

DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2018.0600

张广彩, 于会彬, 徐泽华, 等. 基于三维荧光光谱结合平行因子法的蘑菇湖上覆水溶解性有机质特征分析[J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35 (7): 933-939.

ZHANG Guang-cai, YU Hui-bin, XU Ze-hua, *et al.* The Characteristics of Dissolved Organic Matter in the Overlying Water of Moguhu Lake Based on Three Dimensional Fluorescence Spectrum and Parallel Factor Method[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2019, 35(7): 933-939.

基于三维荧光光谱结合平行因子法的蘑菇湖上覆水溶解性有机质特征分析

张广彩^{1,2}, 于会彬², 徐泽华¹, 宋永会², 韩美¹ (1. 山东师范大学地理与环境学院, 山东 济南 250014; 2. 中国环境科学研究院, 北京 100012)

摘要: 溶解性有机质(dissolved organic matter, DOM)广泛存在于水体、土壤和沉积物中,在自然系统有机物向无机物的转换过程中起重要作用。DOM作为载体可影响污染物迁移转化,作为碳源和营养元素又为微生物提供能量。为探讨湖泊水体中DOM组成、来源和腐殖化程度,以蘑菇湖上覆水为例,采用三维荧光光谱(3DEEM)结合平行因子法(PARAFAC)分析蘑菇湖上覆水DOM组分,利用荧光指数(FI)、自生源指标(BIX)和腐殖化指数(HIX)等光谱指数研究DOM来源和腐殖化程度,并通过FI与最大荧光强度(F_{\max})的相关性解释DOM种类和特征。结果表明:(1)蘑菇湖上覆水DOM包含4种组分,其中C1和C4为富里酸物质,C2为类蛋白中色氨酸物质,C3为腐殖酸物质;(2)蘑菇湖上覆水DOM以微生物内源代谢产物为主,生物可利用性较高,腐殖化程度较低;(3)各组分 F_{\max} 与FI间均呈正相关关系,其中富里酸与FI之间呈显著正相关($r=0.89, P<0.01$)。这表明蘑菇湖上覆水DOM主要为含羰基、羟基等活性官能团的相对分子质量小,且腐殖化、芳香性和分子缩合度较低的一类富里酸物质。

关键词: 溶解性有机质(DOM); 三维荧光光谱; 平行因子分析; 光谱指数; 蘑菇湖

中图分类号: X524; O657.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4831(2019)07-0933-07

The Characteristics of Dissolved Organic Matter in the Overlying Water of Moguhu Lake Based on Three Dimensional Fluorescence Spectrum and Parallel Factor Method. ZHANG Guang-cai^{1,2}, YU Hui-bin², XU Ze-hua¹, SONG Yong-hui², HAN Mei¹ (1. School of Geography and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250014, China; 2. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: Dissolved organic matter is an essential effect on the conversion exchange between organic matter and inorganic matter in nature environment, which is widely distributed in water, soil and sediments. As a pollutants carrier, it affects the migration and transformation of contaminants, while it also provides carbon source and nutrients for microorganisms. For exploring the composition, source and humification degree of DOM in Moguhu Lake, the components of DOM in the overlying water was analyzed by using three-dimensional fluorescence spectroscopy combined with parallel factors. The source and humification degree were studied by means of spectral index (FI, HIX, BIX), and the correlation and relationship between FI and F_{\max} were used to explain the type and characteristics of DOM. The results show that in Moguhu Lake, DOM of overlying water contains four components, which are two represent fulvic acid substances for C1 and C4, tryptophan in the protein C2 and humic acid C4. Secondly, the DOM is mainly composed from microbial endogenous metabolites with high bioavailability and low degree of humification. Positive correlation was found between each component F_{\max} and FI, and a significant positive correlation existed between fulvic acid and FI. According to previous studies, in Moguhu Lake, the primary component of DOM is fulvic acid-like substance, which contains a reactive functional group such as a carbonyl group or a hydroxyl group with small molecular, and with characteristics of a low degree of humification, aromaticity, and low molecular condensation.

Key words: dissolved organic matter (DOM); three-dimensional fluorescence spectrum; parallel factor analysis; spectral index; Moguhu Lake

收稿日期: 2018-09-25

基金项目: 国家自然科学基金(41371517)

① 通信作者E-mail: hanmei568568@126.com

溶解性有机质(dissolved organic matter, DOM)指能通过 $0.45\ \mu\text{m}$ 孔径滤膜的由羟基(—OH)、醛基(—CHO)、羧基(—COOH)、氨基(—NH₂)和羰基(—C=O—)等多种官能团组成的异质混合物^[1]。DOM体积小,但具有高度流动性、不稳定性和活性,广泛存在于自然和工程水体中^[2-3]。在自然水体中,DOM主要来源于陆域或水体的动植物残体、植物根系分泌物和藻类等^[4],经微生物分解产生有机分子混合物,相对分子质量为几百到几万道尔顿之间^[5]。DOM在水生物化学过程中起到至关重要的作用,是重金属、营养盐和多环芳烃等物质迁移转化过程中的重要载体^[4-5],也是水生态系统中异养型微生物的重要碳源^[6]。

