e方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

中国期刊方阵
双奖期刊
中华人民共和国新闻出版总署

2019
Vol.40 No.3
第40卷 第3期

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第40卷 第3期
2019年3月15日

目 次

生态环境知库 Eco-Environmental Knowledge Web

环 境 科 学
Environmental Science

第40卷 第3期 2019年3月
Vol. 40, No. 3 Mar., 2019

以膜分离为主的物化法对城市污水中污染因子的去除特性分析

徐婷, 李勇*, 朱怡嘉, 薛梦婷, 汤同欢
(苏州科技大学环境科学与工程学院, 苏州 215009)

摘要：利用高效液相色谱法、三维荧光光谱法分析,考察以膜分离为主的物化处理方式对城市污水中各污染因子的去除特性,尤其对溶解性有机物的富集特性.结果表明,经以膜分离为主的物化方式处理后的城市生活污水属于低碳氮比废水；微絮凝过滤主要富集的是原水中非溶解性有机物和相对分子质量大于30 000的芳香类蛋白物质,富集程度在60.93%,尤其是类酪氨酸和类色氨酸；0.45 μm和0.22 μm醋酸纤维膜能将相对分子质量大于30 000的溶解性有机物全部富集,但是微滤膜对有机物的富集没有选择性；纳滤主要对城市污水中的富里酸类物质和腐殖酸类物质有很好富集效果,富集程度分别为52.01%和53.57%,溶解性有机物的总体富集程度在42%左右.

关键词：城市污水；膜分离；能量回收；有机物富集；三维荧光光谱
中图分类号：X703.1 **文献标识码**：A **文章编号**：0250-3301(2019)03-1353-07 **DOI**：10.13227/j.hjkx.201808110

Assessing Performance of Pollutant Removal from Municipal Wastewater by Physical and Chemical Methods Based on Membranes

XU Ting, LI Yong*, ZHU Yi-jia, XUE Meng-ting, TANG Tong-huan
(School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China)

Abstract: The removal characteristics of various pollution factors in municipal wastewater by membrane-based physical and chemical treatment, especially the enrichment characteristics of dissolved organic matter, were investigated by high performance liquid chromatography and three-dimensional fluorescence spectroscopy. The results showed that the municipal wastewater had a low COD/TN ratio after the treatment. The micro-flocculation filtration mainly enriched the non-dissolvable organic matter in the raw water and aromatic protein substances with relative molecular mass greater than 30 000. The enrichment degree was up to 60.93%, especially for tyrosine-like and tryptophan-like substances. The dissolved organic matter (DOM) with a molecular weight greater than 30 000 was enriched fully by 0.45 μm and 0.22 μm acetate membranes, but the microfiltration membrane was not selective for the enrichment of organic matter. Thus, NF mainly enriched the fulvic acid and humic acid in urban sewage. The enrichment degree was 52.01% and 53.57%, respectively, and the total enrichment degree of dissolved organic matter was about 42%.

Key words: municipal wastewater; membrane separation; energy recycling; organic matter enrichment; three-dimensional fluorescence spectroscopy

2008年荷兰制定"NEWs框架",系统地提出了如何回用污水,以及如何回收污水中的能源资源,被称为新一代的污水处理理念[1].随着能源资源短缺问题日趋严重,越来越多的污水厂选择转型.典型的案例有荷兰Dokhaven厂、新加坡NEWater项目和美国得州EI Paso项目等[2~4].无论"NEWs框架"还是各实践项目,膜技术都因其对原水水量水质的适应性较强、运行和出水稳定、操作简单、节约占地面积等优点而备受推崇[5,6].在能量回收方面,通常用微滤将非溶解性有机物和溶解性有机物区分开来,分别回收；在污水回用方面,则常用纳滤和反渗透来满足不同的回用要求[7~12].

反观现有的城市污水处理厂却仅旨在污水的达标排放,并未对其中的资源能源以及污水本身进行回收回用.此外,绝大部分城市污水处理厂的处理工艺是以生物处理为主的,但处理的废水却不都是百分百的生活污水.一部分工业废水的汇入使其存在较高的环境风险性,像污泥上浮、污泥膨胀等问题常有报道[13,14].因此,有必要寻找一种简单、高效且稳定的方法来应急,甚至于作为新一代污水处理厂的工艺参考；回看膜技术在污水处理领域的应用,虽然在能量回收和污水回用方面都发挥着重要的作用,但却忽视了两个问题:一是城市污水中的溶解性有机物成分复杂,不同种类的有机物往往表现出不同的物化特性,而不同级配的膜对有机物的截留特性亦存在差异性,故其回收方式应多元化.二是经膜处理后的废水可作再生水回用,但被膜富集的目标污染物,尤其是溶解性有机物并没有加以回收利用.因此,有必要了解不同级配的膜在污水处理中对溶解性有机物的筛分特性.

