

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



2019

Vol.40 No.3
第40卷 第3期

目次

2014~2017北京市气象条件和人为排放变化对空气质量改善的贡献评估	尹晓梅, 李梓铭, 熊亚军, 乔林, 邱雨露, 孙兆彬, 寇星霞 (1011)
利用多元线性回归方法评估气象条件和控制措施对 APEC 期间北京空气质量的影响	李颖若, 汪君霞, 韩婷婷, 王焱, 何迪, 权维俊, 马志强 (1024)
京津冀郊区站点秋冬季大气 PM _{2.5} 来源解析	王彤, 华阳, 许庆成, 王书肖 (1035)
四川省典型工业行业 PM _{2.5} 成分谱分析	冯小琼, 陈军辉, 熊文朋, 梅林德, 徐雪梅, 尹寒梅, 范武波, 姜涛, 钱骏, 叶宏 (1043)
典型物流城市 2016 年冬季 2 次污染过程 PM _{2.5} 污染特征及来源解析	赵雪艳, 杨文, 王静, 刘盈盈, 白雯宇, 徐艳萍, 王歆华, 白志鹏 (1052)
沈阳市采暖期与非采暖期空气 PM _{2.5} 污染特征及来源分析	张显, 田莎莎, 刘盈盈, 赵雪艳, 余浩, 张辉, 陈莉, 王歆华 (1062)
新乡冬季 PM _{2.5} 中金属元素与水溶性离子年际变化及其来源解析	闫广轩, 雷豪杰, 张靖雯, 唐明双, 张佳羽, 曹治国, 李云蓓, 王跃思, 樊静, 李虎 (1071)
烟台市环境受体 PM _{2.5} 四季污染特征与来源解析	刘童, 王晓军, 陈倩, 温杰, 黄渤, 朱红霞, 田瑛泽, 冯银厂 (1082)
常州市冬季 PM _{2.5} 中类腐殖质昼夜特征分析	顾远, 李清, 黄爱倩, 赵竹子, 马帅帅, 叶招莲 (1091)
西北某电子垃圾拆解厂室内外重金属污染特征及暴露风险	曹红梅, 赵留元, 穆熙, 李尧捷, 毛潇萱, 黄韬, 马建民, 高宏 (1101)
京津冀一次污染过程的星地同步动态监测分析	邱昀, 李令军, 姜磊, 王新辉, 赵文慧, 张立坤, 鹿海峰 (1111)
中国城市 O ₃ 浓度时空变化特征及驱动因素	黄小刚, 赵景波, 曹军骥, 宋永永 (1120)
基于卫星和地面观测的 2013 年以来我国臭氧时空分布及变化特征	张倩倩, 张兴赢 (1132)
舟山市臭氧污染分布特征及来源解析	王俏丽, 董敏丽, 李素静, 吴成志, 王刚, 陈必新, 李伟, 高翔, 叶荣民 (1143)
中国建筑涂料使用 VOCs 排放因子及排放清单的建立	高美平, 邵霞, 聂磊, 王海林, 安小桂 (1152)
异戊二烯和甲苯二次有机硫踪物的臭氧非均相氧化	黄亚娟, 曹罡, 朱荣淑, 欧阳峰 (1163)
兰州市农牧业源氨排放清单及其时空分布特征	栗世学, 郭文凯, 何昕, 朱玉凡, 陈强 (1172)