目前,国内外对于DOM的研究主要集中于其来源、分布、组成结构特征、迁移转化规律和生物毒性等方面^[7-8]。研究所采用技术主要为紫外-可见光谱(UV-vis)、三维荧光光谱(3DEEM)、傅里叶红外变换光谱(FTIR)和体积排阻色谱(SEC)等技术的单独或集成应用,并借助多元统计方法对DOM进行定量或定性表征^[9-11]。光谱技术具有分析便捷迅速、样品前处理简单、成本低廉等优点^[12],是研究DOM元素、官能团、化学键和分子空间构型的主要表征技术^[13]。李帅东等^[7]采用UV-Vis和3DEEM技术对环滇池地区土壤中DOM结构特征及来源进行研究,发现环滇池地区土壤以外源性、自生源特征不明显的类富里酸物质为主。

DOM由于其自身复杂性和多样性,在光谱扫描中容易发生荧光重叠和干扰^[14],弱小荧光峰难以被识别。近年来,平行因子法(parallel factor, PARAFAC)被广泛应用于DOM荧光特性分析,该方法不仅能识别与分离3DEEM中受到干扰及重叠的荧光峰,还能半定量表征DOM各荧光组分特征^[15]。采用3DEEM技术结合PARAFAC法,利用光谱指数对蘑菇湖水体DOM组成、特性和分布特征进行研究,可了解蘑菇湖水生生态系统中DOM组成、特征结构变化和迁移,为蘑菇湖TN、TP、重金属和有毒有害物质长期控制、环境变化预测以及环境管理措施制定提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

蘑菇湖($44^{\circ}25' \sim 44^{\circ}29' \text{ N}$, $85^{\circ}52' \sim 85^{\circ}58' \text{ E}$)位于新疆石河子市玛纳斯河畔,由一片自然洼地形成(图1)。蘑菇湖水库最大蓄水面积为 $31.6\ \text{km}^2$,设

计库容为 $1.8\ \text{亿}\ \text{m}^3$,正常蓄水位为 $390.80\ \text{m}$,死水位为 $379.50\ \text{m}$,年调节水量为 $1.94\ \text{亿}\ \text{m}^3$,控制灌溉面积为 $800\ \text{km}^2$ 。流域属于典型大陆性干旱气候区,多年平均气温为 $7.4\ ^{\circ}\text{C}$,夏季极端最高气温为 $42.2\ ^{\circ}\text{C}$,冬季极端最低气温为 $-39.8\ ^{\circ}\text{C}$, $\geq 10\ ^{\circ}\text{C}$ 积温为 $3\ 570 \sim 3\ 729\ ^{\circ}\text{C}$;无霜期为 $168 \sim 171\ \text{d}$;年平均降水量为 $210.6\ \text{mm}$,主要集中在4—8月。蘑菇湖主要接纳农田退水和玛纳斯河洪水,起到纳污、分流洪水和灌溉下游农田的作用。

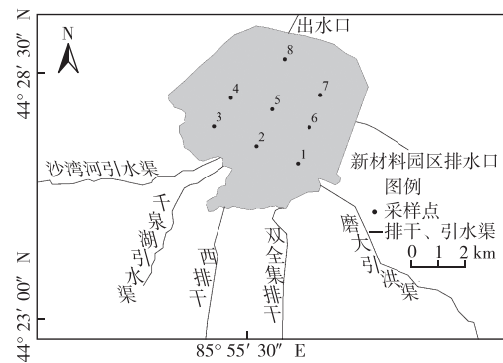


图1 蘑菇湖上覆水采样点位分布

Fig. 1 Distribution of overlying water sampling points on Moguhu Lake

1.2 样品采集

于2017年10月使用 $2.5\ \text{L}$ Van Dom采水器在蘑菇湖水库滨湖区(采样点1~3)、浅湖区(采样点4~6)和深湖区(采样点7~8)水深 $50\ \text{cm}$ 处进行3次采样。将3次水样完全混合,装入等容量聚乙烯塑料瓶中,在 $4\ ^{\circ}\text{C}$ 条件下避光保存,运回实验室进行光谱扫描及理化性质检测。