收稿日期：2018-08-13；**修订日期**：2018-08-28
作者简介：徐婷(1991~),女,硕士研究生,主要研究方向为水污染控制,E-mail:444357010@qq.com
* 通信作者,E-mail:yongli69@163.com

本文选择城市污水厂沉砂池出水为研究对象,以膜逐级筛分为主的物化法为处理工艺,探究其处理城市污水的可行性,同时分析不同级配的膜对城市污水中溶解性有机物的筛分特性,以期为概念污水厂因地制宜的实践提供多元参考,并为更好地回收废水中的能量载体——有机物提供理论基础,做到分类收集,以利于能源转化最大化.

1 材料与方法

1.1 实验流程

为避免无机颗粒对实验结果的影响,取污水厂沉砂池出水为实验原始水样,其基本水质情况见表1. 首先设计微絮凝过滤单元,选择工业上常用的精制硫酸铝为絮凝剂,目的在于降低原水的 SS,以减轻膜污染; 随后设计膜逐级抽滤单元,选择常用的 0.45、0.22 和 0.15 μm 的醋酸纤维膜以及纳滤膜,探讨不同级配的膜对污水中各类污染物的去除特性,重点探讨膜逐级抽滤对城市污水中有机物的筛分特性.

1.2 实验方法

取上述流程中的各级出水,测其各项常规指标判断以膜逐级筛分为主的物化法处理城市污水的可行性. 为减小因检测分析方法带来的实验误差,膜对溶解性有机物的去除特性分析方法如下:首先对实验原始水样中溶解性有机物的相对分子质量及物质含量进行分析,了解其大致相对分子质量范围和各区间的占比情况,以及物质类别和各类别的占比情况. 然后对各处理单元不同流程的出水进行采样,分析每个出水水样中溶解性有机物的相对分子质量范围和各区间的占比情况,以及物质类别和各类别占比. 最后将每个水样与上一级处理水样进行对比,即可得出每一级处理过程对污水中溶解性有机物的去除特性.

表1 实验原始水样水质特征

Table 1 Quality of samples from a municipal wastewater treatment plant

项目	COD/mg·L^{-1}	TN/mg·L^{-1}	TP/mg·L^{-1}	SS/mg·L^{-1}	NH_4^+-N/mg·L^{-1}	pH
参数	287.60	53.63	4.29	177.03	29.62	7.20

上述方法中,需要说明两点:一是通常人们以能否通过 0.45 μm 膜来区分溶解性有机物和非溶解性有机物,故在本实验中所有膜过滤的出水水样均认为只含有溶解性有机物,且为避免醋酸纤维膜表面的含碳物质对 DOC 测量值的贡献,膜出水的前 30 mL 水样全部废弃. 二是原水与微絮凝过滤出水的水样须经 GF/F 膜过滤后,方可测量分析. 且 GF/F 膜须在 450℃ 的高温下经马弗炉烘 4 h 后,冷却至常温使用.

1.3 分析方法

1.3.1 水常规六项

COD:重铬酸盐法(GB 11914-89); TP:过硫酸钾消解钼酸铵分光光度法(GB 11893-89); TN:碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(GB 11894-89); NH_4^+-N:纳氏试剂分光光度法(HJ 5352009); SS:英国 partech740 污泥浓度计; pH:雷磁 phs-3e 计; DOC: Multi 3100N/C 测定仪.

1.3.2 溶解性有机物相对分子质量的测定

采用高效液相色谱测定水样中的相对分子质量,原理是利用已知相对分子质量的标准物质,在一定的实验条件下测得相对分子质量与出峰时间的关系,在相同的实验条件下,根据此关系可由出峰时间反推被测物的相对分子质量[15]. 色谱柱型号: PL1149-6820 aquagel-OH 20 8 μm 300 × 7.5 mm Agilent,检测器为紫外-可见检测器,设置检测波长为 254 nm. 流动相为磷酸盐缓冲溶液,流量设置为 0.5 mL·L^{-1},进样量设置为 20 μL. 本实验中选用聚苯乙烯磺酸钠(PSS)为标准物质(M_r: 77 000、17 000、6 800、4 300), 利用丙酮(M_r:58)来校正溶解性有机物的相对分子质量[16,17]. 拟合的曲线如式(1),R^2 为0.941 1.

$$\lg M_r = -0.1003 \times t + 4.9957 \tag{1}$$

式中, M_r 为相对分子质量; t 为出峰时间,min.

1.3.3 三维荧光光谱

采用 5J1-0004 型荧光分光光度计对样品中的溶解性有机物进行分类、分析. 设置激发波长(E_x) 200 ~ 450 nm,发射波长(E_m)范围 250 ~ 600 nm. 扫描间隔采用 E_x 为 5 nm, E_m 为 5 nm,扫描速度为 2 400 nm·min^{-1},以超纯水作空白样. 测得数据用 Matlab 软件校准后采用寻峰法和荧光区域积分法分析[18~20].

