

太湖水源水中溶解性有机物特性分析

周业凯^{1,2}, 陈卫^{1,2}, 陶辉^{1,2}, 杨嘉玮^{1,2}

(1. 河海大学 浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学 环境学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 以太湖水源水为研究对象,分析有机物含量及其特性。研究表明,太湖水源水中 DOC 的浓度在 3.95 ~ 6.31 mg/L 之间,且自东南向西北呈逐渐增加的趋势;6 个水源地原水的 DOM 分子质量及亲疏水性分布情况类似,均以分子质量 < 1 ku 的小分子组分为主(比例超过 40%),亲水性组分略大于疏水性组分,其中极性亲水的 DOM 所占比例最高,为 $(30.01 \pm 1.03)\%$;太湖水源水中 DOM 的三维荧光峰包括溶解性微生物代谢产物荧光峰和芳香蛋白类荧光峰;荧光区域积分法计算结果显示,芳香蛋白类物质和溶解性微生物代谢产物所占比例较高,富里酸类物质在太湖水源水中也占有一定的比例,而腐殖酸类物质在水源水中的含量很少。

关键词: 太湖; 水源水; 溶解性有机物; 分子质量分布; 亲疏水性; 三维荧光

中图分类号: TU991 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2017)05-0046-04

Characteristics of Dissolved Organic Matter in Source Water of Taihu Lake

ZHOU Ye-kai^{1,2}, CHEN Wei^{1,2}, TAO Hui^{1,2}, YANG Jia-wei^{1,2}

(1. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes <Ministry of Education>, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The content and characteristics of the organic matter in six kinds of source water of Taihu Lake were analyzed. The results showed that DOC of source water ranged from 3.95 to 6.31 mg/L, and increased gradually from the southeast to northwest. The distribution of DOM molecular weight, hydrophilicity and hydrophobicity was similar in six kinds of source water. The molecular weight fraction of less than 1 ku accounted for the major part (more than 40%). Hydrophilic components were higher than the hydrophobic components, and polar hydrophilic DOM accounted for $(30.01 \pm 1.03)\%$. There were mainly two kinds of three-dimensional fluorescence peaks of DOM including soluble microbial metabolites and aromatic protein substances. The calculation results according to the fluorescence regional integration method showed that the proportions of aromatic protein substances and soluble microbial metabolites were higher. FA-like substances accounted for a certain proportion, and the content of HA-like substances was low.

Key words: Taihu Lake; source water; dissolved organic matter; molecular weight distribution; hydrophilicity and hydrophobicity; three-dimensional fluorescence

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(51438006); 江苏高校优势学科建设工程资助项目
通信作者: 陈卫 E-mail: cw5826@hhu.edu.cn

溶解性有机物(DOM)广泛存在于各类水体中,其主要成分包括腐殖酸、富里酸、氨基酸和碳水化合物等^[1]。水中DOM对给水处理系统影响较大,如混凝剂或消毒剂用量增加、膜污染等,而且进入给水管网系统后会引发微生物滋生,进而腐蚀管壁,降低饮用水生物稳定性^[2]。此外,DOM还是消毒副产物(DBPs)的主要前体物,在饮用水加氯消毒过程中与氯反应生成三卤甲烷(THMs)、卤乙酸(HAAs)等,严重威胁人体健康^[3]。笔者以太湖水源地为研究对象,用溶解性有机碳(DOC)量化DOM,分析太湖水源地水中DOM含量及其组成特性。

1 材料与方法

1.1 样品采集

在太湖沿岸6个主要饮用水水源地采样(见图1),其中Y1位于东太湖,Y2位于胥湖,Y3、Y4和Y5位于贡湖,Y6位于太湖西部。采集后样品冷藏保存。研究表明^[4,5],太湖水源地水中DOC在夏季含量较高,故于2016年8月对水源地进行采样分析。



图1 太湖水源地采样点

Fig.1 Sampling sites of water sources in Taihu Lake

1.2 检测分析方法

DOC采用总有机碳分析仪进行测定。

DOM分子质量分布采用超滤膜法测定^[6]。超滤膜截留的分子质量为10、5、3、1 ku;DOM亲疏水性分组参照文献^[7],所用树脂为Supelite DAX-8、Amberlite XAD-4和Amberlite IRA-958。

