

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.9

第40卷 第9期

目次

气溶胶中不同类型碳组分粒径分布特征	杜翔, 赵普生, 董群, 苏捷 (3849)
郑州市 2014~2017 年大气污染特征及气象条件影响分析	郭蒙蒙, 姜楠, 王申博, 段时光, 张瑞芹 (3856)
济南市背景区域大气 PM _{2.5} 污染特征及其对能见度的影响	别淑君, 杨凌霄, 高颖, 姜盼, 李岩岩, 杨雨蒙, 赵彤, 王文兴 (3868)
聊城市冬季 PM _{2.5} 中多环芳烃来源解析及健康风险评估	刘晓迪, 侯战方, 孟静静, 燕丽, 周贝贝, 刘子亭, 衣雅男, 李静, 魏本杰, 伏梦璇 (3875)
2001~2017 年全国气溶胶光学厚度时空分布及变化趋势	刘海知, 郭海燕, 马振峰, 徐辉, 包红军, 徐成鹏 (3886)
长三角地区吸收性气溶胶时空分布特征	赵楠, 曹梵诗, 田晴, 陈勇航, 刘琼, 黄艺伟, 王羽佳 (3898)
燃煤锅炉颗粒物化学组成排放特征	杨艳蓉, 周雪明, 秦娟娟, 谭吉华, 胡京南, 陈荣志, 段菁春, 李艳 (3908)
高速公路沿线 PM _{2.5} 中重金属污染特征	李晓宝, 廖祖文, 赵红, 彭成辉, 谭腾飞, 黄萍 (3916)
北京市道路扬尘重金属污染特征及潜在生态风险	胡月琪, 郭建辉, 张超, 王铮, 颜旭, 杨懂艳, 刘兆莹 (3924)
风蚀扬尘抑尘剂效率测试方法与应用	秦建平, 李贝贝, 杨涛, 宋博, 黄玉虎, 张春荣 (3935)
京津冀地区典型印刷企业 VOCs 排放特征及臭氧生成潜势分析	刘文文, 方莉, 郭秀锐, 聂磊, 王敏燕 (3942)
成都市典型工艺过程源挥发性有机物源成分谱	周子航, 邓也, 吴柯颖, 谭钦文, 周小玲, 宋丹林, 黄凤霞, 曾文斌 (3949)
工业园区恶臭污染源排放特征和健康风险评估	孟洁, 翟增秀, 荆博宇, 崔焕文, 王亘 (3962)
典型华北农村地区冬季 HONO 的浓度水平及来源分析	王玉征, 薛朝阳, 张成龙, 刘鹏飞, 张圆圆, 陈晖, 陈建民, 牟玉静, 刘俊峰 (3973)
不同方法制备 Co ₃ O ₄ 催化剂 CO-SCR 性能及机制	仲雪梅, 张涛, 李佳萌, 秦萱, 王亚洲, 曾洁, 张光明, 常化振 (3982)
全氟烷基物质在胶州湾海水、沉积物及生物中污染特征	崔杰文, 彭吉星, 谭志军, 翟毓秀, 郭萌萌, 李兆新, 牟海津 (3990)
江苏水源地型水库异味物质发生风险及影响因素	史鹏程, 朱广伟, 杨文斌, 许海, 朱梦圆, 邹伟, 胡林娜, 笪文怡, 季鹏飞 (4000)
城镇流域水体-沉积物中溶解性有机质的荧光特性及影响因素: 以宁波市小浃江为例	高凤, 邵美玲, 唐剑锋, 曹昌丽, 易辉 (4009)
水华对沉积物中氮的转化和去除的影响	肖琳, 杨佳怡 (4018)
沉积物有效态磷对湖库富营养化的指示及适用性	刘辉, 胡林娜, 朱梦圆, 赵林林, 许海, 邹伟, 史鹏程, 韩慧洁, 季鹏飞, 朱广伟 (4023)
汾河下游雨季硝酸盐污染源解析	汪银龙, 冯民权, 董向前 (4033)
新疆喀什三角洲地下水化学特征及演化规律	魏兴, 周金龙, 乃尉华, 曾妍妍, 范薇, 李斌 (4042)
基于多个扩增子的 DNA metabarcoding 技术探究黄海微型真核浮游植物多样性	张莉, 张远, 林佳宁, 王书平 (4052)
FG、MFG 和 MBFG 浮游植物功能群的比较: 以贵州三座水库为例	陈倩, 李秋华, 马欣洋, 熊梅君, 何应, 韩孟书 (4061)
天然含铁矿物对砷的吸附效果及机制	邵金秋, 温其谦, 阎秀兰, 申俊峰, 杨林生, 杨硕 (4072)
镁-钙羟基磷灰石吸附剂对水中 Pb ²⁺ 的去除	何豪, 朱宗强, 刘杰, 朱义年, 阎起明, 刘阳, 莫南, 玄惠灵, 魏婉莹 (4081)
2,6-二氨基蒽醌/石墨烯复合电极强化电吸附 Pb ²⁺	晋圣兆, 向阳, 张隽琦, 张凯, 吉庆华 (4091)
钙掺杂四氧化三铁回收水中磷的实验	白润英, 刘建明, 郝俊峰, 徐慧, 胡文斌, 宋蕾, 刘宇红, 李会东, 周琦善 (4098)
大型城市污水处理厂处理工艺对微塑料的去除	贾其隆, 陈浩, 赵昕, 李磊, 聂云汉, 叶建峰 (4105)
A ² /O 流量分配处理低 C/N 污水性能与微生物结构优化	荣懿, 刘小钗, 何音旋, 章武首, 金鹏康 (4113)
上向流厌氧滤池 (UAF) 处理城市生活污水的运行效能	杨忠启, 刘秀红, 李海鑫, 刘智斌, 刘润雨, 杨庆 (4121)
微氧条件下自养-异养联合反硝化工艺的电子平衡分析	张若晨, 陈川, 邵博, 王威, 徐熙俊, 任南琪 (4128)
基于反硝化除磷的低温启动与稳定运行的中试试验	张帆, 于德爽, 刘杰, 王晓霞, 宋新新, 李传举, 赵峰辉 (4136)
聚己内酯与聚羟基丁酸戊酸酯的脱氮性能对比	易成豪, 秦伟, 陈湛, 文湘华 (4143)
厌氧氨氧化颗粒污泥快速培养及其抑制动力学	唐鹏, 于德爽, 陈光辉, 张培玉, 王晓霞, 吕廷廷, 黄硕, 刘诚诚 (4152)
Ca ²⁺ 对污泥硝化活性和絮凝沉降性能的影响	张兰河, 赵倩男, 张海丰, 贾艳萍, 李正, 陈子成, 郭静波, 赵天鹏 (4160)
从剩余污泥厌氧发酵上清液中以鸟粪石形式回收磷	畅萧, 曾薇, 王保贵, 许欢欢 (4169)
信号分子联合脱氮硫杆菌对同步脱氮除硫的影响	徐金兰, 陈紫薇, 张少枫, 魏清旋 (4177)
海水养殖尾水直排对河道沉积物细菌群落的影响	胡越航, 宣丽霞, 裴琼芬 (4185)
耦合短程硝化反硝化的垃圾渗滤液厌氧氨氧化处理系统构建及微生物群落分析	赵晴, 刘梦莹, 吕慧, 梁俊宇, 刁兴兴, 张鑫, 孟了 (4195)
稻秸添加对两种水稻土产甲烷古菌及细菌的影响	保琼莉, 王凤花, 保万魁, 黄益宗 (4202)
地膜覆盖对稻-油轮作农田温室气体排放的影响	陈世杰, 江长胜, 倪雪, 李晓茜, 郝庆菊 (4213)
氮肥深施及间种白三叶草对茶园 N ₂ O 排放的影响	吕天新, 伍延正, 沈健林, 陈丹, 姜文倩, 王娟, 李勇, 吴金水 (4221)
三峡库区及其下游溶解氧化亚氮 (N ₂ O) 分布和释放	程芳, 丁帅, 刘素美, 宋国栋, 张桂玲 (4230)
沉降除藻协同沉积物覆盖对藻华水体甲烷释放的影响	朱琳, 于江华, 施文卿, 易齐涛, 曹华勇, 蒲寅羽 (4238)
新建铅蓄电池集聚区对周边土壤环境的影响: 基于重金属空间特征	丁亚丽, 廖敏, 方至萍, 陈树森, 张云, 郭佳雯, 梁雨琦 (4244)
不同碳氮磷源改良剂对铅锌尾矿废弃地植被与土壤性质的影响	杨胜香, 李凤梅, 彭禧柱, 曹建兵, 高智席 (4253)
基于农产品安全的土壤重金属有效态含量限值推定方法	张云慧, 杜平, 何赢, 仲小飞, 罗会龙, 秦晓鹏, 徐刚 (4262)
缙云山不同土地利用方式下土壤植硅体碳的含量特征	罗东海, 王子芳, 陆畅, 黄容, 王富华, 李娇, 高明 (4270)
西南喀斯特土地利用变化对植物凋落物-土壤 C、N、P 化学计量特征和土壤酶活性的影响	田静, 盛茂银, 汪攀, 温培才 (4278)
调理剂+淹水措施对 Cd 污染稻田控 Cd 效果分析	彭鸥, 刘玉玲, 铁柏清, 何钟响, 杨蕊嘉, 李丹阳, 刘寿涛, 罗海艳 (4287)
海螺沟植物和积雪中有机磷酸酯的分布及来源	陈阳, 印红玲, 吴迪, 罗怡, 邓旭, 徐维新, 柳锦宝 (4295)
《环境科学》征订启事 (3923) 《环境科学》征稿简则 (3941) 信息 (4041, 4051, 4229)	