2 结果与讨论

2.1 常规因子去除特性分析

各级出水的各项常规因子的平均指标如表2所示. 分析表格中的数据可以发现,微絮凝过滤对 COD、TP 和 SS 的去除效果极佳,去除率分别为 44.86%、89.24% 和 95.65%. 经 0.45 μm 的醋酸纤维膜过滤后,各项指标均有所下降,其中 COD、TN 和 TP 去除效果较为显著,去除率分别为

表 2　本实验各级出水水质特征

Table 2　Quality of samples from every level of effluent

指标	COD /mg·L⁻¹	DOC /mg·L⁻¹	TN /mg·L⁻¹	TP /mg·L⁻¹	SS /mg·L⁻¹	NH_4^+-N /mg·L⁻¹	pH
原水	260.58	115	67.375	5.39	1 840	27.89	7.20
微絮凝过滤	143.68	95	63.125	0.58	80	25.34	7.10
0.45 μm 过滤	92.01	75	55.75	0.06	40	25.12	7.21
0.22 μm 过滤	88.85	75	53.875	0.05	0	24.90	7.37
0.15 μm 过滤	79.94	70	50.25	0.03	0	24.01	7.44
纳滤	55.78	40	46.25	0.02	0	18.55	7.74

35.96%、11.68% 和 89.66%. 通过对比发现，三级微滤膜除第一级对各项污染因子的去除效果显著外，紧接着的两极微滤膜无论孔径再小，其去除效果较第一级相比甚微. 经纳滤的出水，各项污染因子均有明显下降，去除效果显著的指标有 COD、TN 和 NH_4^+-N，去除率分别为 30.22%、7.96% 和 22.74%. 纵观以膜筛分为主的整个物化流程，可发现该物化系统对 COD、TP、SS 和 pH 的处理效果极佳，随着原始水样 COD 的波动，整套物理系统处理效果较为稳定，整体去除率保持在 78.59%. 但对 TN 和 NH_4^+-N 的去除效果一般，如图 1 所示. 综上所述，经以膜筛分为主的物化法处理后的城市污水为低碳氮比废水，需进一步处理方可达标[21].

2.2　各级膜出水中溶解性有机物相对分子质量分布特征

一定相对分子质量区间内的溶解性有机物往往表现出类似的物化特性[22]. 城市污水中的有机物成分复杂，在“能量概念工艺中”通常将非溶解性有机物和溶解性有机物区分开来，分别回收[23]. 溶解性有机物约占城市污水有机物的 30% ~40%，相对分子质量分布范围极广[24~26]. 按照相对分子质量对不同级配的膜处理城市污水后截留的溶解性有机物进行分类，可以提高对有机物在不同膜处理过程中的规律性认识，同时可以为能量回收和污水回用方法的优化选择提供理论的支持.

本实验采用高效液相色谱法对原水及各级处理出水中溶解性有机物的相对分子质量进行测定，通过相应地线性换算，其相对分子质量分布情况如表 3. 原水中溶解性有机物相对分子质量分布范围广，但主要集中在 4 个水平：大于30 000、15 000左右、8 500左右和小于7 500，其占比分别为3.680 9%、85.876 9%、10.176 1% 和0.266 1%. 经微絮凝处理后，DOC 下降 21%，其中相对分子质量大于30 000 的溶解性有机物占比从3.680 9% 下降至0.813 6%，相对分子质量在1 500左右的溶解性有机物占比从85.876 9% 下降至67.204 5%，说明微絮凝对相对分