三维荧光光谱采用荧光光谱分析仪获得。扫描波长范围Ex为200~400 nm,Em为280~550 nm;扫描间隔 $\lambda=5$ nm,扫描速度为1 200 nm/min。研究表明^[8],三维荧光区域分为区域I(Ex/Em=200~250 nm/280~330 nm)、区域II(Ex/Em=200~250 nm/330~380 nm)、区域III(Ex/Em=200~250

nm/380~550 nm)、区域IV(Ex/Em=250~400 nm/280~380 nm)和区域V(Ex/Em=250~400 nm/380~550 nm),分别代表芳香蛋白酪氨酸类物质、芳香蛋白色氨酸类物质、富里酸类物质、溶解性微生物代谢产物及腐殖酸类物质。

荧光区域积分标准体积占比计算参照文献^[8]。

2 结果与分析

2.1 太湖水源水中DOC含量分布

各水源地中DOC含量在3.95~6.31 mg/L之间(见图2)。太湖西部和贡湖水源地的DOC浓度高于胥湖和东太湖的,且Y6的DOC含量最大,Y1的最小。这与各湖区水质状况一致,即竺山湖水质最差,西部沿岸和梅梁湖次之,东部沿岸及东太湖水质最好。一方面,受风向和水流等影响,贡湖湖区藻含量高,活动频繁,产生了大量藻类有机物(AOM),增加了DOC的含量;另一方面,入湖污染对太湖水质空间分布有很大影响,太湖北部及西北部为环太湖河流的入湖区,且入湖河流水质较差,特别是竺山湖和梅梁湾湖区的直湖港、武进港、沙塘港和太浦运河等输入了大量污染物,导致北部湖区和西部湖区DOC浓度升高,随着水流DOC浓度自东南向西北呈逐渐增加的趋势。此外,太湖东部主要为出水区,水流交换较快,有利于水体净化,水质相对较好。

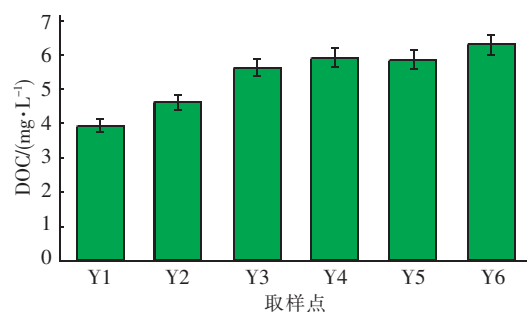


图2 水源水中DOC含量

Fig.2 Content of DOC in source water of Taihu Lake

2.2 太湖水源水中DOM分子质量与亲疏水性分布

结果表明,太湖各水源水中DOC分子质量分布未见明显差异。其分布规律为:分子质量<1 ku的DOC所占比例最高,在各水源水中均大于40%;分子质量>10 ku次之,所占比例为(30.14±3.51)%;分子质量为1~3 ku所占比例为(16.8±2.22)%;3~5 ku和5~10 ku所占比例较少,均小于10%,表明太湖水源地水中DOC以小分子有机物

为主。

各水源水中 DOC 亲疏水性分布规律相似,亲水性组分约为 55%,略高于疏水性组分。极性亲水 DOC 所占比例最高,为 $(30.01 \pm 1.03)\%$ 。强疏水性和弱疏水性 DOC 所占比例分别为 $(21.4 \pm 1.4)\%$ 和 $(22.95 \pm 1.59)\%$ 。强疏水性 DOC 主要为大分子腐殖酸类物质,弱疏水性 DOC 主要是富里酸类物质;而亲水性 DOC 主要是小分子物质,如蛋白质和氨基酸等^[9],其分布与藻类活动有密切的关系。Li 等^[10]对太湖 AOM 的研究表明,AOM 以亲水性组分为主,强疏水性、弱疏水性、极性亲水和中性亲水各组分所占比例分别为 15%、6%、22% 和 57%,李甜等^[11]对太湖藻类有机物的研究也得到相似的结论,亲水性组分占 AOM 的 78.6%。太湖藻类活动频繁,蓝藻的平均密度为 $3\,917 \times 10^4$ 个/L,产生了大量 AOM,如低聚糖、多聚糖、羟基乙酸、碳水化合物、氨基酸、蛋白质等,其中含有大量中性亲水有机物及苯环、 $-\text{NH}_2$ 和 $-\text{COOH}$ 等亲水性官能团,增加了太湖水源水中 DOC 亲水性组分的含量。