1.3 实验方法

将所采集水样过 $0.45\ \mu\text{m}$ 孔径醋酸纤维素滤膜后,得到DOM溶液,并将DOM溶液稀释到10倍,以降低内部滤波器效应^[16]。采用TOC分析仪(日本岛津TOC-L CPN CN200)测定样品DOC浓度,采用荧光分光光度计(日立F7000)检测样品3DEEM。荧光分光光度计光源为 $150\ \text{W}$ 氙灯, PMT电压为 $700\ \text{V}$,激发波长为 $200 \sim 450\ \text{nm}$,发射波长为 $260 \sim 550\ \text{nm}$,激发波长和发射波长狭缝宽度均为 $5\ \text{nm}$,扫描速度为 $2\ 400\ \text{nm}\cdot\text{min}^{-1}$ 。荧光分光光度计根据拉曼信号自动校准,并以奎宁硫酸盐单位进行标准化,通过扣除空白水样、手动置零等方法消除拉曼散射和瑞利散射^[17-18]。各采样点基本水质参数见表1。

1.4 数据处理

PARAFAC是基于三线分解理论、采用交替最

小二乘法的一种多应用于三维及多维数据解析的数学方法^[19]。采用MATLAB 2014a软件中DOMFluor工具箱进行三维荧光光谱矩阵的PARAFAC分析,采用校正散射(瑞利散射及拉曼散射)检验去除异常值^[19],并采用裂半分析和残差分析检验PARAFAC模型有效性,最终经过反复迭代确定合适的DOM组分数^[20]。采用MATLAB 2017b软件中DOMFluor工具箱对DOM三维荧光光谱进行PARAFAC分析。

表1 采样点基本水质参数

Table 1 Water quality parameters at sampling points

采样点	水温/ ℃	ρ (溶解氧)/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	pH	氧化还原 电位/mV	电导率/ ($\text{mS}\cdot\text{m}^{-1}$)	透明度/ cm
1	11.9	5.31	7.85	265	89.1	25
2	13.3	5.82	7.82	263	86.0	28
3	13.1	6.63	7.83	258	87.8	28
4	13.5	5.57	7.88	261	83.6	31
5	13.2	6.26	7.84	253	88.1	27
6	10.9	7.97	7.90	286	99.5	32
7	11.6	6.16	7.75	284	93.7	28
8	11.0	6.27	8.06	301	83.0	30
平均值	12.3	6.25	7.87	271	88.8	29

2 结果与讨论

2.1 光谱指数分析

荧光指数(FI)指激发波长为370 nm时,发射波长在450和500 nm处荧光强度的比值,常用来指示DOM来源^[21]。当FI值>1.9时,表示DOM主要来自于由微生物分解的内源性代谢产物;当FI<1.4时,表示DOM主要为径流进入水体的陆源有机质^[22]。由表2可知,各样点FI值为2.714~2.970,平均值为2.850,大于1.9,这说明蘑菇湖上覆水DOM以微生物内源性代谢产物为主。自生源指标(BIX)指激发波长为310 nm时,发射波长在380和430 nm处荧光强度的比值,可用来表征DOM自生源特征和生物可利用性^[23]。当BIX值>0.8时,表示自生源明显;当BIX值<0.8时,表示自生源不明显^[23]。由表2可知,各样点BIX值为0.927~0.994,平均值为0.970,大于0.8,这说明蘑菇湖上覆水DOM自生源贡献较强,生物可利用性高。腐殖化指数(HIX)指激发波长为254 nm时,发射波长在435~480和300~345 nm处积分值(或平均值)的比值^[24]。HIX主要用来表征DOM腐殖化程度,其值越大,腐殖化程度则越高^[25]。由表2可知,各样点HIX值为2.585~3.500,平均值为2.910,小于4,这说明DOM腐殖化程度较弱,自

生源明显,主要来源于藻类或细菌分解的短期有机质产生^[23]。综上可知,蘑菇湖上覆水DOM以微生物代谢产物为主,腐殖化程度较弱。蘑菇湖上覆水DOM分子结构特征及组成应与采样时间和来水有关。蘑菇湖来水主要为城市生活污水和农业退水,来水时间为8—9月,温度较高,微生物活动较强,有机残体被微生物降解,腐殖化程度较弱。采样时间为10月,水温逐渐降低,微生物活性降低,加之蘑菇湖水流平稳,自净能力较差,致使有机质腐殖化进程受到抑制。这与张春华等^[2]研究结果相似,表明秋冬季节蘑菇湖水体中DOM主要为相对分子质量较小、腐殖化程度较低的富里酸和类蛋白。

表2 蘑菇湖水体DOM三维荧光光谱指数及均值

Table 2 Spectral index and mean value of DOM in Moguehu Lake

采样点	荧光指数FI	自生源指标BIX	腐殖化指数HIX
1	2.970	0.978	2.785
2	2.862	0.927	3.249
3	2.801	0.975	2.759
4	2.792	0.995	2.692
5	2.714	0.980	2.585
6	2.877	0.968	3.500
7	2.891	0.992	2.719
8	2.929	0.962	2.901
均值	2.850	0.970	2.910