大型城市污水处理厂处理工艺对微塑料的去除

贾其隆¹, 陈浩², 赵昕¹, 李磊¹, 聂云汉¹, 叶建锋^{2*}

(1. 东华大学环境科学与工程学院, 上海 201620; 2. 上海市环境科学研究院, 上海 200233)

摘要: 污水处理厂出水是自然水体中微塑料(MPs)的重要来源。本文以上海市两个大型污水处理厂(WWTP)为研究对象, 分析了进水及各处理工艺出水中MPs的数浓度、形态变化及相应的去除率差异, 计算了MPs在污水处理厂的归趋。结果表明, WWTP1和WWTP2进水中MPs数浓度分别为 (226.27 ± 83.00) 个 $\cdot L^{-1}$ 和 (171.89 ± 62.98) 个 $\cdot L^{-1}$; WWTP1对MPs的去除效率为63.25%, 略大于WWTP2的处理效率(59.84%); 两个污水处理厂一级处理工艺对MPs的去除率占整个处理工艺的70%~80%。从污水处理厂的工艺来看, 一级处理工艺和二级处理工艺分别将污水中 $(48.10\% \pm 1.62\%)$ 和 $(12.97\% \pm 0.05\%)$ 的MPs转移到污泥中。从整体来看, 污水处理厂中的最终有 $(38.82\% \pm 1.55\%)$ 的MPs随出水进入到自然水体, 剩余 $(61.18\% \pm 1.55\%)$ 的MPs进入到污泥中。本研究表明, 上海市污水处理厂对MPs的去除率较低, 即使在处理后依旧有大量的MPs随出水进入到自然水体, 仍会对生态系统造成巨大的风险。本研究提供了平原河网地区大型城市污水处理厂MPs去除及归趋的基础数据, 可为进一步的MPs去除工艺设计提供参考。

关键词: 微塑料; 污水处理厂; 处理工艺; 去除效率; 归趋

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)09-4105-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201903100

Removal of Microplastics by Different Treatment Processes in Shanghai Large Municipal Wastewater Treatment Plants

JIA Qi-long¹, CHEN Hao², ZHAO Xin¹, LI Lei¹, NIE Yun-han¹, YE Jian-feng^{2*}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China; 2. Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China)

Abstract: Wastewater treatment plants are important sources of microplastics (MPs) in aquatic environments. The present study was conducted to investigate the number concentration, removal rate, and fate of MPs in two large municipal treatment plants in Shanghai. The MPs number concentration in the influent water of WWTP1 and WWTP2 were (226.27 ± 83.00) piece $\cdot L^{-1}$ and (171.89 ± 62.98) piece $\cdot L^{-1}$, respectively. WWTP1 had a MPs removal efficiency of 63.25%, which is slightly higher than that of WWTP2, at 59.84%. The removal efficiency during the primary treatment process of the two sewage treatment plants on MPs accounted for 70%~80% of the whole treatment process. The primary treatment process and secondary treatment process transferred $(48.10\% \pm 1.62\%)$ and $(12.97\% \pm 0.05\%)$ of MPs in the sewage to the sludge, respectively. As a whole, $(38.82\% \pm 1.55\%)$ of MPs in the sewage treatment plants were finally discharged into natural waters, and the remaining $(61.18\% \pm 1.55\%)$ entered the sludge. This study shows that the removal rate of MPs in Shanghai's municipal treatment plants is low and that after treatment, large amounts still enter the natural waters with the final effluent, which causes significant ecological risks. This study provides basic data of MPs removal and trends of large urban sewage treatment plants in a plain river network area, which can provide reference for further design of MPs removal processes.