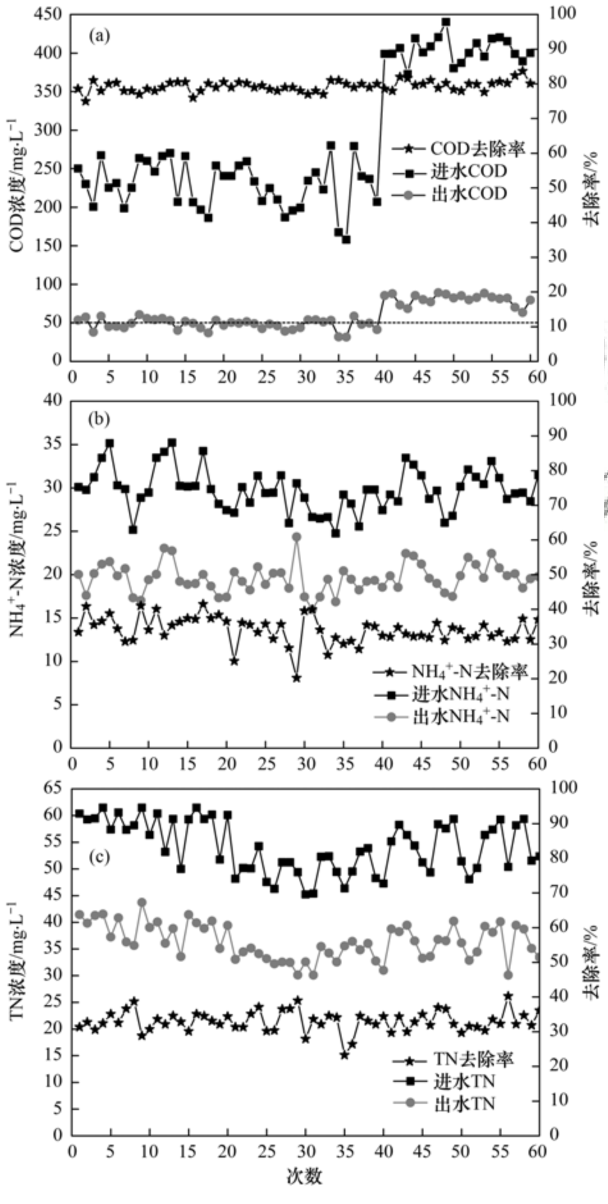

图 1　水质水量波动对 COD、NH_4^+-N、TN 的去除效果影响

Fig. 1　Effect of fluctuation of water quantity and quality on removal effect of COD, ammonia nitrogen, and total nitrogen removal

子质量大于15 000的大分子溶解性有机物有一定的去除效果. 经 0.45 μm 和 0.22 μm 的醋酸纤维膜抽滤后的出水，其色谱图几乎相同. 说明两者对溶解性有机物的去除特性相近，这就是为何许多学者在研究溶解性有机物时会选择 0.45 μm 和 0.22 μm 的

微滤膜作前处理. 经 0.45 μm 的醋酸纤维膜抽滤后,DOC 去除率在 6.7%,相对分子质量大于30 000的溶解性有机物已全部去除. 0.15 μm 的醋酸纤维膜和纳滤对溶解性有机物的去除效果显著,DOC 去除率分别为 14.3% 和 41.7%. 但所有相对分子质量的占比变化却不明显,说明 0.15 μm 的微滤膜和纳滤对溶解性有机物的去除特性与有机物相对分子质量分布的相关性较小.

表 3 有机物相对分子质量测定结果

Table 3 Results of organic matter molecular weight

项目	出峰时间/min	相对分子质量	所占比例/%
原水	4.891 0	31 998	3.680 9
	7.905 0	15 952	85.876 9
	10.489 0	8 783	10.176 1
	11.175 0	7 496	0.266 1
微絮凝过滤	4.807 0	32 625	0.813 6
	7.990 0	15 642	67.204 5
	10.474 0	8 813	31.301 3
	11.172 0	7 501	0.379 6
	11.653 0	6 712	0.301 0
0.45 μm 过滤	7.978 0	15 685	59.528 8
	10.479 0	8 803	39.340 4
	11.123 0	7 586	0.366 7
	11.656 0	6 708	0.272 2
	12.189 0	5 931	0.491 9
0.22 μm 过滤	8.004 0	15 591	65.377 2
	10.519 0	8 722	33.346 2
	11.227 0	7 406	0.353 3
	11.653 0	6 712	0.228 1
	12.240 0	5 861	0.695 2
0.15 μm 过滤	8.041 0	15 459	62.625 4
	10.594 0	8 572	34.896 6
	11.758 0	6 551	0.315 1
	13.518 0	4 363	0.826 8
	19.234 0	1 165	1.336 1
纳滤	8.086 0	15 299	66.974 2
	10.720 0	8 326	29.819 6
	11.920 0	6 311	0.565 5
	13.626 0	4 256	0.269 9
	19.414 0	1 118	2.370 8

2.3 三维荧光光谱分析

2.3.1 寻峰法

各级出水中溶解性有机物的三维荧光光谱图如图 2,横坐标为发射波长(E_m),纵坐标为激发波长(E_x). 根据 Chen 等[27]描述的荧光峰位置与激发波长、发射波长范围的关系,可识别特定的荧光基团信号. 从图 2 可以看出,原水的三维荧光光谱中有一个明显的荧光峰群和一个单峰(峰群 B 和峰 T_1). 峰群 B 位于荧光区域Ⅳ,其荧光峰的中心位于 E_x/E_m = 275 ~ 280 nm/305 ~ 345 nm,包含类酪氨酸荧光峰和类色氨酸荧光峰. 单峰 T_1 位于荧光区域Ⅱ,其荧光峰的中心位于 E_x/E_m = 225 ~ 235 nm/340 ~ 350 nm,属于类色氨酸荧光峰. 上述蛋白物质主要来源于城市居民的排泄物、餐厨废液和洗涤废水等. 其中峰群 B 的荧光强度还与微生物的代谢有关[28]. 由于该污水厂处理废水为百分百的生活污水,原水中的微生物活性较高,其代谢产物的荧光贡献率较大,故峰群 B 的荧光强度较高[29]; 经微絮凝处理后,峰群 B 的面积明显减小,仅剩一个单峰 B_1,其荧光峰的中心位于 E_x/E_m = 230 ~ 235 nm/340 ~ 350 nm. 较原水相比,区域Ⅱ和Ⅳ内荧光峰的强度也明显减弱,说明微絮凝过滤对类酪氨酸和类色氨酸这两种蛋白物质的富集效果显著. 经 0.44 μm 的醋酸纤维膜抽滤后的出水,其荧光谱图与微絮凝过滤后的出水相比,单峰 B_1 的荧光面积略有减少,荧光强度降低明显. 而单峰 T_1 并无变化,说明 0.45 μm 的微滤膜对微生物代谢产生的类酪氨酸有一定的去除效果,但对污水中的类色氨酸去除效果甚微. 经 0.22 μm 与 0.15 μm 微滤膜处理后的出水,其荧光光谱图与 0.45 μm 微滤膜出水的荧光光谱图差异甚微,荧光峰 B_1 与荧光峰 T_1 仅在荧光强度上略微减弱. 纳滤出水的荧光光谱图与上级出水相比,其荧光峰的强