综上所述,光谱指数对蘑菇湖上覆水中DOM的来源及腐殖化程度具有较好指示性。由表2可知,蘑菇湖水体DOM来源以自生源为主(FI值>1.9),腐殖化程度较弱(HIX值<4),DOM不稳定,不能长时间存在于水中,易被微生物或细菌降解为营养源进入生态系统物质循环。DOM腐殖化程度受到自生源贡献的影响,新鲜的DOM容易被降解为 CO_2 和 H_2O 等,实现有机质向无机物的转化。

2.2 PARAFAC分析

如图2所示,采用PARAFAC分析DOM三维荧光光谱得到4个荧光组分。各荧光组分激发波长和发射波长最大值见表3^[7,11,19-20,26-27],并确定各组分荧光峰种类。

组分C1(激发波长为260、350 nm,发射波长为450 nm)包含2个激发峰和1个发射峰,分别指示紫外光区类富里酸荧光和可见光区类富里酸荧光^[7,26],分别对应传统的A峰(激发波长、发射波长分别为260和400~460 nm)和C峰(激发波长、发射波长分别为320~360和420~460 nm)^[28]。A峰主要由相对分子质量较大、相对稳定的有机物质产生;C峰

主要由相对分子质量较小、高荧光效率的有机物质产生,易被氧化降解,但两者都可能与 DOM 中羰基和羟基有关,一般指示外源输入^[7]。组分 C4(激发

波长、发射波长分别为 250 和 480 nm)与 C1 同属紫外光区类富里酸荧光。

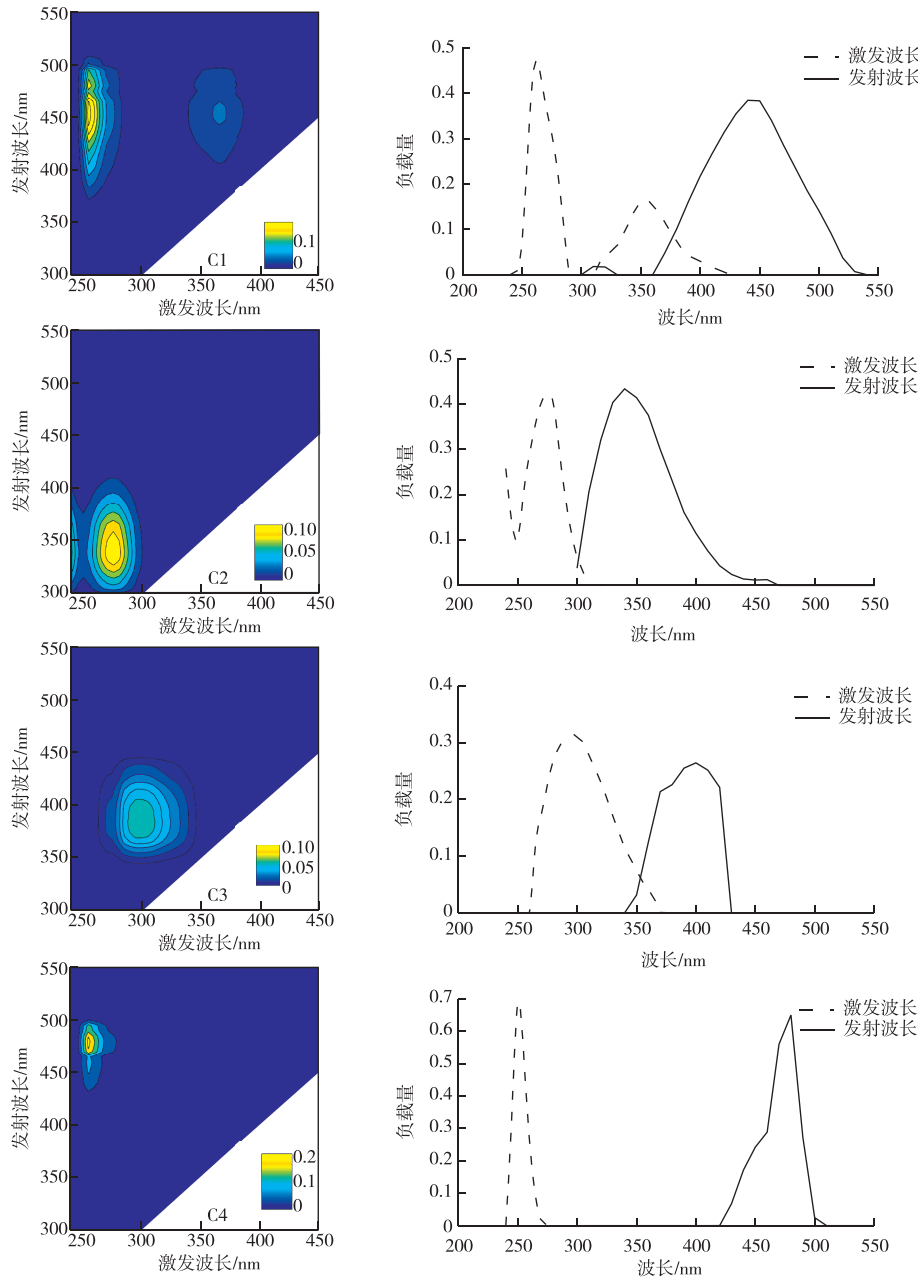


图 2 蘑菇湖水体 DOM 三维荧光光谱以及激发和发射波长

Fig. 2 3DEEM spectra of DOM in Moguhu Lake water

组分 C2(激发波长、发射波长分别为 275 和 350 nm)指示类色氨酸荧光,与羧基官能团有关,对应传统的 T 峰(激发波长、发射波长分别为 275 和 340 nm)^[29]。类色氨酸被认为是由微生物和细菌降解代谢产生的溶解性微生物代谢产物,且易与大分子蛋白质结合,也易与在同一蛋白质中结合的酪氨酸发生能量转移,对荧光峰具有复杂影响^[8]。一些如腐

殖质中多酚化合物——木质素和没食子酸等非蛋白荧光物质,也具有相似荧光峰,这可能与含有苯酚或苯胺结构有关^[30]。

组分 C3(激发波长、发射波长分别为 300 和 400 nm)指示陆源或海洋类腐殖质荧光,通常来自废水和农业,结构复杂且稳定,不易被微生物利用或光降解^[20],对应传统的 M 峰(激发波长、发射波长分别

为 290~310 和 70~410 nm)^[28]。郭卫东等^[29]认为 M 峰在陆地淡水中也有存在,不应为海洋来源特有特征峰,也有可能是由陆地向海洋中输入的有色溶解性有机质的主要物质。陆源或海洋类腐殖质相对

分子质量大,分子结构复杂,相对稳定,不易被微生物降解或利用,芳香性大于富里酸,其激发波长和发射波长存在一定红移^[2]。