Key words: microplastics; wastewater treatment plant; treatment process; removal rate; fate

微塑料(microplastics, MPs), 通常指粒径小于5 mm的塑料颗粒, 是近年来环境新兴污染物研究的热点之一^[1]。随着全球塑料产量的增加, 即从1950年的170万t增加至2017年的34.8亿t^[2], 环境中的MPs也随之呈现剧增趋势。这类新型污染物不仅广泛存在于各种水体和土壤中^[3~9], 同时能通过吸附环境中的持久性有机污染物^[10]、重金属^[11]和病原体^[7]等, 进一步造成生态风险^[12, 13]。2015年, 在德国举行的七国集团首脑会议上, 公布了MPs对全球生态系统及人类健康造成的风险问题, 引起了各国政府与学界的极大关注。到目前为止, MPs已被公认为是与气候变化等并列的严重的全球性环境问题之一^[14]。

当前的研究显示, 污水处理厂出水是淡水水体中MPs的重要来源^[15~17]。日常生活中的塑料制品无处不在, 如包装袋、纺织品、个人洗护用品中的一级和二级塑料微珠等, 都会随着生活污水进入污水处理厂, 因此污水处理厂中存在大量的MPs。国外的研究报道表明, 虽然经过多级处理工段, 污水处理厂仍会排放大量的MPs进入水体中。Murphy等^[15]对服务60万人的污水处理厂的MPs排放量进行估算, 结果表明, 每天大约有 6.5×10^7 个MPs颗粒排入受纳水体。同时, 污水处理厂在处理过程

收稿日期: 2019-03-12; 修订日期: 2019-04-15

作者简介: 贾其隆(1994~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为城市水体中的微塑料, E-mail: qilong_jia@163.com

* 通信作者, E-mail: yeji99@gmail.com

中,不断地将污水中的 MPs 转移到污泥中,因此污水处理厂污泥中积累了大量的 MPs^[18]。目前,对污水处理厂中 MPs 的研究主要集中在污水处理厂进出水 MPs 数浓度、类型等常规特征表征。国内关于污水厂排放 MPs 的研究仍处于起步阶段,相关案例较少,特别是针对我国多城市普遍建设的集中式大型污水处理厂,其进出水 MPs 的分布特征及相关去除效果尚不清楚。同时,需要指出的是,当前污水处理厂 MPs 去除的研究大部分是针对整个污水处理系统去除率的研究,而对污水处理厂各级处理工艺去除率的研究较少,这使得关于针对 MPs 去除的工艺优化设计无从谈起。因此,有必要针对污水处理厂进水及各级处理工艺出水中 MPs 的浓度形态变化、相应的去除率差异及 MPs 在污水处理厂的归趋进行研究。

本文选取上海市 2 个典型的大型污水处理厂为对象,考察了上海市污水处理厂中 MPs 的整体特征,分析了污水处理厂对 MPs 的处理效率,讨论了污水处理厂中 MPs 的归趋,本研究提供了平原河网地区大型城市污水处理厂 MPs 去除及归趋的基础数据,

以期为进一步的 MPs 去除工艺设计提供参考。

1 材料与方法

1.1 样品采集

本文选取上海市 2 个典型的大型三级污水处理厂为研究对象。WWTP1 和 WWTP2 为上海市处理规模较大、处理工艺较典型的污水处理厂,日污水处理能力均在百万立方米以上,主要处理上海市的生活污水,处理出水排入长江口。WWTP1 的服务范围主要包括黄浦区、静安区、长宁区、徐汇区、普陀区、闵行区及浦东新区,汇水区面积 271.7 km²,服务人口 355.76 万;WWTP2 的服务范围主要包括普陀区、长宁区、静安区、闸北区、黄浦区、虹口区、杨浦区及浦东区,汇水区面积 190 km²,服务人口 293 万。两个污水处理厂均采用活性污泥法处理污水,在处理工艺上略有不同(图 1),WWTP1 在一级处理中采用旋流式沉砂池,其后又进一步进行沉淀处理,二级处理采用 A²O 生物反应池;而 WWTP2 在一级处理中采用曝气沉砂池,出水直接进入生物池进行二级处理。

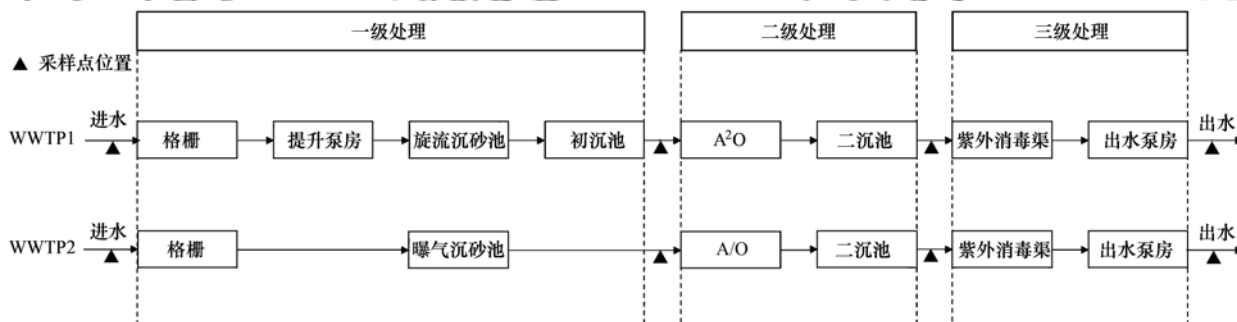


图 1 污水处理厂工艺流程及取样点位置示意

Fig. 1 Flowchart of municipal wastewater treatment plants and sampling points

在污水处理厂进水和各级工艺出水处(图 1),分别用不锈钢采样器于 2018 年 9 月晴天期间各采集 10 L 水样,保存至不锈钢桶中,每个采样点分不同的时间段(07:00~09:00、11:00~13:00 和 16:00~18:00)采集 3 次样品,每次 3 个平行样,样品带回实验室后保存在 4℃ 冰箱中。

1.2 样品处理与检测

本研究使用碱消解法^[19]去除 MPs 表面的有机质,即在水样中加入 NaOH 调至 1 mol·L⁻¹,再在 40℃ 条件下消解 8 h,以减少后期实验过程中对 MPs 检测的干扰。消解结束后,用真空泵将消解后的水样抽滤到滤膜(0.45 μm)上,存放在玻璃培养皿中。将滤膜放置在高速摄像仪(基恩士,Keyence VHX6000,日本)下,在放大 100 倍后对整张滤膜进行检测,根据已有研究建立的 MPs 形态特征分类