成都降水稳定氢氧同位素特征及水汽来源分析	胡月, 刘国东, 孟玉川, 张文江, 夏成城 (1179)
基于 TBL 模型的闽江口围垦养虾塘水-大气界面 CO ₂ 扩散通量估算	张逸飞, 杨平, 赵光辉, 李玲, 谭立山, 全川 (1188)
渤海和北黄海有色溶解有机物 (CDOM) 的分布特征和季节变化	刘兆冰, 梁文健, 秦礼萍, 唐建辉 (1198)
思林水库荧光溶解性有机质的特征、来源及其转化动力学	劳心宇, 原杰, 刘瑜, Khan M. G. Mostofa (1209)
厦门湾海滩微塑料污染特征	刘启明, 梁海涛, 锡桂莉, 胡欣, 葛健 (1217)
高分辨率监测下的漓江省里断面生物地球化学特征分析	王奇岗, 肖琼, 赵海娟, 王健力, 郭永丽, 张清华 (1222)
鲜水河断裂带拉沁盆地断面地下水化学特征及控制因素	何锦, 张幼宽, 赵雨晴, 韩双宝, 刘元晴, 张涛 (1236)
成都市锦江表层水和沉积物中有机磷酸酯的污染特征	吴迪, 印红玲, 李世平, 王增武, 邓旭, 罗怡, 罗林 (1245)
丹江口库区表层浮游细菌群落组成与 PICRUS1 功能预测分析	张菲, 田伟, 孙峰, 陈彦, 丁传雨, 庞发虎, 姚伦广, 李玉英, 陈兆进 (1252)
蓝藻水华对太湖水柱反硝化作用的影响	刘志迎, 许海, 詹旭, 朱广伟, 秦伯强, 张运林 (1261)
基于微生物生物完整性指数的城市河道生态系统健康评价	苏瑶, 许育新, 安文浩, 王云龙, 何振超, 楼颖雯, 沈阿林 (1270)
生物炭添加对湿地植物菖蒲根系通气组织和根系泌氧的影响	黄磊, 梁根坤, 梁岩, 罗星, 陈玉成 (1280)
城市不同材料屋面径流的污染负荷特性	何湖滨, 陈诚, 林育青, 严晗璐, 董建玮, 陈求稳 (1287)
BiOCl-(NH ₄) ₃ PW ₁₂ O ₄₀ 复合光催化剂制备及其光催化降解污染物机制	张文海, 吉庆华, 兰华春, 李静 (1295)
微米铁复合生物碳源对地下水中 1,2-二氯乙烷的高效去除	吴乃瑾, 宋云, 魏文侠, 王海见, 孙仲平 (1302)
鸟粪石天然沸石复合材料对水中铅离子的去除	邓曼君, 王学江, 成雪君, 景焕平, 赵建夫 (1310)
Ca/Mg 负载改性沼渣生物炭对水中磷的吸附特性	易蔓, 李婷婷, 李海红, 黄巧, 杨金娥, 陈玉成, 杨志敏 (1318)
两种生物炭的制备及其对水溶液中四环素去除的影响因素	程扬, 沈启斌, 刘子丹, 杨小莹, 张太平, 廖志钟 (1328)
静止和水动力扰动状态下铅改性沸石添加对河道底泥磷迁移转化的影响	俞阳, 林建伟, 詹艳慧, 何思琪, 吴小龙, 王艳, 赵钰颖, 林莹, 刘鹏茜 (1337)
4 种磺胺类药物及乙酰化代谢物在污水处理厂的去除及机制	王大鹏, 张烟, 颜昌宙 (1347)
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, 薛梦娜, 汤同欢 (1353)