表 3 4 种荧光组分光谱特征

Table 3 Spectral characteristics of four fluorescent components

组分	类型	该研究		其他文献	
		激发波长/nm	发射波长/nm	激发波长/nm	发射波长/nm
C1	紫外光区类富里酸	260	450	230~260 ^[7] 250~300 ^[26]	370~460 ^[7] 380~480 ^[26]
	可见光区类富里酸	350	450	310~360 ^[7] 320~370 ^[26]	370~480 ^[7] 420~480 ^[26]
C2	色氨酸	275	350	250~300 ^[26]	330~380 ^[26]
				275 ^[27]	342 ^[27]
				275~280 ^[11]	352~356 ^[11]
C3	陆源或海洋类腐殖酸	300	400	300~320 ^[26]	380~420 ^[26]
				<312 ^[19]	380~420 ^[19]
				302 ^[20]	408 ^[20]
C4	紫外光区类富里酸	250	480	230~260 ^[7] 250~300 ^[26]	370~460 ^[7] 380~480 ^[26]

2.3 荧光强度分析

荧光强度与 DOM 结构密切相关,各荧光峰荧光强度可以间接揭示 DOM 含有的活性官能团及 DOM 性质^[3]。较高的荧光强度可能与 DOM 含有简单、相对分子质量小的组分积累有关,具有羟基、甲氧基、氨基等低芳香性、聚合度低的给电子基团;而较低的荧光强度可能与 DOM 含有相对分子质量大的羧基、羰基等吸电子基团的组分积累有关^[31]。通过 PARAFAC 分析识别出蘑菇湖上覆水 DOM 中 C1、C2、C3 和 C4 这 4 个组分,组分 C1 和 C4 同为类富里酸物质,其中组分 C1 为紫外光区类富里酸和可见光区类富里酸物质,组分 C2 为类蛋白质中的类色氨酸物质,组分 C3 为陆源或海洋类腐殖酸物质^[7, 26-27]。由图 3 可知,类富里酸在 DOM 中占主导地位,其次为类色氨酸,类腐殖酸所占比例最小。3 种物质在不同采样点间的含量变化不大。

荧光指数(FI)与各 DOM 成分最大荧光强度(F_{\max})之间存在一定相关性,相关性越高,则 DOM 组成越简单,分子缩合度和芳香度越大,活性官能团以低水平的共轭生色团为主^[31]。FI 与富里酸、色氨酸和腐殖酸的 F_{\max} 比例线性拟合结果见图 4。由图 4 可知,富里酸、色氨酸和腐殖酸与 FI 之间均存在正相关,富里酸与 FI 的拟合结果(相关系数 $r=0.89$, $P<0.01$)最好,富里酸与 FI 间呈显著正相关。蘑菇湖