标准^[20],检出所有疑似 MPs 样品,并用高速摄像仪的“平面测量”功能测量 MPs 粒径,记录数量及形貌特征(形状、粒径、颜色等)数据,再将检出的疑似 MPs 颗粒存放于玻璃培养皿中。进一步利用傅立叶红外显微成像光谱仪(Nicolet In10 MX)对培养皿中的样品进行红外检测。将得到的红外谱图与数据库(HR Nicolet Sampler Library、Hummel Polymer Sample Library 和 Aldrich Condensed Phase Sample Library 等)中的谱图进行对比,判断是否为塑料,再以此为依据对每一样品 MPs 数据进行校正。同时,采用环境扫描电子显微镜(Quanta250)观察 MPs 的表面形貌。

1.3 MPs 采集及检测过程质控

所有用于保存或检测样品的容器均为不锈钢或玻璃材质。采样前事先用纯净水和超纯水(MilliQ)

二次清洗所有接触容器, 并进行密封保存. 采样过程中穿着棉质衣物以避免纤维衣物的可能污染. 采集样品在无尘室中进行处理及检测, 以避免大气沉降的干扰. 在实验过程中同样穿着全棉质实验服. 在样品检测前, 对高速摄像机及红外光谱的工作台进行消毒清洗. 同时, 设置空白实验对实验环境及整个实验流程中可能造成的 MPs 污染进行检测, 从而排除环境因素的干扰^[21]; 取 2 L 超纯水作为实验空白组, 加入 NaOH 调整至 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, 再在 40°C 条件下消解 8 h, 然后将消解后的水样过滤到 $0.45 \mu\text{m}$ 的滤膜上, 再把滤膜放置在高速摄像机下进行检测, 并进行红外检测. 在空白实验中未检测到 MPs.

1.4 风险评估

MPs 生态风险的计算根据 Xu 等^[22] 对水体 MPs 污染负荷指数 (PLI) 计算方法实现. 该方法最初用于评估河口的水质污染程度, 现被推广用于计算 MPs 的风险值. 计算公式如下:

$$CF_i = C_i / C_{oi} \quad (1)$$

$$PLI = \sqrt{CF_i} \quad (2)$$

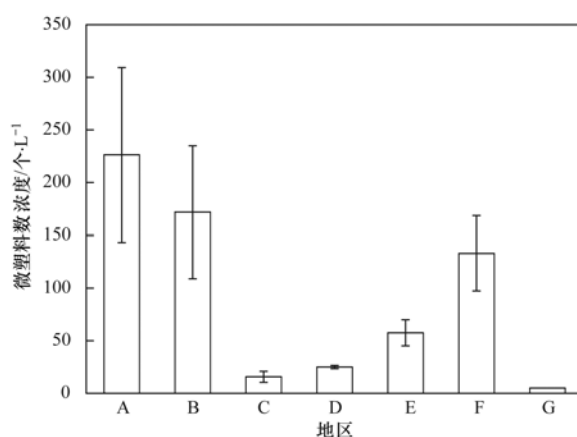
式中, CF_i 为 MPs 的数浓度因子; C_i 为 MPs 的数浓度; C_{oi} 为现有研究中 MPs 的最小数浓度 ($0.5 \times 10^{-3} \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$).

2 结果与讨论

2.1 污水处理厂进水中的 MPs

城市污水处理厂进水可以反映市政排水系统污水的基本状况, 因而检测分析污水处理厂进水 MPs 可以初步了解上海市市政污水中 MPs 的污染情况. 数据显示, WWTP1 和 WWTP2 进水中 MPs 数浓度分别为 $(226.27 \pm 83.00) \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $(171.89 \pm 62.98) \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$, 与已有数据^[15, 23-26] 对比可知, 上海市污水处理厂进水中的 MPs 数浓度为最高 (图 2). 这可能主要由于两个污水处理厂服务区域的人口密度远高于其他地区, 而人口密度与 MPs 的浓度呈正相关^[9], 因此进水中 MPs 浓度较高.

不同类型的 MPs 在用途上存在差异, 根据 MPs 的类型可以对其来源进行初步推算. 对 MPs 样品红外检测结果的统计表明 (图 3), 两个污水处理厂中 MPs 的类型相似 (图 4), WWTP1 中各类型占比为: PET (51.84%) > PA (18.33%) > PE (13.92%) > PP (8.39%), WWTP2 中各类型占比为: PET (53.11%) > PA (16.27%) > PE (15.49%) > PP (8.18%). 其中占比最大的是 PET, 这个结果跟之前一些污水处理厂中 MPs 的研究结果一致, 如苏格兰和澳大利亚污水处理厂的最终出水中, 所有的 MPs 中检测到 PET 的占比最高, 分别为 28% 和



A 表示中国上海 WWTP1 (本研究); B 表示中国上海 WWTP2 (本研究); C 表示英国^[15]; D 表示土耳其^[23]; E 表示芬兰^[24]; F 表示美国^[25]; G 表示德国^[26]

图 2 各地区污水处理厂进水 MPs 数浓度对比

Fig. 2 Comparison of influent MPs number concentration in different municipal wastewater treatment plants

67%^[15]. Ziajahromi 等^[27] 的研究表明, 纤维状的 PET 和颗粒状的 PE 是污水处理厂中最常见的塑料类型. PET 可用于制作衣物和容器 (如饮料瓶), 有研究表明洗衣废水中含有大量的 MPs^[28], 因此污水处理中的 PET 很有可能来源于居民的洗衣废水. PA 由于其机械强度高、耐腐蚀, 被广泛用于工业制造业, 如汽车零件, 因此可能来源于工业废水. PP 和 PE 用作食品或化妆品容器、各种家居用品、箱包、玩具、农业或食品包装膜等的原料, 它们可能来源于生活废水.

两个污水处理厂进水中 MPs 颜色相似 (图 5), WWTP1 中各颜色占比为: 无色 (77.73%) > 蓝色 (9.54%) > 黑色 (5.12%) > 红色 (2.75%) > 棕色 (1.89%) > 其他 (2.97%), WWTP2 中各颜色占比为: 无色 (75.70%) > 蓝色 (8.97%) > 黑色 (7.28%) > 红色 (3.02%) > 棕色 (1.91%) > 其他 (3.12%). 其中无色透明的 MPs 占比最大, 可能是因为 MPs 在环境中受到风、紫外照射和浸泡等的影响, 导致染色剂浸出、氧化等, 使原本颜色鲜艳变得无色透明. 有研究发现, 捕食者更容易摄入与猎物颜色相似的 MPs 颗粒^[29, 30], 因此, 可以对颜色如何影响 MPs 的环境命运和生态效应进行进一步的研究. 例如, 着色剂常常会影响塑料材料的最终热稳定性和紫外线稳定性^[31].