进水氨氮浓度对生物除磷颗粒系统的影响	李冬, 曹美忠, 郭跃利, 梅宁, 李帅, 张杰 (1360)
除磷亚硝化颗粒工艺启动及性能恢复	李海玲, 李冬, 张杰, 刘博 (1367)
CAST 工艺高温短程硝化的实现及其除磷性能	马娟, 杨蕊春, 俞小军, 周猛, 陈永志 (1375)
不同曝气量 and 好氧时间下 SPNDPR 系统处理低 C/N 城市污水的脱氮除磷性能	袁梦飞, 于德爽, 巩秀珍, 王晓霞, 陈光辉, 杜世明, 甄建国 (1382)
ABR 除碳-亚硝化耦合厌氧氨氧化处理城市污水	李田, 曹家炜, 谢凤莲, 沈耀良, 吴鹏, 宋吟玲 (1390)
室温低氨氮基质单级自养脱氮颗粒污泥启动效能与污泥特性	谢璐琳, 王建芳, 钱飞跃, 张泽宇, 沈耀良, 齐泽坤 (1396)
不同种泥的厌氧氨氧化反应器的启动及动力学特征	任君怡, 陈林艺, 李慧春, 秦玉洁, 曹雁, 王桐屿, 周少奇 (1405)
降温过程中生物膜 CANON 反应器的运行特征	付昆明, 廖敏华, 周厚田, 付巢, 姜娜, 仇付国, 曹秀芹 (1412)
IEM-UF 同步分离反硝化系统脱氮特性及种群结构分析	刘子奇, 张岩, 马翔山, 张博康, 曹孟京, 曹昌明 (1419)
温度对硝化杆菌 (Nitrobacter) 活性动力学影响	于雪, 孙洪伟, 李维维, 祁国平, 马娟, 陈永志, 吕心涛 (1426)
零价铁和微波预处理组合强化污泥厌氧消化	牛雨彤, 刘吉宝, 马爽, 李亚明, 解立平, 魏源送, 孟晓山 (1431)
牛粪堆肥系统环境因子对抗性基因的影响	彭磊, 王科, 谷月, 王爱杰 (1439)
环境因子对土壤微生物呼吸及其温度敏感性变化特征的影响	张彦军, 郭胜利 (1446)
三峡库区典型林分土壤呼吸及其组分对模拟酸雨响应	李一凡, 王玉杰, 王彬, 王云琦 (1457)
三峡库区柑橘园施肥量对土壤氮淋失及残留量的影响	王甜, 黄志霖, 曾立雄, 肖文发, 宋文梅 (1468)
长期施肥下水稻根际和非根际土壤微生物碳源利用特征	宁赵, 程爱武, 唐海明, 葛体达, 邓扬悟, 苏以荣, 陈香碧 (1475)
不同碳负荷梯度下稻田土壤有机碳矿化特征	童瑶瑶, 王季斐, 祝贞科, 邓扬悟, 陈珊, 葛体达, 袁红朝, 吴金水 (1483)
桂林会仙喀斯特湿地水位梯度下不同植物群落土壤有机碳及其组分特征	徐广平, 李艳琼, 沈育伊, 张德楠, 孙英杰, 张中峰, 周龙武, 段春燕 (1491)
缙云山 4 种森林植被土壤团聚体有机碳分布特征	王富华, 吕盛, 黄容, 高明, 王子芳, 徐畅 (1504)
大气污染对居民健康影响研究进展	秦耀辰, 谢志祥, 李阳 (1512)
《环境科学》征订启事 (1042)	《环境科学》征稿简则 (1162)
信息 (1208, 1235, 1286)	

