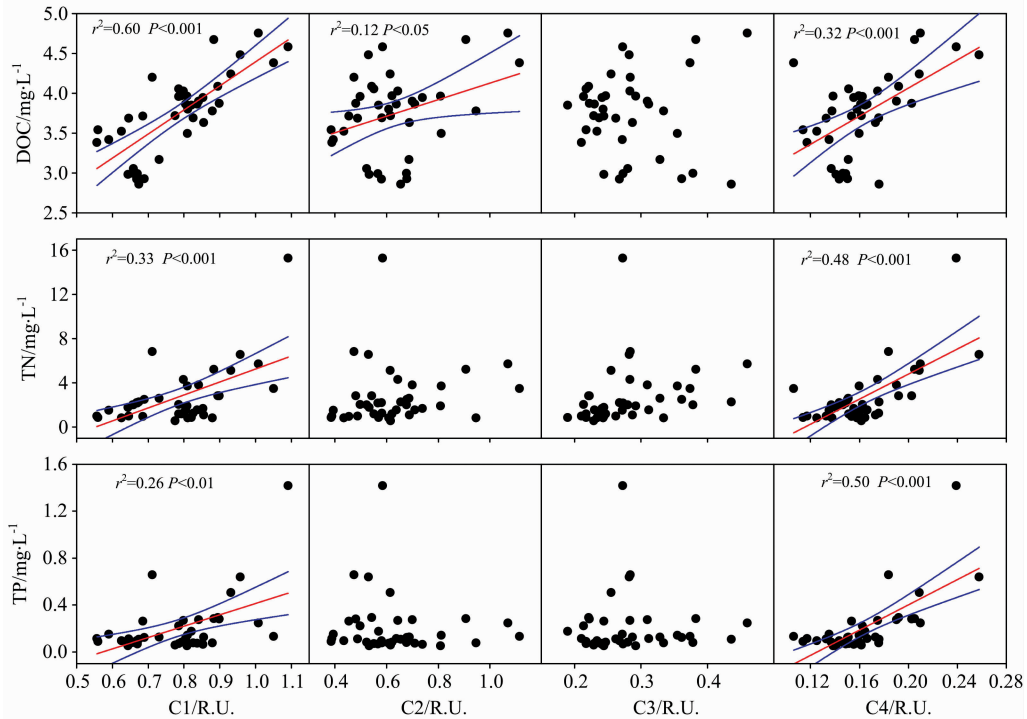


图 6 DOC, TN, TP 与短波类腐殖质组分 C1、类色氨酸组分 C2、类酪氨酸组分 C3、长波类腐殖质 C4 的相关性

Fig. 6 Correlation between DOC, TN, TP and shortwave humus components C1, tryptophan component scolinc C2, tyrosine component C3, and longwave humus components C4

表 2 短波类腐殖质 C1、类色氨酸 C2、类酪氨酸 C3、长波类腐殖质 C4 与水质参数的皮尔逊相关系数

Table 2 Pearson correlation coefficient between microbial humic-like C1, tryptophan-like C2, tyrosine-like C3, and terrestrial humic-like C4 and water quality parameters

	TN	TP	Chl- <i>a</i>	DOC
C1	0.57**	0.51**	0.42**	0.78**
C2	0.16	-0.10	-0.15	0.35*
C3	0.26	0.01	-0.06	0.01
C4	0.69**	0.70**	0.57**	0.57**

自然湖泊的 CDOM 主要来源于有机质的外源输入以及水生植物生命活动的内源产生。由于不同湖泊地理的独特性以及入湖水源的不同, 自然湖泊水系中的 CDOM 的组成和水平可能会发生变化^[9]。姚昕等的研究表明东平湖丰水期 CDOM 同时受外源和内源输入的影响, 但以内源输入为主, 主要来源于浮游植物降解产物^[10]。有研究显示丰水期入湖