MPs 的形状可分为 3 种: 线状 (92.21%) > 片状 (6.34%) > 颗粒状 (1.45%), 其他污水处理厂的出水中线状 MPs 的占比也大于颗粒状 MPs 的占比^[16, 25, 32, 33]. 根据环境扫描电子显微镜得到的 MPs 表面形貌 [图 6(c) 和 6(d)], MPs 表面有大量空隙, 多孔结构增加了 MPs 吸附其他污染物的容

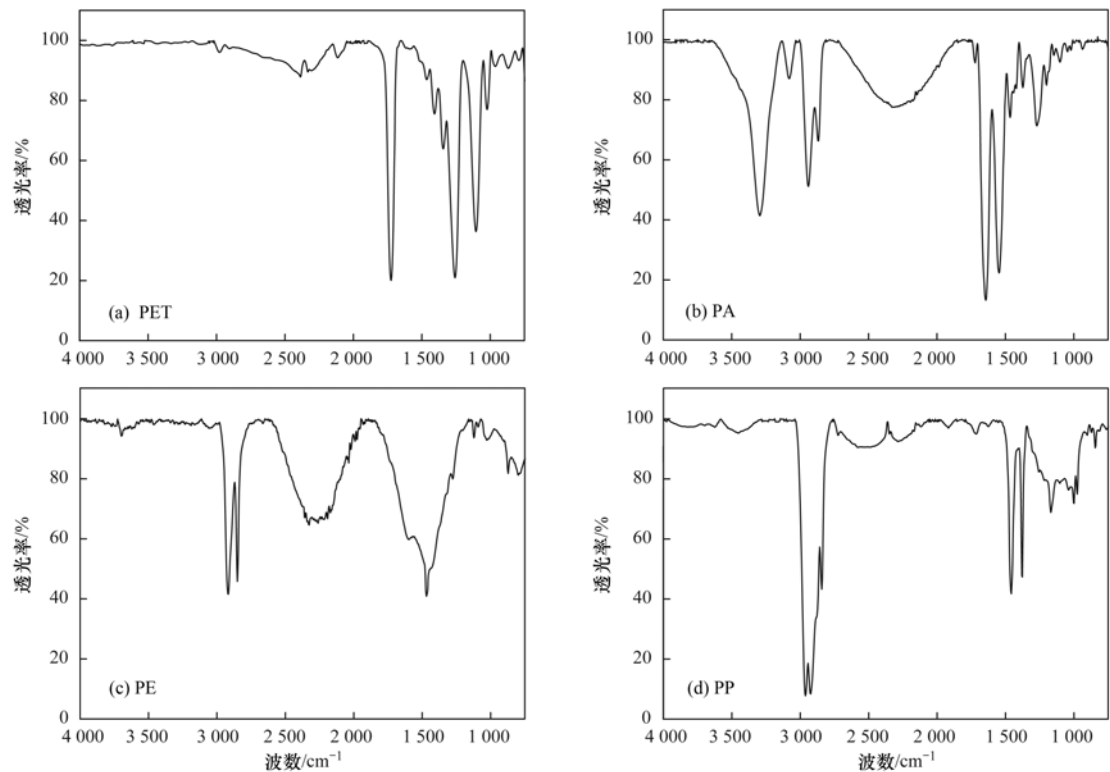


图3 MPs 红外谱图

Fig. 3 Infrared spectrogram of MPs

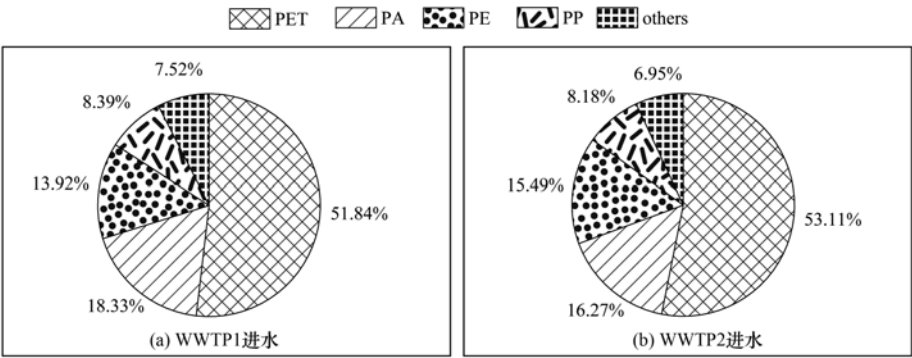


图4 WWTP1 和 WWTP2 进水中 MPs 类型占比

Fig. 4 Ratio of WWTP1 and WWTP2 influent MPs type

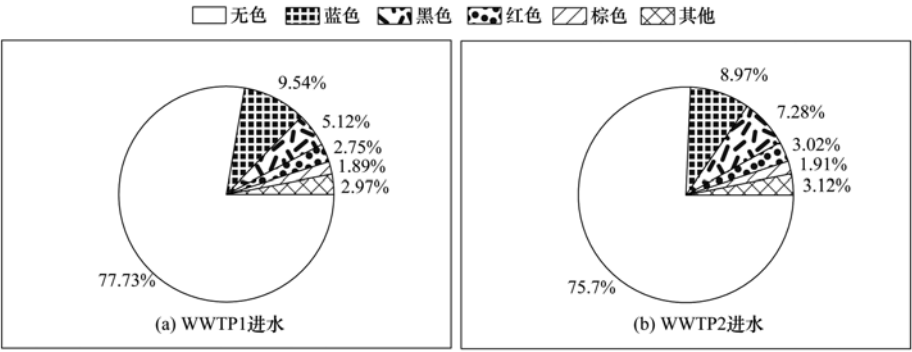


图5 WWTP1 和 WWTP2 进水中 MPs 颜色占比

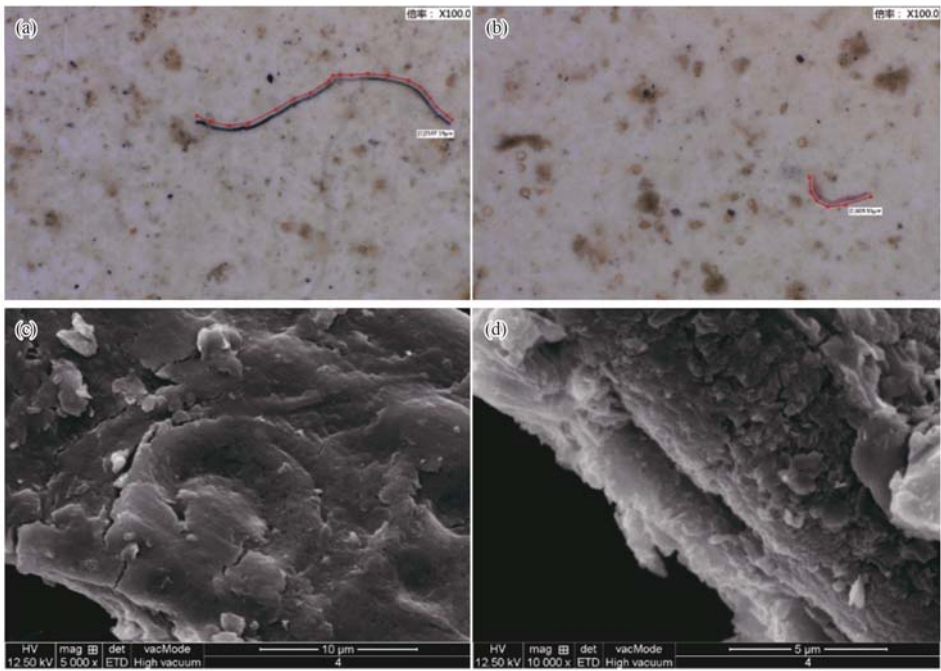
Fig. 5 Ratio of WWTP1 and WWTP2 influent MPs color