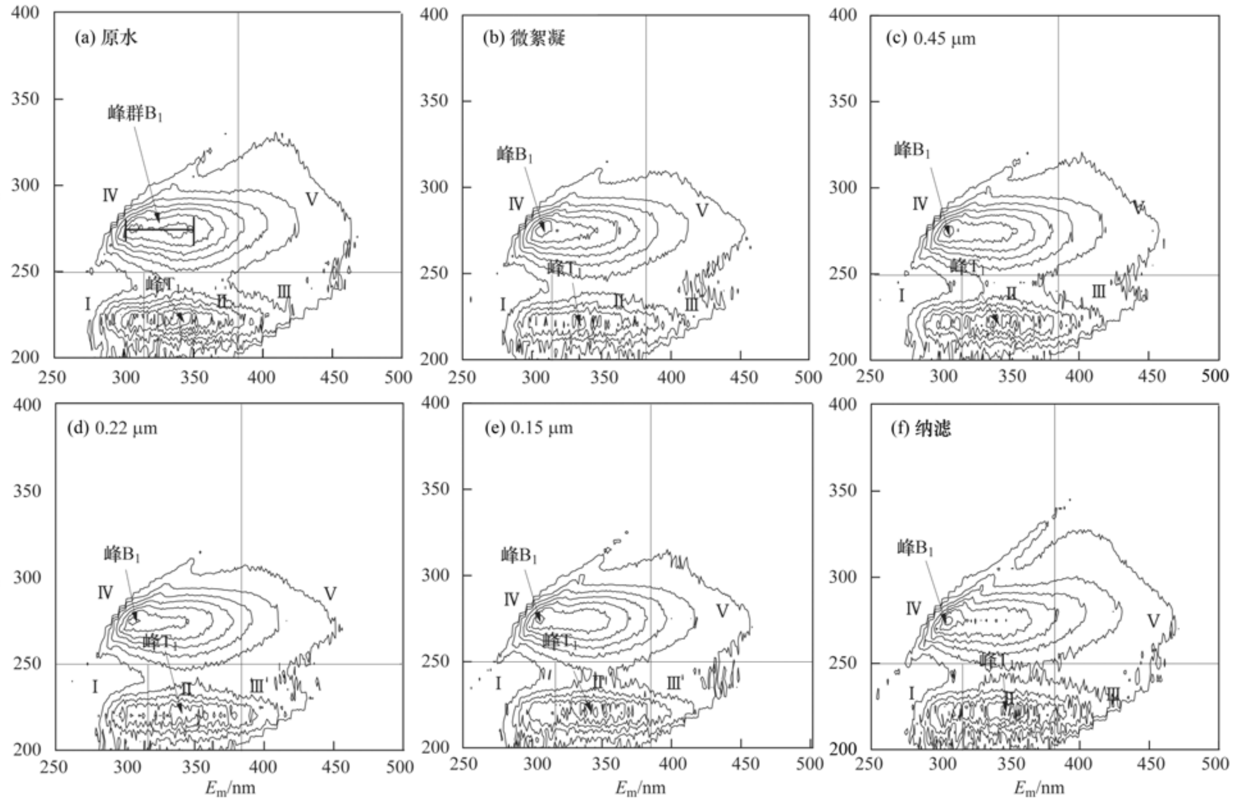

图 2　各级出水三维荧光图谱

Fig. 2　EEM spectra of every level of effluent

度及面积均有明显变化. 说明纳滤对污水中的蛋白质有很好的去除效果.

2.3.2　荧光区域积分法

荧光区域积分法是按照特定的激发波长和发射波长范围将三维荧光光谱划分成 5 个区域, 参考 Chen 和姚璐璐等的划分方法[30~32]: 区域Ⅰ代表芳香蛋白类物质Ⅰ, 荧光范围为 E_x/E_m = 200 ~ 250 nm/260 ~ 320 nm; 区域Ⅱ代表芳香蛋白类物质Ⅱ, 荧光范围为 E_x/E_m = 200 ~ 250 nm/320 ~ 380 nm; 区域Ⅲ代表富里酸类物质, 荧光范围为 E_x/E_m = 200 ~ 250 nm/380 ~ 550 nm; 区域Ⅳ代表溶解性微生物代谢产物, 荧光范围为 E_x/E_m = 250 ~ 450 nm/260 ~ 380 nm; 区域Ⅴ代表腐殖酸类物质, 荧光范围为 E_x/E_m = 250 ~ 450 nm/380 ~ 550 nm. 利用 Origin 9.0 软件对各个区域进行积分, 然后将所得各区域的积分体积标准化, 以反映各区域中特定结构有机物的相对含量[33].