河流输入是洪泽湖、骆马湖两湖泊 CDOM 的主要贡献源, 且不同水文条件下洪泽湖 CDOM 陆源类腐殖质占主导地位。

巢湖是长江中下游五大淡水湖之一, 湖水主要靠地面径流供给, 由十五里河、南淝河、杭埠河等河流从南、西、北三面汇入湖区, 然后经裕溪河流入长江。由于巢湖流域入湖河流较多, 湖区内 CDOM 组成成分较为复杂。已有研究表明, 巢湖入湖河流主要污染来源为有机污染, 且南淝河、十五里河流经市区, 其污染等级最高。耿世雄等利用三维荧光光谱分析了巢湖入湖河流南淝河水体水样, 结果表明南淝河腐殖酸和类蛋白成分较为显著, 即南淝河有机物主要为人为输入^[11]。在本研究中枯水期 CDOM 高值主要位于兆河入湖口, 丰水期高值位于十五里河、南淝河入湖口, 并且在入湖口得到了较强的陆源 CDOM 特征, 且随着来水量的增大表现出从入湖口向主湖区扩散的趋势, 此时外源有机质输入是巢湖西部湖区 CDOM 的主要贡献源, 这一点在 $S_{275 \sim 295}$ 分布上也有所体现。在平水期, 随着季节变化, 温度的升高与外源 N 和 P 的输入, 湖区内藻类开始生长繁殖, C3 类酪氨酸组分达

到高值,且在分布上也与 Chl-*a*、TP 和 TN 有一定的相似性,此时巢湖湖区 CDOM 作要贡献源为藻类的降解产生,这也证实了不同水文条件对巢湖的 CDOM 来源有着显著的影响。

巢湖水体中两种陆源类腐殖质和两种类蛋白组分也有显著季节性变化,陆源类腐殖质组分 C1 和 C4 均受入湖河流影响较大,在分布上有一定的相似性,高值主要分布于西部湖区十五里河、南淝河入湖口,且随着来水量的增大,荧光强度不断升高,由枯水期到平水期再到丰水期有向主湖区扩散的趋势,这可能是由于季节更替,流域内雨量增加,难降解的陆源类腐殖质随地表径流不断向湖区输入。相比之下,类蛋白组分 C2 荧光强度由枯水期到平水期再到丰水期不断降低,在丰水期荧光强度最低,这可能是由于类蛋白组分 C2 与污水水质有关,枯水期巢湖水位低,降解污染物能力不足^[12],组分 C2 受合肥市生活污水处理影响较大,而丰水期,来水量增大,对巢湖污染物有一定的稀释作用,且丰水期光照较强,类蛋白组分易光解。由此可见,类腐殖质组分与类蛋白组分来源具有差异性,不同的水文条件巢湖 CDOM 组成也有所不同。

降水,农业灌溉,生活污水排入和水生植物的生命活动都会影响湖泊 CDOM 的组成与来源。在现有的研究中,DOC 浓度与水温,Chl-*a*,无机氮息息相关,也表现出明显的季节差异性。叶琳琳在研究中指出,温度的升高可以促进藻类的光合作用过程,加快产物的生成增加内源性 DOC,也可以促

进土壤 DOC 循环释放增加外源 DOC 的输入^[13]。在本研究中,DOC 浓度与陆源短波类腐殖质 C1 的相关性较之于其他组分来说最好,这可能是由于巢湖入湖河流南淝河的年平均流量较大,且污染较为严重,含高浓度 DOC 的河水汇入导致巢湖 DOC 有明显的自西向东扩散趋势,这一点也与叶琳琳的研究相吻合。

目前巢湖已出现湖泊生态系统失衡、水体自我调节能力弱、供给饮用水水质不达标等问题。从本文数据来看,为应对巢湖水质恶化,应主要对流经合肥市区的河流进行治理和监测(特别是在降雨量较大的月份)。随着上游河流的污染,外源 CDOM 的输入量不断增加,且由于氮磷等营养盐的输入而导致的富营养化,也会让内源 CDOM 不断产生,而蓝藻水华也会降低水体透明度进而影响 CDOM 的光降解。CDOM 作为光学上可测量的成分,其陆源腐殖质成分 C1、C4 分布与污染物的输入及其相似,类酪氨酸组分 C3 也与藻类的生命活动息息相关,基于此,今后可从不同月份 CDOM 光学组分与水质要素的相关性入手,以期对巢湖水质恶化和富营养化风险进行评估。采样期间,丰水期湖区藻类爆发,水体浑浊,由于南淝河和十五里河污染程度较严重,且流量较高,应当作为治理重点,在河流上游排查污水暗管,整治街道生活污水排放,定时河道清污,在适宜段放置生态浮岛,尽可能改善河流水质,减少汇入巢湖的污染。