上覆水 DOM 的 FI 值 > 1.9 (表 2), 这表明 DOM 以自生源为主,相较于腐殖酸来说,富里酸含有更多的羰基和羟基,且相对分子质量也小。不同采样点中富里酸、色氨酸和腐殖酸含量差别不大(图 3),这表明蘑菇湖上覆水 DOM 主要为含羰基、羟基等活性官能团的相对分子质量小,且腐殖化、芳香性、分子缩合度较低的类富里酸物质。

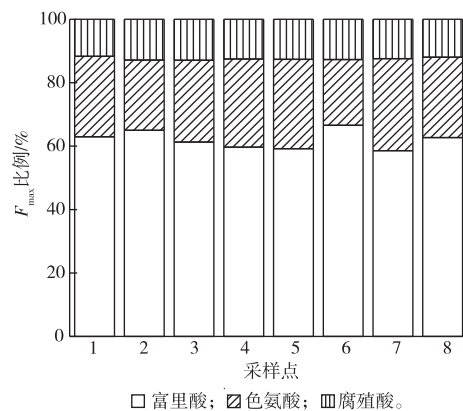


图 3 各荧光物质最大荧光强度比例

Fig. 3 Percentage of fluorescence intensity of each fluorescent substance

3 讨论与结论

光谱指数分析结果表明,蘑菇湖上覆水 DOM 来源为以自生源为主的微生物内源性代谢产物(短期

微生物分解藻类和动植物残体或分泌的有机质), 腐殖化程度较弱, 生物利用性较高。

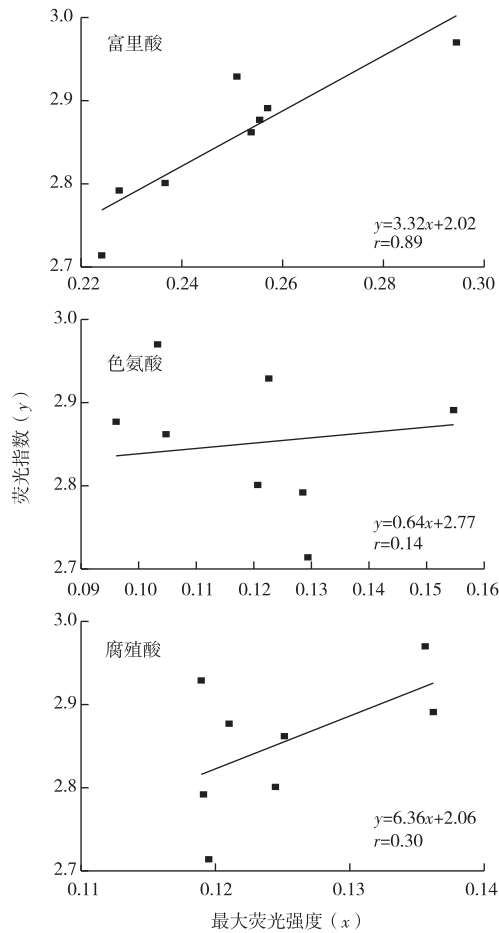


图4 各DOM成分最大荧光强度与荧光指数(FI)相关性

Fig. 4 Correlation between components F_{max} and FI

根据PARAFAC法分析得到蘑菇湖上覆水DOM包含4种组分, 组分C1和C4同为类富里酸物质, 其中组分C1为紫外光区类富里酸和可见光区类富里酸物质, 组分C2为类蛋白中的类色氨酸物质, 组分C3为陆源或海洋类腐殖酸物质。

通过对各组分 F_{max} 所占总组分比例与FI进行线性拟合发现, 各组分与FI均呈现正相关。其中, 富里酸与FI之间存在显著正相关($r=0.89, P<0.01$), 这表明蘑菇湖上覆水DOM以富含羰基、羟基等活性官能团, 相对分子质量小, 芳香性、腐殖化且分子缩合度较低的类富里酸物质为主, 色氨酸含量次之, 腐殖酸含量最低。

DOM的分子结构特征、组成含量、芳香性和腐殖化程度会影响有机污染物和重金属的迁移转化, 在地球化学循环中占据重要位置, 采用3DEEM结合PARAFAC法研究水体中DOM结构特征及腐殖化程

度, 有助于为湖泊污染治理及修复提供科学依据。

参考文献:

- [1] NKANSAH K, ADEDIPE O, DAWSON-ANDOH B, *et al.* Determination of Concentration of ACQ Wood Preservative Components by UV-Visible Spectroscopy Coupled With Multivariate Data Analysis [J]. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2015, 147: 157-166.
- [2] 张春华, 黄廷林, 方开凯, 等. 同温混合初期主库区沉积物间隙水DOM的光谱特征: 以周村水库为例[J]. *中国环境科学*, 2016, 36(10): 3048-3055. [ZHANG Chun-hua, HUANG Ting-lin, FANG Kai-kai, *et al.* Spectral Characteristics of DOM in Sediment Interstitial Water of the Main Reservoir Area During the Initial Stage of Isothermal Mixing: A Case Study of Zhoucun Reservoir [J]. *China Environmental Science*, 2016, 36(10): 3048-3055.]
- [3] READER H E, STEDMON C A, NIELSEN N J, *et al.* Mass and UV-Visible Spectral Fingerprints of Dissolved Organic Matter: Sources and Reactivity [J]. *Frontiers in Marine Science*, 2015, 2: 88.
- [4] XU P D, ZHU J, FU Q L, *et al.* Structure and Biodegradability of Dissolved Organic Matter From Ultisol Treated With Long-Term Fertilizations [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2018, 18(5): 1865-1872.
- [5] YAN M Q, KORSHIN G, WANG D S, *et al.* Characterization of Dissolved Organic Matter Using High-Performance Liquid Chromatography (HPLC)-Size Exclusion Chromatography (SEC) With a Multiple Wavelength Absorbance Detector [J]. *Chemosphere*, 2012, 87(8): 879-885.
- [6] 叶琳琳, 孔繁翔, 史小丽, 等. 富营养化湖泊溶解性有机碳生物可利用性研究进展[J]. *生态学报*, 2014, 34(4): 779-788. [YE Lin-lin, KONG Fan-xiang, SHI Xiao-li, *et al.* The Bioavailability of Dissolved Organic Carbon in the Eutrophic Lakes [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(4): 779-788.]
- [7] 李帅东, 张明礼, 杨浩, 等. 昆明松华坝库区表层土壤溶解性有机质(DOM)的光谱特性[J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, 37(4): 1183-1188. [LI Shuai-dong, ZHANG Ming-li, YANG Hao, *et al.* Spectroscopic Characteristics of Dissolved Organic Matter From Top Soils on Songhuaba Reservoir in Kunming [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, 37(4): 1183-1188.]
- [8] 张博, 王书航, 姜霞, 等. 太湖五里湖水体悬浮物中水溶性有机质(WDOM)的荧光光谱组分鉴别及其与氮形态的关系[J]. *湖泊科学*, 2018, 30(1): 102-111. [ZHANG Bo, WANG Shu-hang, JIANG Xia, *et al.* Identification of WDOM Fluorescence Spectral Components in Suspended Solids and Correlation Analysis With Nitrogen Forms of Lake Wuli, Lake Taihu [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, 30(1): 102-111.]
- [9] PRAISE S, ITO H, AN Y, *et al.* Dissolved Organic Matter Characteristics Along Sabo Dammed Streams Based on Ultraviolet Visible and Fluorescence Spectral Properties [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2018, 190(3): 146.
- [10] 牛天浩, 周振, 胡大龙, 等. 污水处理厂污泥水溶性有机物