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的芳香类蛋白质物质, 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.hjxx.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 El 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/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	TN/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	TP/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	SS/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	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 $\times$ 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 $\text{mL}\cdot\text{L}^{-1}$,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。

$$\lg M_r = -0.1003 \times t + 4.9957 \quad (1)$$

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 $\text{nm}\cdot\text{min}^{-1}$,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,紧接着的两级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 NH₄⁺-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 NH₄⁺-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

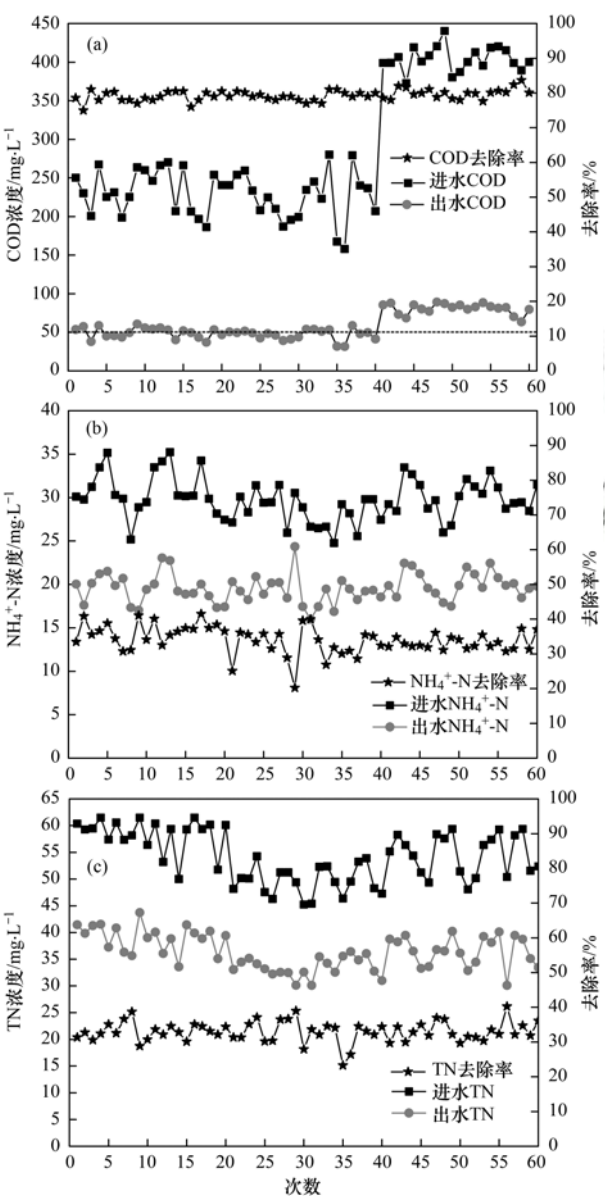


图 1 水质水量波动对 COD、NH₄⁺-N、TN 的去除效果影响
Fig. 1 Effect of fluctuation of water quantity and quality on removal effect of COD, ammonia nitrogen, and total nitrogen removal

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 $E_x/E_m = 275 \sim 280 \text{ nm}/305 \sim 345 \text{ nm}$,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 $E_x/E_m = 225 \sim 235 \text{ nm}/340 \sim 350 \text{ nm}$,属于类色氨酸荧光峰.上述蛋白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 $E_x/E_m = 230 \sim 235 \text{ nm}/340 \sim 350 \text{ nm}$.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