将本实验各级出水中溶解性有机物的三维荧光光谱图按上述要求积分, 得到各区域的标准化积分后计算各项占比, 绘制各级出水荧光区域占比图, 即图 3, 横坐标为各级出水, 纵坐标 $P_{i,n}$ 为各个区域的标准化积分体积与所有区域标准化积分体积的比值. 从中可明显发现, 在该物化处理系统中, 特定结构有机物的相对含量仅在微絮凝过滤和纳滤两个处理单元中出现变化, 其余各个单元均无变化, 而各级出水水样的 DOC 含量却都有所降低. 这说明微絮凝过滤和纳滤对城市污水中溶解性有机物的去除具有选择性, 其选择性与有机物的结构相关. 而孔径为 0.45、0.22 和 0.15 μm 的微滤膜对城市污水中溶解性有机物的去除无选择性.

原水中芳香蛋白类物质Ⅰ的占比为 30.21%, 芳香蛋白类物质Ⅱ的占比为 18.89%, 富里酸类物质的占比为 18.89%, 溶解性微生物代谢产物的占比为 11.33%, 腐殖酸类物质占比为 20.68%. 经微絮凝过滤后, 其出水中五类溶解性有机物的占比依次变为 14.28%、14.28%、23.81%、23.01%、24.62%, DOC 浓度也从 115 $mg\cdot L^{-1}$ 降低至 95 $mg\cdot L^{-1}$. 从 DOC 及各项占比变化来看, 微絮凝过滤主要对城市污水溶解性有机物中的芳香蛋白类物质有很好的富集效果, 经计算微絮凝过滤对芳香蛋白类物质Ⅰ的富集程度为 60.93%, 对芳香蛋白类物质Ⅱ的富集程度为 37.52%. 经 0.15 μm 微滤膜过滤后的出水中各项占比情况与微絮凝过滤一致, 依次分别为 14.28%、14.28%、23.81%、23.01%、24.62%, 而纳滤后的出水中各项占比均变为 20.00%, DOC 浓度从 70 $mg\cdot L^{-1}$ 降低至 40 $mg\cdot L^{-1}$. 从 DOC 及各项占比变化来看, 纳滤主要对城市污水溶解性有机物中的富里酸类物质和腐殖酸类物质有

很好的富集效果,经计算纳滤对富里酸类物质的富集程度为 52.01%,对腐殖酸类物质的富集程度为 53.57%.此外,经 0.45 μm 和 0.22 μm 的微滤膜过滤后,城市污水中溶解性有机物的各项占比一致,且所测 DOC 含量相同,故可认为两者对有机物的去除效果相似.这也解释了为何许多研究中为避免非溶解性有机物和无机颗粒对实验的影响,选择 0.45 μm 或 0.22 μm 的微滤膜作前处理[34],以更准确地分析水样中的溶解性有机物.

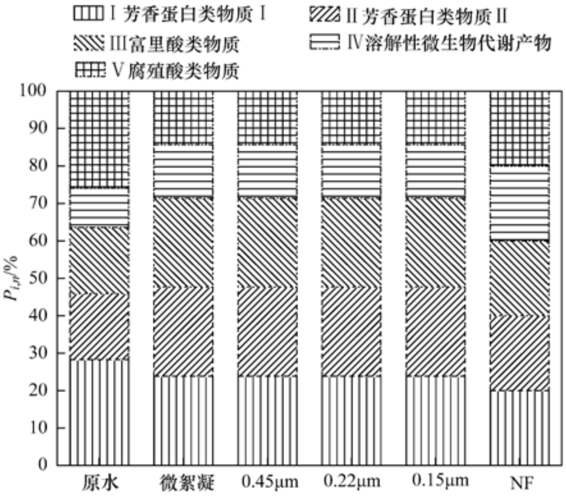

图 3 各级出水荧光区域积分占比

Fig. 3 Proportion of fluorescence regional integration

3 结论

(1)经膜逐级筛分为主的物化方式处理后的城市污水属于低碳氮比的废水.

(2)微絮凝过滤主要富集的是原水中非溶解性有机物和相对分子质量大于30 000的芳香类蛋白物质,富集程度在 60.93%,尤其是类酪氨酸和类色氨酸.

(3)0.45 μm 和 0.22 μm 醋酸纤维膜能将相对分子质量大于30 000的溶解性有机物全部富集,但是不同孔径微滤膜对有机物的富集没有选择性.

(4)纳滤主要对城市污水中的富里酸类物质和腐殖酸类物质有很好富集效果,富集程度分别为 52.01% 和 53.57%,溶解性有机物的总体富集程度在 42% 左右,其富集特性与有机物相对分子质量的相关性较小.