量,同时,污水中其他污染物的浓度远大于环境中含量,因此 MPs 的生态风险也随之增加. 另外,

MPs 表面的多孔结构也为细菌和真核生物的定植、扩散、营养循环和生物膜的形成提供了条件^[34]. 图

7 的数据显示,小粒径 MPs 占比较大. 两个污水处理厂不同粒径 MPs 占比的均值为:80 ~ 500 μm 占 55.15%, 500 ~ 1 000 μm 占 32.70%, 1 000 ~ 3 000 μm 占 10.52%, 3 000 ~ 5 000 μm 占 1.63%. 粒径大的 MPs 更容易被去除,同时大粒径的 MPs 还可

能在外力的作用下分解成较小的 MPs^[35], 因此粒径越小数量越多. 微小的塑料颗粒可能对水生生物构成潜在的威胁,它们与沉积物或部分浮游生物的尺寸相似,被水生生物认为是可利用的,继而被误食,并由此通过食物链进行传播^[36].



(a)和(b)高速摄像仪拍摄的 MPs 照片;(c)和(d)环境扫描电子显微镜拍摄的 MPs 表面照片

图 6 MPs 照片

Fig. 6 MPs photographs

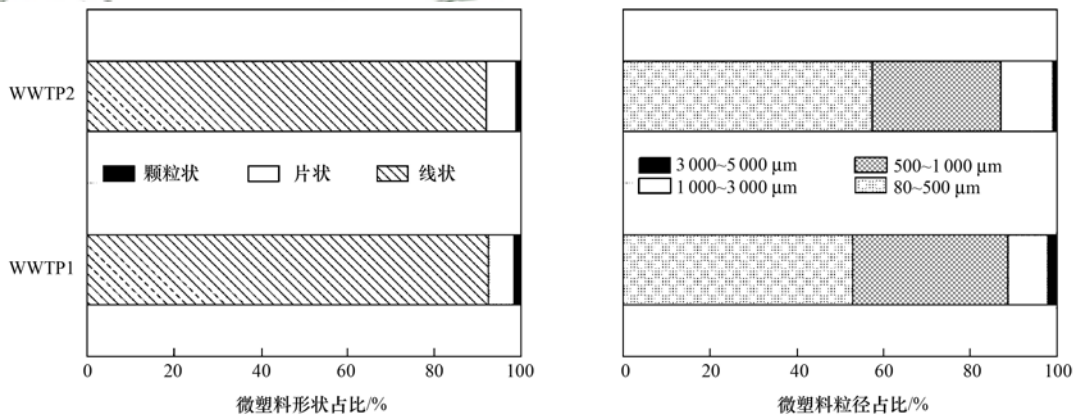


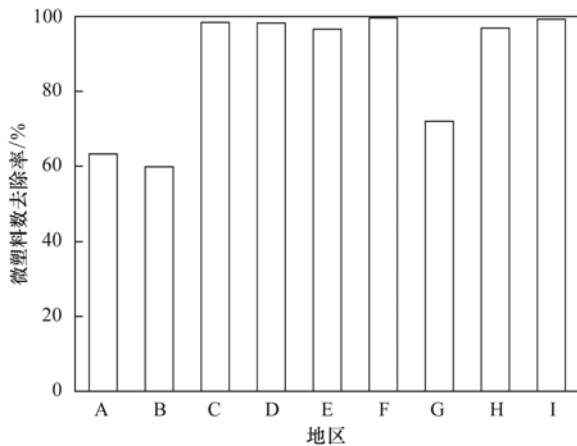
图 7 WWTP1 和 WWTP2 进水 MPs 形状和粒径占比

Fig. 7 Ratio of WWTP1 and WWTP2 influent MPs shape and particle size

2.2 污水处理厂不同工艺对 MPs 的去除

当前污水处理系统主要是针对水体中的常规污染物(如氮和磷等)的去除,并不是为去除 MPs 专门设计的^[32]. 本研究中 WWTP1 和 WWTP2 对 MPs 的去除率分别为 63.25% 和 59.84%. 根据已有的数据统计^[15, 24~26, 32, 37, 38](图 8),我国污水处理厂对 MPs 的处理效率偏低,欧洲地区污水处理厂的处理效率基本在 90% 以上.

图 9 的数据显示, MPs 的去除主要依靠一级处理工艺,这与国外相关的报道一致^[16]. 一级处理通常是采用过滤、沉淀和曝气等方式去除悬浮物^[33],从本质上来说, MPs 也属于悬浮物,因此一级处理处理工艺对 MPs 有较好的处理效果. WWTP1 在一级处理工艺中去除了 49.72% 的 MPs,而 WWTP2 去除了 46.48% 的 MPs, WWTP1 和 WWTP2 的一级处理工艺对整个污水处理厂 MPs 去除的贡献分别



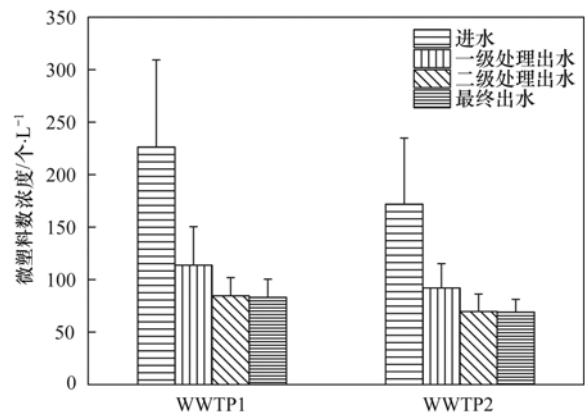
A 表示中国上海 WWTP1 (本研究); B 表示中国上海 WWTP2 (本研究); C 表示英国^[15]; D 表示芬兰^[24]; E 表示美国^[25]; F 表示德国^[26]; G 表示荷兰^[32]; H 表示俄罗斯^[37]; I 表示丹麦^[38]