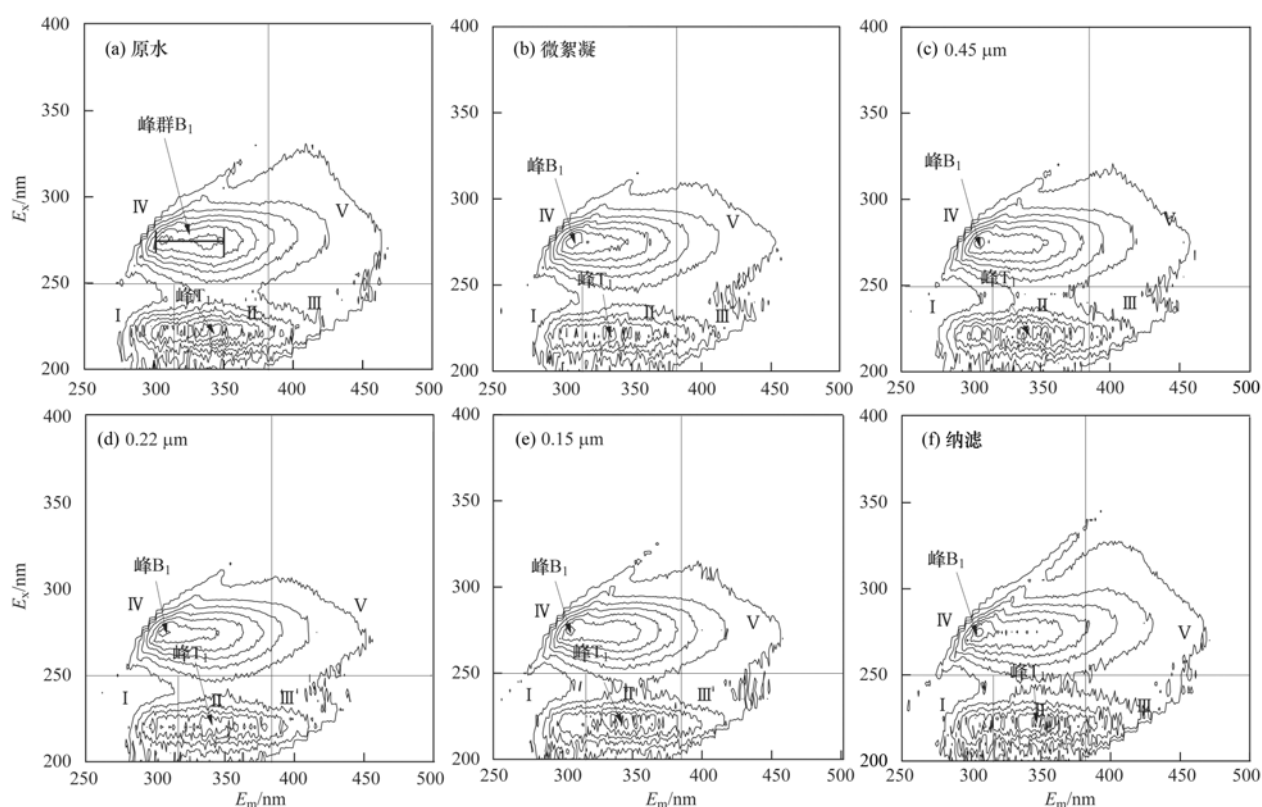


图2 各级出水三维荧光图谱

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 $E_x/E_m = 200 \sim 250 \text{ nm}/260 \sim 320 \text{ nm}$;区域II代表芳香蛋白类物质II,荧光范围为 $E_x/E_m = 200 \sim 250 \text{ nm}/320 \sim 380 \text{ nm}$;区域III代表富里酸类物质,荧光范围为 $E_x/E_m = 200 \sim 250 \text{ nm}/380 \sim 550 \text{ nm}$;区域IV代表溶解性微生物代谢产物,荧光范围为 $E_x/E_m = 250 \sim 450 \text{ nm}/260 \sim 380 \text{ nm}$;区域V代表腐殖酸类物质,荧光范围为 $E_x/E_m = 250 \sim 450 \text{ nm}/380 \sim 550 \text{ nm}$.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 $P_{i,n}$ 为各个区域的标准积分体积与所有区域标准积分体积的比值.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 $115 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降低至 $95 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.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 $70 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降低至 $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.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。

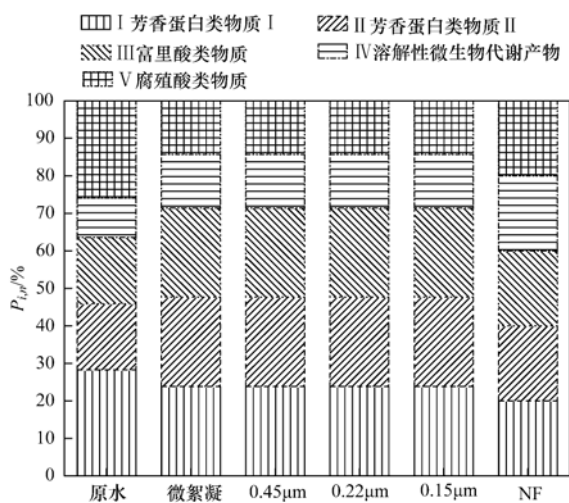


图3 各级出水荧光区域积分占比

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 A²/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] Bagtho 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 TiO₂ 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.