- 的光谱特性分析[J]. 环境科学, 2016, 37(4): 1460-1466. [NIU Tian-hao, ZHOU Zhen, HU Da-long, *et al.* Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matters in Reject Water From Wastewater Treatment Plants[J]. Environmental Science, 2016, 37(4): 1460-1466.]
- [11] 王静, 吴丰昌, 王立英, 等. 超滤、三维荧光光谱与高效体积排阻色谱联合表征地表水环境中溶解有机质的性质[J]. 环境科学, 2008, 29(11): 3027-3034. [WANG Jing, WU Feng-chang, WANG Li-ying, *et al.* Combining Ultrafiltration, Fluorescence Spectroscopy and HPSEC to Characterize Dissolved Organic Matter in Surface Waters [J]. Environmental Science, 2008, 29(11): 3027-3034.]
- [12] BIRDWELL J E, ENGEL A S. Characterization of Dissolved Organic Matter in Cave and Spring Waters Using UV - Vis Absorbance and Fluorescence Spectroscopy [J]. Organic Geochemistry, 2010, 41(3): 270-280.
- [13] 何伟, 白泽琳, 李一龙, 等. 溶解性有机质特性分析与来源解析的研究进展[J]. 环境科学学报, 2016, 36(2): 359-372. [HE Wei, BAI Ze-lin, LI Yi-long, *et al.* Advances in the Characteristics Analysis and Source Identification of the Dissolved Organic Matter [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(2): 359-372.]
- [14] 祝鹏, 廖海清, 华祖林, 等. 平行因子分析法在太湖水体三维荧光峰比值分析中的应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(1): 152-156. [ZHU Peng, LIAO Hai-qing, HUA Zu-lin, *et al.* Parallel Factor Analysis as an Analysis Technique for the Ratio of Three-Dimensional Fluorescence Peak in Taihu Lake [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(1): 152-156.]
- [15] MANGALGIRI K P, TIMKO S A, GONSIOR M, *et al.* PARAFAC Modeling of Irradiation- and Oxidation-Induced Changes in Fluorescent Dissolved Organic Matter Extracted From Poultry Litter [J]. Environmental Science & Technology, 2017, 51(14): 8036-8047.
- [16] BURDIGE D J, KLINE S W, CHEN W H. Fluorescent Dissolved Organic Matter in Marine Sediment Pore Waters [J]. Marine Chemistry, 2004, 89(1/2/3/4): 289-311.
- [17] HERNÁNDEZ-SÁNCHEZ N, LLEÓ L, AMMARI F, *et al.* Fast Fluorescence Spectroscopy Methodology to Monitor the Evolution of Extra Virgin Olive Oils Under Illumination [J]. Food and Bioprocess Technology, 2017, 10(5): 949-961.
- [18] OSBURN C L, HANDSEL L T, MIKAN M P, *et al.* Fluorescence Tracking of Dissolved and Particulate Organic Matter Quality in a River-Dominated Estuary [J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46(16): 8628-8636.
- [19] 王书航, 王雯雯, 姜霞, 等. 基于三维荧光光谱-平行因子分析技术的蠡湖CDOM分布特征[J]. 中国环境科学, 2016, 36(2): 517-524. [WANG Shu-hang, WANG Wen-wen, JIANG Xia, *et al.* Distribution of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Lihu Lake Using Excitation-Emission Matrix Fluorescence and Parallel Factor Analysis [J]. China Environmental Science, 2016, 36(2): 517-524.]
- [20] 蔡文良, 许晓毅, 杜娴, 等. 嘉陵江重庆段DOM三维荧光光谱的平行因子分析[J]. 环境科学研究, 2012, 25(3): 276-281. [CAI Wen-liang, XU Xiao-yi, DU Xian, *et al.* Parallel Factor Analysis With EEM on Dissolved Organic Matter in Chongqing Section of Jialing River [J]. Research of Environmental Sciences, 2012, 25(3): 276-281.]
- [21] MCKNIGHT D M, BOYER E W, WESTERHOFF P K, *et al.* Spectrofluorometric Characterization of Dissolved Organic Matter for Indication of Precursor Organic Material and Aromaticity [J]. Limnology and Oceanography, 2001, 46(1): 38-48.
- [22] JOHNSON M S, COUTO E G, ABDO M, *et al.* Fluorescence Index as an Indicator of Dissolved Organic Carbon Quality in Hydrologic Flowpaths of Forested Tropical Watersheds [J]. Biogeochemistry, 2011, 105(1/2/3): 149-157.
- [23] HUGUET A, VACHER L, RELEXANS S, *et al.* Properties of Fluorescent Dissolved Organic Matter in the Gironde Estuary [J]. Organic Geochemistry, 2009, 40(6): 706-719.
- [24] OHNO T. Fluorescence Inner-Filtering Correction for Determining the Humification Index of Dissolved Organic Matter [J]. Environmental Science & Technology, 2002, 36(4): 742-746.
- [25] OHNO T, CHOROVER J, OMOIKE A, *et al.* Molecular Weight and Humification Index as Predictors of Adsorption for Plant- and Manure-Derived Dissolved Organic Matter to Goethite [J]. European Journal of Soil Science, 2007, 58(1): 125-132.
- [26] HE W, HUR J. Conservative Behavior of Fluorescence EEM - PARAFAC Components in Resin Fractionation Processes and Its Applicability for Characterizing Dissolved Organic Matter [J]. Water Research, 2015, 83: 217-226.
- [27] BAKER A, CURRY M. Fluorescence of Leachates From Three Contrasting Landfills [J]. Water Research, 2004, 38(10): 2605-2613.
- [28] COBLE P G. Marine Optical Biogeochemistry: The Chemistry of Ocean Color [J]. Chemical Reviews, 2007, 107(2): 402-418.
- [29] 郭卫东, 黄建平, 洪华生, 等. 河口区溶解有机物三维荧光光谱的平行因子分析及其示踪特性[J]. 环境科学, 2010, 31(6): 1419-1427. [GUO Wei-dong, HUANG Jian-ping, HONG Hua-sheng, *et al.* Resolving Excitation Emission Matrix Spectroscopy of Estuarine CDOM With Parallel Factor Analysis and Its Application in Organic Pollution Monitoring [J]. Environmental Science, 2010, 31(6): 1419-1427.]
- [30] NIE Z Y, WU X D, HUANG H M, *et al.* Tracking Fluorescent Dissolved Organic Matter in Multistage Rivers Using EEM - PARAFAC Analysis: Implications of the Secondary Tributary Remediation for Watershed Management [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(9): 8756-8769.
- [31] D'ORAZIO V, TRAVERSA A, SENESI N. Forest Soil Organic Carbon Dynamics as Affected by Plant Species and Their Corresponding Litters: A Fluorescence Spectroscopy Approach [J]. Plant and Soil, 2014, 374(1/2): 473-484.

作者简介: 张广彩(1991—),男,山东泰安人,硕士生,主要从事湖泊底泥DOM方面研究。E-mail: 839031556@qq.com

(责任编辑: 王昌群)