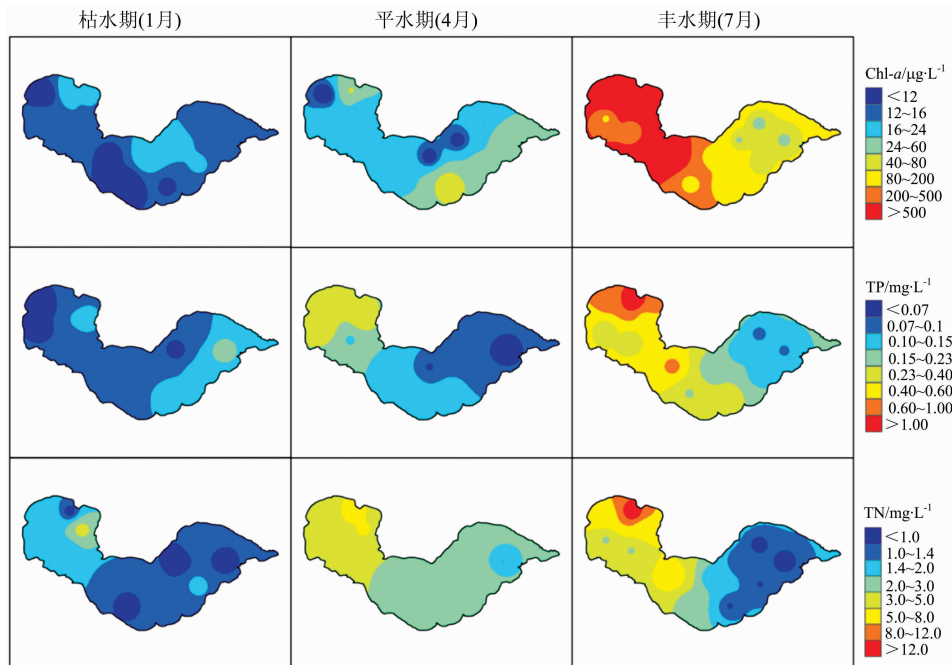


图 7 巢湖枯水、平水、丰水期的 Chl-*a*, TP, TN 空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of Chl-*a*, TP, TN in Lake Chaohu in the dry, the wet-to-dry transition, and the wet seasons

3 结 论

(1) 巢湖 CDOM 的组成与来源有明显的季节差异性,枯水期与丰水期,入湖口出现 a_{350} 的高值与 $S_{275-295}$ 的低值,且

陆源类腐殖质 C1、C4 有从入湖口向湖区扩散的趋势,此时陆源输入是西部湖区主要贡献源;平水期主湖区 CDOM 浓度不高但类酪氨酸 C3 组分显著大于其他荧光组分,此时主要污染贡献源为藻类的降解。

(2) 本研究中巢湖 TN, TP, Chl-*a* 和 DOC 浓度均与陆

源类腐殖质 C1 和 C4 均有很好的相关性, DOC 与类色氨酸 C2 有较好的相关性。即巢湖 CDOM 与 N、P 元素的迁移转化密切相关, 与 DOC 定量相关。