CONTENTS

Contribution Assessment of Meteorology Conditions and Emission Change for Air Quality Improvement in Beijing During 2014-2017	YIN Xiao-mei, LI Zi-ming, XIONG Ya-jun, <i>et al.</i>	(1011)
Using Multiple Linear Regression Method to Evaluate the Impact of Meteorological Conditions and Control Measures on Air Quality in Beijing During APEC 2014	LI Ying-ruo, WANG Jun-xia, HAN Ting-ting, <i>et al.</i>	(1024)
Source Apportionment of PM _{2.5} in Suburban Area of Beijing-Tianjin-Hebei Region in Autumn and Winter	WANG Tong, HUA Yang, XU Qing-cheng, <i>et al.</i>	(1035)
Fine Particulate Matter Source Profile of Typical Industries in Sichuan Province	FENG Xiao-qiong, CHEN Jun-hui, XIONG Wen-peng, <i>et al.</i>	(1043)
Source Apportionment and Pollution Characteristics of PM _{2.5} During the Two Heavy Pollution Episodes in the Winter of 2016 in a Typical Logistics City	ZHAO Xue-yan, YANG Wen, WANG Jing, <i>et al.</i>	(1052)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in Heating and Non-heating Periods in Shenyang	ZHANG Xian, TIAN Sha-sha, LIU Ying-ying, <i>et al.</i>	(1062)
Interannual Variation of Metal Elements and Water-Soluble Ions in PM _{2.5} During Wintertime in Xinxiang and Their Source Apportionment	YAN Guang-xuan, LEI Hao-jie, ZHANG Jing-wen, <i>et al.</i>	(1071)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Ambient PM _{2.5} During Four Seasons in Yantai City	LIU Tong, WANG Xiao-jun, CHEN Qian, <i>et al.</i>	(1082)
Day-night Characteristics of Humic-like Substances in PM _{2.5} During Winter in Changzhou	GU Yuan, LI Qing, HUANG Wen-qian, <i>et al.</i>	(1091)
Pollution Characteristics and Occupational Exposure Risk of Heavy Metals in Indoor and Outdoor Ambient Particles at a Scaled Electronic Waste Dismantling Plant, Northwest China	CAO Hong-mei, ZHAO Liu-yuan, MU Xi, <i>et al.</i>	(1101)
Analysis of a Pollution Process in the Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Satellite and Surface Observations	QIU Yun, LI Ling-jun, JIANG Lei, <i>et al.</i>	(1111)
Spatial-temporal Variation of Ozone Concentration and Its Driving Factors in China	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, CAO Jun-ji, <i>et al.</i>	(1120)
Ozone Spatial-temporal Distribution and Trend over China Since 2013: Insight from Satellite and Surface Observation	ZHANG Qian-qian, ZHANG Xing-ying	(1132)
Characteristics of Ozone Pollution Distribution and Source Apportionment in Zhoushan	WANG Qiao-li, DONG Min-li, LI Su-jing, <i>et al.</i>	(1143)
Establishment of VOCs Emissions Factor and Emissions Inventory from Using of Architectural Coatings in China	GAO Mei-ping, SHAO Xia, NIE Lei, <i>et al.</i>	(1152)
Heterogeneous Oxidation of Secondary Organic Tracers of Isoprene and Toluene by Ozone	HUANG Ya-juan, CAO Gang, ZHU Rong-shu, <i>et al.</i>	(1163)
Inventory and Spatiotemporal Distribution of Ammonia Emission from Agriculture and Animal Husbandry in Lanzhou City	LI Shi-xue, GUO Wen-kai, HE Xin, <i>et al.</i>	(1172)
Analysis of Stable Hydrogen and Oxygen Isotope Characteristics and Vapor Sources of Event-based Precipitation in Chengdu	HU Yue, LIU Guo-dong, MENG Yu-chuan, <i>et al.</i>	(1179)
Diffusive CO ₂ Flux Across the Water-air Interface of Reclaimed Shrimp Ponds in the Minjiang River Estuary Based on the TBL Model	ZHANG Yi-fei, YANG Ping, ZHAO Guang-hui, <i>et al.</i>	(1188)