参考文献:

[1] 郝晓地, 金铭, 胡沅胜. 荷兰未来污水处理新框架——NEWs 及其实践[J]. 中国给水排水, 2014, **30**(20): 7-15.
Hao X D, Jin M, Hu Y S. Framework of future wastewater treatment in the Netherlands: NEWs and their practices [J]. China Water & Wastewater, 2014, **30**(20): 7-15.

[2] Mansell B L. Side-stream treatment of anaerobic digester filtrate by anaerobic ammonia oxidation[D]. Salt Lake City: University of Utah, 2011.

[3] Ho J S, Sim L N, Webster R D, *et al*. Monitoring fouling behavior of reverse osmosis membranes using electrical impedance spectroscopy: a field trial study[J]. Desalination, 2017, **407**: 75-84.

[4] Ancell M, Ebbs N, Cowden S, *et al*. El paso water utilities' frontera lift station super oxygenation system for odor treatment [J]. Proceedings of the Water Environment Federation, 2015. 1-16.

[5] 李海宇, 宋卫锋. 膜处理技术在废酸回收中的应用[J]. 膜科学与技术, 2016, **36**(3): 136-141.
Li H Y, Song W F. Application of membrane in the treatment of acid recovery[J]. Membrane Science and Technology, 2016, **36**(3): 136-141.

[6] 郭海林, 周宇松, 李亮, 等. MBR + 反渗透双膜法处理印染废水及其回用工程实例[J]. 水处理技术, 2016, **42**(3): 132-135.
Guo H L, Zhou Y S, Li L, *et al*. Application of membrane bioreactor and reverse osmosis in dyeing and finishing wastewater treatment and its reuse project [J]. Technology of Water Treatment, 2016, **42**(3): 132-135.

[7] Petrinic I, Korenak J, Povodnik D, *et al*. A feasibility study of ultrafiltration/reverse osmosis (UF/RO)-based wastewater treatment and reuse in the metal finishing industry[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, **101**: 292-300.

[8] Dolar D, Košutić K, Strmecky T. Hybrid processes for treatment of landfill leachate: coagulation/UF/NF-RO and adsorption/UF/NF-RO[J]. Separation and Purification Technology, 2016, **168**: 39-46.

[9] 李昆, 王健行, 魏源送. 纳滤在水处理与回用中的应用现状与展望[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(8): 2714-2729.
Li K, Wang J X, Wei Y S. Application of nanofiltration in water treatment and water reclamation: current status and future aspects [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(8): 2714-2729.

[10] Pimple S, Karikkat S, Devanna M, *et al*. Comparison of MBR/RO and UF/RO hybrid systems for the treatment of coke-oven effluents[J]. Desalination and Water Treatment, 2016, **57**(7): 3002-3010.

[11] Sun X F, Wang C W, Li Y B, *et al*. Treatment of phenolic wastewater by combined UF and NF/RO processes [J]. Desalination, 2015, **355**: 68-74.

[12] Racar M, Dolar D, Špehar A, *et al*. Application of UF/NF/RO membranes for treatment and reuse of rendering plant wastewater [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2017, **105**: 386-392.

[13] 徐天凯, 彭党聪, 徐涛, 等. 城市污水处理厂 A^2/O 工艺污泥膨胀与上浮的诊断[J]. 中国给水排水, 2016, **32**(23): 31-35.

[14] 端正花, 潘留明, 陈晓欧, 等. 低温下活性污泥膨胀的微生物群落结构研究[J]. 环境科学, 2016, **37**(3): 1070-1074.
Duan Z H, Pan L M, Chen X O, *et al*. Changes of microbial community structure in activated sludge bulking at low temperature[J]. Environmental Science, 2016, **37**(3): 1070-1074.

[15] 金鹏康, 石彦丽, 任武昂. 城市污水处理过程中溶解性有机物转化特性[J]. 环境工程学报, 2015, **9**(1): 1-6.
Jin P K, Shi Y L, Ren W A. Transformation characteristics of dissolved organic matter in process of wastewater treatment[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, **9**(1): 1-6.

[16] 王旭东, 刘佩, 王磊, 等. 城市污水二级出水中溶解性有机物特性分析[J]. 环境工程学报, 2014, **8**(6): 2186-2190.

Wang X D, Liu P, Wang L, *et al*. Analysis characteristics of dissolved organic matters in the secondary effluent of municipal wastewater[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, **8**(6): 2186-2190.

[17] 岳兰秀, 吴丰昌, 陈文龙. 贵州百花湖水中溶解有机质的分子量分布随深度的变化规律[J]. 环境科学与管理, 2008, **33**(5): 66-70.
Yue L X, Wu F C, Chen W L. Changes in molecular weight distribution of dissolved organic matter with depth in lake Baihua [J]. Environmental Science and Management, 2008, **33**(5): 66-70.

[18] Hambly A C, Arvin E, Pedersen L F, *et al*. Characterising organic matter in recirculating aquaculture systems with fluorescence EEM spectroscopy[J]. Water Research, 2015, **83**: 112-120.