2.3 太湖水源水中 DOM 组成特征分析

太湖水源水单位 DOC 质量浓度三维荧光光谱如图 3 所示。

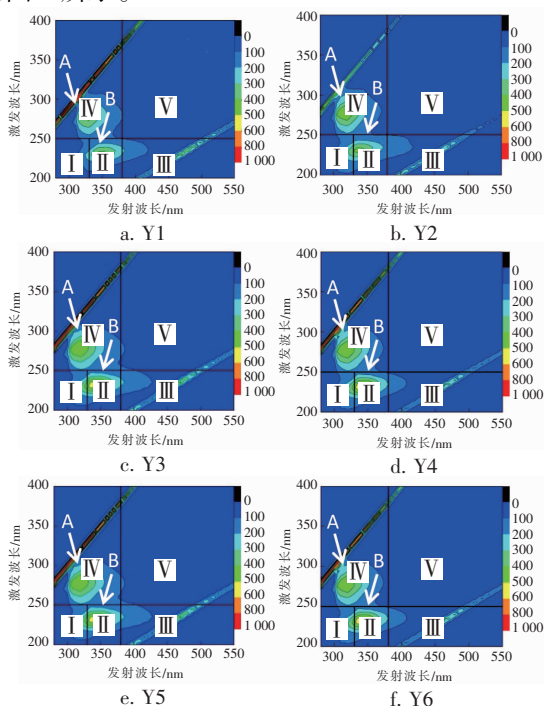


图3 不同水源水三维荧光光谱

Fig.3 Three-dimensional fluorescence spectrums of source water

由图 3 可知,太湖水源水中 DOM 的三维荧光峰主要有两类:A 峰为溶解性微生物代谢产物荧光峰;B 峰为芳香蛋白类荧光峰,包括色氨酸类物质和酪氨酸类物质,其中主要为低激发波长色氨酸类物质。空间分布上,不同水源地 DOM 荧光强度存在一定的差异,水源地 Y1 和 Y2 荧光强度均较弱,而 Y3、Y4 和 Y5 的 B 峰荧光强度明显增大,这是因为贡湖区域藻类数量多、活性高,可产生大量的藻类有机物,其中含有芳香蛋白类物质。Villacorte 等^[12]研究表明,AOM 中含有大量的芳香蛋白类物质,且芳香蛋白色氨酸类物质荧光强度较大。Y6 的 A 峰和 B 峰荧光强度较其他水源地大,这可能与周边污水处理厂尾水及工业废水排放有很大关系,一方面尾水的排放会引起水体中微生物降解产生某些特定的蛋白类物质,另一方面色氨酸为多环芳烃及其相关物质产生的副产物,与工业废水的排放有关^[13]。

太湖水源水单位浓度 DOC 荧光区域积分标准体积占比如图 4 所示。

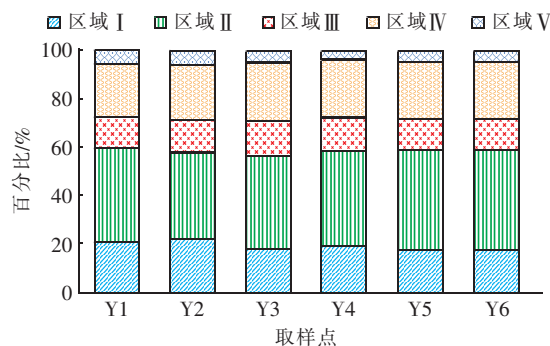


图4 各荧光区域积分标准体积所占比例

Fig.4 Percentage of each region in source water

由图 4 可知,太湖水源水中区域 II 的比例最高,在水体 DOM 中所占比例为 $(39.62 \pm 1.74)\%$,其次是区域 IV,占 DOM 的 $(23.19 \pm 1.22)\%$,区域 I 所占比例为 $(19.92 \pm 2.27)\%$ 。分析原因,一方面是由于太湖水体接纳周边污水处理厂尾水以及工业废水的排放,另一方面是太湖藻类活动频繁,产生大量的 AOM。此外,富里酸类物质在太湖水源水中也占有一定的比例,占 DOM 的 $(12.97 \pm 0.9)\%$ 左右,而腐殖酸类物质在水源水中的含量很少,所占比例均小于 6%。太湖水源水 DOM 以芳香蛋白类(色氨酸类和酪氨酸类)物质及溶解性微生物代谢产物为主,主要来源于内源生产,所以应该减少氮、磷等营养盐的输入,控制藻类的生长,对提高供水水质具有