Distribution and Seasonal Variations of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in the Bohai Sea and the North Yellow Sea	LIU Zhao-bing, LIANG Wen-jian, QIN Li-ping, <i>et al.</i>	(1198)
Sources, Characteristics and Transformation Dynamics of Fluorescent Dissolved Organic Matter in the Silin Reservoir	LAO Xin-yu, YUAN Jie, LIU Yu, <i>et al.</i>	(1209)
Microplastic Pollution of the Beaches in Xiamen Bay, China	LIU Qi-ming, LIANG Hai-tao, XI Gui-li, <i>et al.</i>	(1217)
Biogeochemical Characteristics in Shengli Site of Lijiang River Under the High Resolution Monitoring	WANG Qi-gang, XIAO Qiong, ZHAO Hai-juan, <i>et al.</i>	(1222)
Hydrochemical Characteristics and Possible Controls of Groundwater in the Xialatuo Basin Section of the Xianshui River	HE Jin, ZHANG You-kuan, ZHAO Yu-qing, <i>et al.</i>	(1236)
Pollution Characteristics of OPEs in the Surface Water and Sediment of the Jinjiang River in Chengdu City	WU Di, YIN Hong-ling, LI Shi-ping, <i>et al.</i>	(1245)
Community Structure and Predictive Functional Analysis of Surface Water Bacterioplankton in the Danjiangkou Reservoir	ZHANG Fei, TIAN Wei, SUN Feng, <i>et al.</i>	(1252)
Influence of Cyanobacterial Blooms on Denitrification Rate in Shallow Lake Taihu, China	LIU Zhi-ying, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i>	(1261)
Assessment of Ecosystem Health of an Urban River Based on the Microbe Index of Biotic Integrity (M-IBI)	SU Yao, XU Yu-xin, AN Wen-hao, <i>et al.</i>	(1270)
Influences of Biochar Application on Root Aerenchyma and Radial Oxygen Loss of <i>Acorus calamus</i> in Relation to Subsurface Flow in a Constructed Wetland	HUANG Lei, LIANG Yin-kun, LIANG Yan, <i>et al.</i>	(1280)
Pollution Load Characteristics of Runoff from Urban Roofs of Different Materials	HE Hu-bin, CHEN Cheng, LIN Yu-qing, <i>et al.</i>	(1287)
Preparation of BiOCl-(NH ₄) ₃ PW ₁₂ O ₄₀ Photocatalyst and a Mechanism for Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants	ZHANG Wen-hai, JI Qing-hua, LAN Hua-chun, <i>et al.</i>	(1295)
High Efficiency Removal of 1,2-Dichloroethane from Groundwater by Microscale Zero-valent Iron Combined with Biological Carbon Source	WU Nai-jin, SONG Yun, WEI Wen-xia, <i>et al.</i>	(1302)
Removal of Lead Ions from Water by Struvite Natural Zeolite Composite	DEND Man-jun, WANG Xue-jiang, CHENG Xue-jun, <i>et al.</i>	(1310)
Characteristics of Phosphorus Adsorption in Aqueous Solution By Ca/Mg-Loaded Biogas Residue Biochar	YI Man, LI Ting-ting, LI Hai-hong, <i>et al.</i>	(1318)
Preparation of Two Kinds of Biochar and the Factors Influencing Tetracycline Removal from Aqueous Solution	CHENG Yang, SHEN Qi-bin, LIU Zi-dan, <i>et al.</i>	(1328)
Effect of Zirconium-Modified Zeolite Addition on Migration and Transformation of Phosphorus in River Sediments Under Static and Hydrodynamic Disturbance Conditions	YU Yang, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i>	(1337)
Removal Efficiencies and Mechanism Research on Four Sulfonamides and Their Acetyl Metabolites in a Wastewater Treatment Plant	WANG Da-peng, ZHANG Xian, YAN Chang-zhou	(1347)
Assessing Performance of Pollutant Removal from Municipal Wastewater by Physical and Chemical Methods Based on Membranes	XU Ting, LI Yong, ZHU Yi-jia, <i>et al.</i>	(1353)
Effect of Influent Ammonia Concentration on a Biological Phosphorus Removal Granules System	LI Dong, CAO Mei-zhong, GUO Yue-zhou, <i>et al.</i>	(1360)