[19] Yang L Y, Han D H, Lee B M, *et al*. Characterizing treated wastewaters of different industries using clustered fluorescence EEM-PARAFAC and FT-IR spectroscopy: implications for downstream impact and source identification[J]. Chemosphere, 2015, **127**: 222-228.

[20] 李海波, 孙晨, 刘晓玲, 等. 三维荧光光谱解析城市污水有机物的去除特征[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(8): 2371-2379.
Li H B, Sun C, Liu X L, *et al*. Assessing organic matter removal from municipal wastewater by excitation-emission matrix fluorescence[J]. China Environmental Science, 2016, **36**(8): 2371-2379.

[21] 范军辉, 郝瑞霞, Liu L, 等. SCSC-S/Fe 复合系统脱氮除磷途径及微生物群落特性[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(4): 1358-1365.
Fan J H, Hao R X, Liu L, *et al*. Way of nitrogen and phosphorus removal and microbial community characteristics for SCSC-S/Fe[J]. China Environmental Science, 2017, **37**(4): 1358-1365.

[22] 刘祥, 何成达, 刘雯, 等. 原水碳源分子量分布及 DPB 效能对酸化时间的响应[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(3): 797-803.
Liu X, He C D, Liu W, *et al*. Responses of the molecular weight distribution of raw water carbon source and DPB function to acidification time[J]. China Environmental Science, 2015, **35**(3): 797-803.

[23] Rudenko A, Drainville M, Boule A, *et al*. Energy recovery using raw wastewater-Barnstable pilot project [J]. Journal of New England Water Environment Association, 2016, **50**(3): 34-40.

[24] Drewes J E, Quanrud D M, Amy G L, *et al*. Character of organic matter in soil-aquifer treatment systems[J]. Journal of Environmental Engineering, 2006, **132**(11): 1447-1458.

[25] Jin P K, Jin X, Bjerkelund V A, *et al*. A study on the reactivity characteristics of dissolved effluent organic matter (EfOM) from municipal wastewater treatment plant during ozonation[J]. Water Research, 2016, **88**: 643-652.

[26] 尹子华, 盛晓琳, 刘锐, 等. 多级 A/O 工艺强化处理城市污水的效果研究[J]. 环境科学, 2016, **37**(9): 3460-3465.
Yin Z H, Sheng X L, Liu R, *et al*. Enhanced pollutants removal in a municipal wastewater treatment plant with multistage A/O process[J]. Environmental Science, 2016, **37**(9): 3460-3465.

[27] Chen W, Westerhoff P, Leenheer J A, *et al*. Fluorescence excitation-emission matrix regional integration to quantify spectra for dissolved organic matter [J]. Environmental Science & Technology, 2003, **37**(24): 5701-5710.

[28] Baghoth S A, Sharma S K, Amy G L. Tracking natural organic matter (NOM) in a drinking water treatment plant using fluorescence excitation-emission matrices and PARAFAC [J]. Water Research, 2011, **45**(2): 797-809.

[29] Sun Y Y, Wang Y, Xue N, *et al*. The effect of DOM on floc formation and membrane fouling in coagulation/ultrafiltration process for treating TiO_2 nanoparticles in various aquatic media [J]. Chemical Engineering Journal, 2017, **316**: 429-437.

[30] 姚璐璐, 涂响, 于会彬, 等. 三维荧光区域积分评估城市污水中溶解性有机物去除[J]. 环境工程学报, 2013, **7**(2): 411-416.
Yao L L, Tu X, Yu H B, *et al*. Evaluation of dissolved organic matter removal in municipal wastewater based on fluorescence regional integration [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2013, **7**(2): 411-416.

[31] Sgroi M, Roccaro P, Korshin G V, *et al*. Use of fluorescence EEM to monitor the removal of emerging contaminants in full scale wastewater treatment plants [J]. Journal of Hazardous Materials, 2017, **323**: 367-376.

[32] 何小松, 席北斗, 张鹏, 等. 地下水中溶解性有机物的季节变化特征及成因[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(3): 862-870.
He X S, Xi B D, Zhang P, *et al*. The seasonal distribution characteristics and its reasons of dissolved organic matter in groundwater[J]. China Environmental Science, 2015, **35**(3): 862-870.

[33] Yu H B, Song Y H, Tu X, *et al*. Assessing removal efficiency of dissolved organic matter in wastewater treatment using fluorescence excitation emission matrices with parallel factor analysis and second derivative synchronous fluorescence [J]. Bioresource Technology, 2013, **144**: 595-601.

[34] 杨毅, 杨霞霞, 马新培, 等. pH 对城市污水二级出水中溶解性有机物的荷电、聚集与光谱特性的影响[J]. 环境化学, 2015, **34**(10): 1804-1808.
Yang Y, Yang X X, Ma X P, *et al*. Effect of pH on the charge aggregation and spectral characteristics of DOM in secondary effluent of municipal wastewater[J]. Environmental Chemistry, 2015, **34**(10): 1804-1808.

HUANJING KEXUE

Vol. 40 No. 3

Environmental Science (monthly)

Mar. 15, 2019

CONTENTS