重要意义。

3 结论

① 太湖水源水中 DOC 的含量在 3.95 ~ 6.31 mg/L 之间,在空间分布上表现为西部和北部水源地的 DOC 含量高于其他湖区水源地,且自东南向西北呈逐渐增加的趋势。

② DOC 分子质量分布情况为:分子质量 < 1 ku 的 DOC 所占比例最高,所占比例大于 40%;分子质量 > 10 ku 所占比例次之,所占比例为 $(30.14 \pm 3.51)\%$;分子质量为 1 ~ 3 ku 所占比例为 $(16.8 \pm 2.22)\%$;3 ~ 5 ku 和 5 ~ 10 ku 所占比例较少,均小于 10%。

③ DOC 亲水性组分约占 55%,略高于疏水性组分,且极性亲水 DOC 所占比例最高,为 $(30.01 \pm 1.03)\%$ 。

④ DOM 的三维荧光峰主要有溶解性微生物代谢产物荧光峰(A 峰)和芳香蛋白类荧光峰(B 峰);荧光区域积分标准体积中芳香蛋白类物质(区域 I 和区域 II)和溶解性微生物代谢产物(区域 IV)所占比例较高,富里酸类物质在太湖水源水中也占有一定的比例,而腐殖酸类物质在水源水中的含量很少。

参考文献:

- [1] Zheng L C, Song Z F, Meng P P, *et al.* Seasonal characterization and identification of dissolved organic matter (DOM) in the Pearl River, China[J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2016, 23(8): 7462 – 7469.
- [2] Bhatnagar A, Sillanpää M. Removal of natural organic matter (NOM) and its constituents from water by adsorption—A review [J]. *Chemosphere*, 2017, 166: 497 – 510.
- [3] Fu J, Lee W N, Coleman C, *et al.* Pilot investigation of two-stage biofiltration for removal of natural organic matter in drinking water treatment[J]. *Chemosphere*, 2017, 166: 311 – 322.
- [4] 刘成,朱浩强,曹军,等. 水厂处理工艺对藻源含氮有机物的去除效能分析[J]. *中国给水排水*, 2014, 30(3): 35 – 38.
- [5] Ye L L, Shi X, Wu X D, *et al.* Dynamics of dissolved organic carbon after a cyanobacterial bloom in hypereutrophic Lake Taihu (China) [J]. *Limnologia-Ecology and*

Management of Inland Waters, 2011, 41(4): 382 – 388.

- [6] Pehlivanoglu-Mantas E, Sedlak D L. Measurement of dissolved organic nitrogen forms in wastewater effluents: Concentrations, size distribution and NDMA formation potential[J]. *Water Res*, 2008, 42(14): 3890 – 3898.
- [7] Tao H, Feng B, Chen W, *et al.* Behavior of dissolved organic nitrogen in sediment[J]. *Fresenius Environ Bull*, 2014, 23(3): 908 – 914.
- [8] Chen W, Westerhoff P, Leenheer J A, *et al.* Fluorescence excitation-emission matrix regional integration to quantify spectra for dissolved organic matter [J]. *Environ Sci Technol*, 2003, 37(24): 5701 – 5710.
- [9] 李旭辉,赵晴,衣雪松,等. NOM 的亲疏水性及分子质量分布对超滤膜污染的影响[J]. *中国给水排水*, 2010, 26(17): 31 – 34.
- [10] Li T, Dong B Z, Liu Z. Characteristic of algogenic organic matter and its effect on UF membrane fouling [J]. *Water Sci Technol*, 2011, 64(8): 1685 – 1691.
- [11] 李甜,董秉直,刘铮. 藻类有机物的特性以及对超滤膜的污染[J]. *环境科学*, 2010, 31(2): 318 – 323.
- [12] Villacorte L O, Ekowati Y, Neu T R, *et al.* Characterisation of algal organic matter produced by bloom-forming marine and freshwater algae [J]. *Water Res*, 2015, 73: 216 – 230.
- [13] 隋志男,郅二铨,姚杰,等. 三维荧光光谱区域积分法解析辽河七星湿地水体 DOM 组成及来源[J]. *环境工程技术学报*, 2015, 5(2): 114 – 120.



作者简介:周业凯(1990 –), 男, 江苏宿迁人, 硕士研究生, 研究方向为水处理理论与技术。

E-mail: 1160697412@qq. com

收稿日期: 2016 – 10 – 11