Start-up and Performance Recovery of Granular Sludge for Phosphorus Removal and Nitrification	LI Hai-ling, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	(1367)
Realization of Short-cut Nitrification in a CAST Process at High Temperature and Its Phosphorus Removal Performance	MA Juan, YANG Rui-chun, YU Xiao-jun, <i>et al.</i>	(1375)
Nitrogen and Phosphorus Removal from Low C/N Municipal Wastewater Treated by a SPNDPR System with Different Aeration and Aerobic Times	YUAN Meng-fei, YU De-shuang, GONG Xiu-zhen, <i>et al.</i>	(1382)
ABR Decarbonization-Nitrosation Coupled with ANAMMOX to Treat Municipal Wastewater	LI Tian, CAO Jia-wei, XIE Feng-lian, <i>et al.</i>	(1390)
Start-up Performance and Sludge Characteristics of Single-stage Autotrophic Nitrogen Removal System with Granular Sludge at Low Ammonia Nitrogen Concentration at Room Temperature	XIE Lu-lin, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i>	(1396)
ANAMMOX Reactor with Two Kinds of Inoculated Sludge: Start-up and Kinetics Characteristics	REN Jun-yi, CHEN Lin-yi, LI Hui-chun, <i>et al.</i>	(1405)
Operation Characteristics of the Biofilm CANON Reactor During the Temperature Reduction Process	FU Kun-ming, LIAO Min-hui, ZHOU Hou-tian, <i>et al.</i>	(1412)
Nitrogen Removal Characteristics and Analysis of Microbial Community Structure in an IEM-UF Simultaneous Separation and Denitrification System	LIU Zi-qi, ZHANG Yan, MA Xiang-shan, <i>et al.</i>	(1419)
Effect of Temperature on the Activity Kinetics of <i>Nitrobacter</i>	YU Xue, SUN Hong-wei, LI Wei-wei, <i>et al.</i>	(1426)
Enhancement for Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge Based on Microwave Pretreatment Combined with Zero Valent Iron	NIU Yu-tong, LIU Ji-bao, MA Shuang, <i>et al.</i>	(1431)
Effects of Environmental Factors on Tetracyclines and Macrolides Resistance Genes in Cattle Manure Composting Systems	PENG Jing, WANG Ke, GU Yue, <i>et al.</i>	(1439)
Effect of Environmental Factors on Variation Characteristics of Soil Microbial Respiration and Its Temperature Sensitivity	ZHANG Yan-jun, GUO Sheng-li	(1446)
Response of Soil Respiration and Its Components to Simulated Acid Rain in a Typical Forest Stand in the Three Gorges Reservoir Area	LI Yi-fan, WANG Yu-jie, WANG Bin, <i>et al.</i>	(1457)
Effects of Fertilization on the Nitrogen Residual Amounts and Leaching from Citrus Orchard Soil in the Three Gorges Reservoir Area	WANG Tian, HUANG Zhi-lin, ZENG Li-xiong, <i>et al.</i>	(1468)
Microbial Carbon Source Metabolic Profile in Rice Rhizosphere and Non-rhizosphere Soils with Different Long-term Fertilization Management	NING Zhao, CHENG Ai-wu, TANG Hai-ming, <i>et al.</i>	(1475)
Characterization of Soil Organic Carbon Mineralization Under Different Gradient Carbon Loading in Paddy Soil	TONG Yao-yao, WANG Ji-fei, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i>	(1483)
Soil Organic Carbon Distribution and Components in Different Plant Communities Along a Water Table Gradient in the Huixian Karst Wetland in Guilin	XU Guang-ping, LI Yan-qiong, SHEN Yu-yi, <i>et al.</i>	(1491)
Distribution of Organic Carbon in Soil Aggregates from Four Kinds of Forest Vegetation on Jinyun Mountain	WANG Fu-hua, LÜ Sheng, HUANG Rong, <i>et al.</i>	(1504)
Review of Research on the Impacts of Atmospheric Pollution on the Health of Residents	QIN Yao-chen, XIE Zhi-xiang, LI Yang	(1512)