(3) 巢湖 TN, TP 和 DOC 受外源输入影响较大, 且由于夹杂了大量高浓度有机物的河水汇入, 丰水期巢湖水质较

差, Chl-*a* 浓度高, 宜在南淝河和十五里河定期开展河道清污。

致谢: 感谢邹伟、施坤、石玉、李元鹏、张柳青、李娜及张成英等同志在野外及室内实验过程中给予的帮助。

References

- [1] Wang M, Chen Y. Chemosphere, 2018, 201(6): 196.
- [2] Ying Z, Song K, Wen Z, et al. Biogeoences Discussions, 2015, 12(7): 5725.
- [3] LIU Zhao-bing, LIANG Wen-jian, QIN Li-ping, et al(刘兆冰, 梁文健, 秦礼萍, 等). Environmental Science(环境科学), 2019, 40(3): 1198.
- [4] SHI Yu, ZHOU Yong-qiang, ZHANG Yun-lin, et al(石 玉, 周永强, 张运林, 等). Environmental Science(环境科学), 2018, 39(11): 4915.
- [5] GUO Yan-ni, LI Yuan-peng, SHI Yu, et al(郭燕妮, 李元鹏, 石 玉, 等). Environmental Science(环境科学), 2020, 41(5): 2198.
- [6] Matsuoka A, Ortega-Retuerta F, Bricaud A, et al. Deep Sea Research Part II Topical Studies in Oceanography, 2015, 118: 44.
- [7] Shao T, Wang T, Liang X, et al. River Research and Applications, 2019, 35(7): 905.
- [8] ZHAO Xia-ting, LI Shan, WANG Zhao-wei, et al(赵夏婷, 李 珊, 王兆伟, 等). Environmental Science(环境科学), 2018, (9): 4105.
- [9] Song K S, Shang Y X, Wen Z D, et al. Water Research, 2019, 150: 403.
- [10] YAO Xin, LÜ Wei-wei, LIU Yan-long, et al(姚 昕, 吕伟伟, 刘延龙, 等). China Environmental Science(中国环境科学), 2018, 38(8): 3079.
- [11] GENG Shi-xiong, LI Zhen-yu, LI Hai-bin, et al(耿世雄, 李振宇, 李海斌, 等). Journal of Anhui Jianzhu University(安徽建筑大学学报), 2019, 27(4): 53.
- [12] LIU Li-zhen, HUANG Qi, WU Yong-ming, et al(刘丽贞, 黄 琪, 吴永明, 等). China Environmental Science(中国环境科学), 2018, 38(1): 293.
- [13] YE Lin-lin, WU Xiao-dong, LIU Bo, et al(叶琳琳, 吴晓东, 刘 波, 等). Environmental Science(环境科学), 2015, 36(9): 3186.

Characterizing Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in Lake Chaohu in Different Hydrologic Seasons

LI Yu-yang^{1, 2}, GUO Yan-ni², ZHU Jun-yu², ZHOU Lei^{2, 3}, ZHOU Yong-qiang^{2, 3}, HU Chun-hua^{1*}

1. Key Laboratory of Poyang Lake Environment and Resource Utilization, Ministry of Education, School of Resources Environmental & Chemical Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China
2. Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In this paper, water samples were taken from Lake Chaohu in January (dry), April (wet-to-dry transition), and July (wet) to explore the spectral composition and distribution characteristics of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) under different hydrologic conditions. Our results showed that there was no significant difference between the mean of dissolved organic carbon (DOC) in the wet season (3.90 ± 0.40) $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and in the dry season (3.89 ± 0.19) $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$. The mean spectral slope of CDOM, i. e. $S_{275-295}$ in the wet season (21.48 ± 1.56) μm^{-1} was significantly higher than that in the dry season (19.24 ± 0.98) μm^{-1} (*t*-test, $p < 0.001$). Using CDOM fluorescence and parallel factor analysis, four fluorescence components were obtained including a microbial humic-like C1, a tryptophan-like C2, a tyrosine-like C3, and a terrestrial humic-like C4. C1 and C4 increased with increasing TP, TN, Chl-*a*, and DOC ($p < 0.01$), and we further found a positive relationship between DOC and tryptophan-like C2 ($p < 0.05$). There were seasonal differences in the optical component and sources of CDOM in Chaohu. In the wet season, terrestrial humic-rich CDOM contributed primarily while in the wet-to-dry transition season, autochthonous CDOM derived from algal degradation contributed to the lake's CDOM pool. In order to protect the water quality of the lake effectively, certain control measures should be carried out in the watersheds of the Shiwuli River and the Nanfei River.

Keywords Lake Chaohu; Chromophoric dissolved organic matter; Parallel factor analysis (PARAFAC); Fluorescence; Water quality

* Corresponding author

(Received Sep. 22, 2020; accepted Jan. 17, 2021)

《光谱学与光谱分析》投稿简则

《光谱学与光谱分析》是由中国科协主管,中国光学学会主办,钢铁研究总院、中国科学院物理研究所、北京大学、清华大学共同承办的专业学术期刊。国内外公开发行人,从 2004 年起为月刊,大 16 开本,每期 332 页。《光谱学与光谱分析》主要报道我国光谱学与光谱分析领域内具有创新性科研成果,及时反映国内外光谱学与光谱分析的进展和动态;发现并培育人才;推动和促进光谱学与光谱分析的发展。为科教兴国服务。读者对象为从事光谱学与光谱分析的科研人员、教学人员、分析测试人员和科研管理干部。

栏目设置和要求

1. 研究报告 要求具有创新性的研究成果,一般文章以 8000 字(包括图表、参考文献、作者姓名、单位和中文、英文摘要,下同)为宜。
2. 研究简报 要求在前人研究的基础上有重大改进或阶段性研究成果,一般不超过 5000 字。
3. 评述与进展 要求评述国内外本专业的发展前沿和进展动态,一般不超过 10000 字。
4. 新仪器装置 要求介绍新型光谱仪器的研制、开发、使用性能和应用,一般不超过 5000 字。
5. 来稿摘登 要求测试手段及方法有改进并有应用交流价值,一般以 3000~4000 字为宜。

稿件要求

1. 投稿者请经本刊编委(或历届编委)一人或本专业知名专家推荐,并附单位保密审查意见及作者署名顺序,主要作者介绍。文章有重大经济效益或有创新者,请说明,同时注明受国家级基金或国家自然科学基金资助情况。
2. 来稿要观点明确、数据真实可靠、层次分明、言简意明、重点突出。来稿必须是网上在线投稿(含各种符号和外文字母大写、小写、正体、斜体;希腊字母、拉丁字母;上角、下角标位置应标清楚)。中文摘要以 800 字为宜,英文摘要(建议经专业英语翻译机构润色)与中文摘要要对照;另附关键词。要求来稿应达到“齐、清、定”,中文、英文文字通顺,方可接受送审。
3. 为了进一步统一和完善投稿方式、缩短论文发表周期,本刊只接收网上在线投稿,不接收以邮寄方式或 e-mail 方式的投稿,严禁“一稿多投”,对侵权、抄袭、剽窃等学术不端行为,一经发现,取消三年投稿资格。
4. 文中插图要求完整,图中坐标、线条、单位、符号、图注等应标注准确、完整。如作者特殊要求需出彩色插图者,必须在投稿时事先加以说明,并承担另加的彩印费用。图幅大小:单栏图 7.5cm(宽)×6cm(高);双栏图:14cm(宽)×6cm(高);图中数字、图题、表题全部用中文、英文对照,图中数字、中文、英文全用 6 号字。电子文档中除实物图外,曲线图要用 Matlab, Excel, Visio 或 Origin 等软件制作,稿件中图片的原图并转成相应(可编辑)的文件格式(.fig, .xls, .vsd, .opj),非“.jpg”格式的文档,随电子版修改稿一同发送到本刊的修改稿专用邮箱。
5. 文中出现的单位必须按“中华人民共和国计量标准”及有关 GB 标准规定缮写。物理量符号一律用斜体,单位符号和词头用正体字母。
6. 名词术语,请参照全国科学技术名词规定缮写。
7. 参考文献,采用顺序编码制,只列主要文献;以 15~20 条为宜。内部资料、私人通讯、未经公开发表的一律不能引用。日文、俄文等非英文文献,请用英文表述;中文文献和中文图书采用中、英文对照表述,文献缮写格式请参照本刊。
8. 请在投稿第一页左下角写明投稿联系人的电话和两个 e-mail,以便及时联系。

稿件处理

1. 自收到稿件之日起,一个月内作者会收到编辑部的稿件处理意见。请根据录用通知中所提出的要求认真修改,希望修改稿在 30 天内寄回编辑部,并作为作者最终定稿(当作者接到校样时,以此修改稿为准进行校对,请勿再做大的改动),若二个月内编辑部没收到修改稿,将视为自行撤稿处理。
2. 有重大创新并有基金资助者可优先发表;不录用的稿件,编辑部将尽快通知作者,底稿一律不退,请自留底稿。
3. 来稿一经发表将酌致稿酬并送样刊 2 册。
4. 遵照《中华人民共和国著作权法》,投稿作者须明确表示,该文版权(含各种媒体的版权)授权给《光谱学与光谱分析》期刊社。国内外各大文献检索系统摘录本刊刊出的论文;凡不同意被检索刊物无稿酬摘引者,请在投稿时事先声明,否则,本刊一律认为已获作者授权认可。
5. 修改稿请寄:100081 北京市海淀区学院南路 76 号(南院南门),《光谱学与光谱分析》期刊社(收)
电话:010-62182998 或 62181070 传真:010-62181070
e-mail: chngpxygpfx@vip.sina.com; 修改稿专用邮箱: gp2008@vip.sina.com 网址: http://www.gpxygpfx.com