图8 各地区污水处理厂对 MPs 的去除率

Fig. 8 Removal rate of MPs in municipal wastewater treatment plants in different areas

为 79.37% 和 75.77%，WWTP1 一级处理的效率和贡献均大于 WWTP2，是因为 WWTP1 沉砂池后设置有沉淀池能够使 MPs 进行第二次沉淀，在一定程度上提高了 MPs 的去除率。WWTP2 沉砂池的水力停留时间(4.6 min)大于 WWTP1 沉砂池的水力停留时间(1 min)，但整体的去除率并没有因为水力停留时间增加而增大。MPs 的去除率可能还会受到构筑物结构、工艺类型及其他条件的影响。二级处理对 MPs 的去除也主要集中在生物池后的二沉池，但该阶段对 MPs 的去除率要低于第一阶段，WWTP1 和 WWTP2 的处理效率分别为 12.92% 和 13.02%，他们对整个污水处理厂去除 MPs 的贡献率约为 20%。三级处理是在二级处理的基础上进一步去除污水中的 BOD、氮、磷、溶解性物和细菌的技术，而本研究中的两个污水处理厂均采用紫外消毒法去除水体中的病菌，对 MPs 的去除率几乎为零。

WWTP1 和 WWTP2 直排进入长江口，其出水中 MPs 的数浓度分别为 (83.16 ± 17.22) 个·L⁻¹ 和



WWTP1 的一级处理工艺包括格栅、旋流沉砂池和初沉池，二级处理工艺包括 A²O 和二沉池，三级处理工艺包括紫外消毒渠；WWTP2 的一级处理工艺包括格栅和曝气沉砂池，二级处理工艺包括 A/O 和二沉池，三级处理工艺包括紫外消毒渠

图9 WWTP1 和 WWTP2 进水、出水中 MPs 的数浓度

Fig. 9 Number concentration of MPs in inlet and outlet water of WWTP1 and WWTP2

(69.03 ± 12.21) 个·L⁻¹，其 PLI 分别为 407.82 和 371.56。对比 Zhao 等^[39] 对长江口 MPs 的监测数据，基于同样的计算方法[公式(1)和(2)]，长江口表层水体的 PLI 为 90.96，因此 WWTP1 和 WWTP2 的 PLI 值远大于长江口表层水体的 PLI 值。并且，由于污水处理厂出水持续不断，从年排量来说，由 MPs 排放带来的水体生态风险可能是持续累积的。

2.3 污水处理厂中 MPs 的归趋

从工艺流程的角度来说，污水处理厂处理后的 MPs 最终归宿为污水和污泥^[40]。从检测数据计算可知，一级处理过程中有 $48.10\% \pm 1.62\%$ 的 MPs 被格栅和沉砂池拦截到污泥中；二级处理过程中有 $12.97\% \pm 0.05\%$ 的 MPs 转移到污泥中。污水中的 MPs 经污水处理厂处理后， $38.82\% \pm 1.55\%$ 的 MPs 随出水进入到自然水体， $61.18\% \pm 1.55\%$ 的 MPs 进入到污泥中(图 10)。以本研究中进水 MPs 的数浓度、去除率，以及两个污水处理厂处理污水量为基础，对这两个大型污水处理厂排入水体中 MPs 的总量进行估算，每天约有 3.06×10^{11} 个 MPs

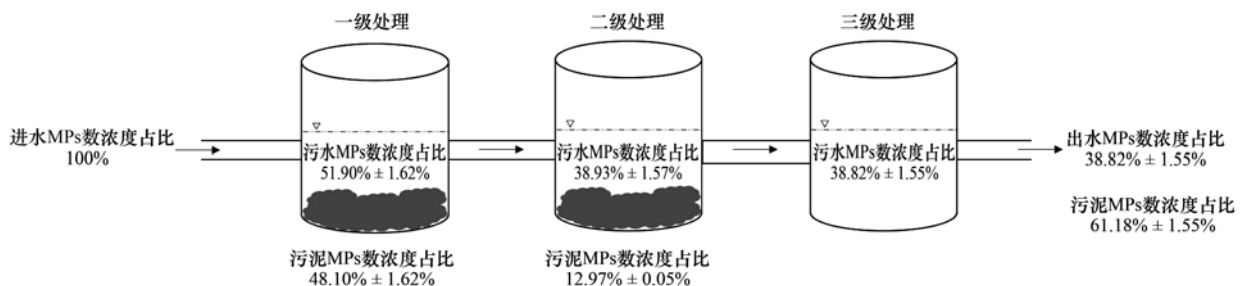


图10 污水处理厂中 MPs 的归趋

Fig. 10 Fate of MPs in municipal wastewater treatment plants

颗粒被释放到水体中。大量的 MPs 排入到受纳水体后, 会对受纳水体造成巨大的冲击, 甚至会造成该区域微生物群落的改变^[41]。这些 MPs 不仅会对该区域造成影响, 它们会随水流继续流动, 最终汇入海洋, 对整个生态系统产生不利影响。

此外, 同时需要指出的是, MPs 会在处理过程中发生变化, 如个体的再次碎化, 可能会对 MPs 的环境归趋分析造成影响。但部分研究证实 MPs 在水力过程中并不容易发生变化, 比如 Dris 等^[40]对管道传输过程 MPs 的分析表明, MPs 在 48 ~ 72 h 水力过程条件下基本不发生变化。然而, 污水处理厂工段的水力停留时间远小于管道, 因而在处理过程中 MPs 自身的变化对其归趋分析造成的影响可能是较小的, 其不确定性在可接受范围内。

3 结论

(1) 上海市两污水处理厂存在大量的 MPs, 进水中 MPs 的平均数浓度为 (199.08 ± 22.97) 个 $\cdot$ L⁻¹, 以 PET、PA、PE 和 PP 为主, 其中 PET 占 50% 以上。

(2) 本研究中污水处理厂对粒径在 80 ~ 5 000 μ m 的 MPs 颗粒的去除率约为 60%, 一级处理工艺对 MPs 的去除起主要作用, 对整个处理工艺去除 MPs 的贡献率可达 70% ~ 80%。

(3) 经污水处理厂处理后, 约有 40% 的 MPs 进入到自然水体。

(4) 上海市污水处理厂对 MPs 的处理效率较低, 处理后仍有大量的 MPs 排入到水体中, 污水处理厂中 MPs 的问题应引起重视。

参考文献:

- [1] Andrady A L. Microplastics in the marine environment [J]. Marine Pollution Bulletin, 2011, **62**(8): 1596-1605.
- [2] Plastics-the Facts 2018. An analysis of European plastics production, demand and waste data[M]. PlasticsEurope, 2018.
- [3] Cole M, Lindeque P, Halsband C, et al. Microplastics as contaminants in the marine environment: a review [J]. Marine Pollution Bulletin, 2011, **62**(12): 2588-2597.
- [4] Eerkes-Medrano D, Thompson R C, Aldridge D C. Microplastics in freshwater systems: a review of the emerging threats, identification of knowledge gaps and prioritisation of research needs [J]. Water Research, 2015, **75**: 63-82.
- [5] Eriksen M, Mason S, Wilson S, et al. Microplastic pollution in the surface waters of the Laurentian Great Lakes [J]. Marine Pollution Bulletin, 2013, **77**(1-2): 177-182.
- [6] Free C M, Jensen O P, Mason S A, et al. High-levels of microplastic pollution in a large, remote, mountain lake [J]. Marine Pollution Bulletin, 2014, **85**(1): 156-163.
- [7] McCormick A, Hoellein T J, Mason S A, et al. Microplastic is an abundant and distinct microbial habitat in an urban river [J]. Environmental Science & Technology, 2014, **48**(20): 11863-11871.
- [8] Thompson R C, Olsen Y, Mitchell R P, et al. Lost at sea: where is all the plastic? [J]. Science, 2004, **304**(5672): 838.
- [9] Yonkos L T, Friedel E A, Perez-Reyes A C, et al. Microplastics in four estuarine rivers in the Chesapeake Bay, U. S. A. [J]. Environmental Science & Technology, 2014, **48**(24): 14195-14202.
- [10] Bakir A, Rowland S J, Thompson R C. Transport of persistent organic pollutants by microplastics in estuarine conditions [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2014, **140**: 14-21.
- [11] Nakashima E, Isobe A, Kako S, et al. Quantification of toxic metals derived from macroplastic litter on Oookushi Beach, Japan [J]. Environmental Science & Technology, 2012, **46**(18): 10099-10105.
- [12] Cole M, Lindeque P, Fileman E, et al. Microplastic ingestion by zooplankton [J]. Environmental Science & Technology, 2013, **47**(12): 6646-6655.
- [13] Von Moos N, Burkhardt-Holm P, Köhler A. Uptake and effects of microplastics on cells and tissue of the blue mussel *Mytilus edulis* L. after an experimental exposure [J]. Environmental Science & Technology, 2012, **46**(20): 11327-11335.
- [14] Sutherland W J, Clout M, Côté I M, et al. A horizon scan of global conservation issues for 2010 [J]. Trends in Ecology & Evolution, 2010, **25**(1): 1-7.
- [15] Murphy F, Ewins C, Carbonnier F, et al. Wastewater treatment works (WwTW) as a source of microplastics in the aquatic environment [J]. Environmental Science & Technology, 2016, **50**(11): 5800-5808.
- [16] Talvitie J, Mikola A, Setälä O, et al. How well is microlitter purified from wastewater? -A detailed study on the stepwise removal of microlitter in a tertiary level wastewater treatment plant [J]. Water Research, 2017, **109**: 164-172.
- [17] Wang W F, Yuan W K, Chen Y L, et al. Microplastics in surface waters of Dongting Lake and Hong Lake, China [J]. Science of the Total Environment, 2018, **633**: 539-545.
- [18] Ziajahromi S, Neale P A, Leusch F D L. Wastewater treatment plant effluent as a source of microplastics: review of the fate, chemical interactions and potential risks to aquatic organisms [J]. Water Science and Technology, 2016, **74**(10): 2253-2269.
- [19] Zhang K, Shi H H, Peng J P, et al. Microplastic pollution in China's inland water systems: A review of findings, methods, characteristics, effects, and management [J]. Science of the Total Environment, 2018, **630**: 1641-1653.
- [20] Hidalgo-Ruz V, Gutow L, Thompson R C, et al. Microplastics in the marine environment: a review of the methods used for identification and quantification [J]. Environmental Science & Technology, 2012, **46**(6): 3060-3075.
- [21] Chae D H, Kim I S, Kim S K, et al. Abundance and distribution characteristics of microplastics in surface seawaters of the Incheon/Kyeonggi Coastal Region [J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2015, **69**(3): 269-278.
- [22] Xu P, Peng G Y, Su L, et al. Microplastic risk assessment in surface waters: a case study in the Changjiang Estuary, China [J]. Marine Pollution Bulletin, 2018, **133**: 647-654.
- [23] Gündoğdu S, Çevik C, Güzel E, et al. Microplastics in municipal wastewater treatment plants in turkey: a comparison of the influent and secondary effluent concentrations [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2018, **190**(11): 626.

- [24] Lares M, Ncibi M C, Sillanpää M, *et al.* Occurrence, identification and removal of microplastic particles and fibers in conventional activated sludge process and advanced MBR technology[J]. *Water Research*, 2018, **133**: 236-246.
- [25] Michielssen M R, Michielssen E R, Ni J, *et al.* Fate of microplastics and other small anthropogenic litter (SAL) in wastewater treatment plants depends on unit processes employed [J]. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 2016, **2**(6): 1064-1073.
- [26] Mintenig S M, Int-Veen I, Löder M G J, *et al.* Identification of microplastic in effluents of waste water treatment plants using focal plane array-based micro-Fourier-transform infrared imaging [J]. *Water Research*, 2017, **108**: 365-372.
- [27] Ziajahromi S, Neale P A, Rintoul L, *et al.* Wastewater treatment plants as a pathway for microplastics: development of a new approach to sample wastewater-based microplastics [J]. *Water Research*, 2017, **112**: 93-99.
- [28] Pirc U, Vidmar M, Mozer A, *et al.* Emissions of microplastic fibers from microfiber fleece during domestic washing [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, **23**(21): 22206-22211.
- [29] Boerger C M, Lattin G L, Moore S L, *et al.* Plastic ingestion by planktivorous fishes in the North Pacific Central Gyre[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2010, **60**(12): 2275-2278.
- [30] Moore C J. Synthetic polymers in the marine environment: A rapidly increasing, long-term threat [J]. *Environmental Research*, 2008, **108**(2): 131-139.
- [31] Saron C, Felisberti M I. Influence of colorants on the degradation and stabilization of polymers[J]. *Química Nova*, 2006, **29**(1): 124-128.
- [32] Leslie H A, Brandsma S H, Van Velzen M J M, *et al.* Microplastics en route: Field measurements in the Dutch River delta and Amsterdam canals, wastewater treatment plants, North Sea sediments and biota[J]. *Environment International*, 2017, **101**: 133-142.
- [33] Mason S A, Garneau D, Sutton R, *et al.* Microplastic pollution is widely detected in US municipal wastewater treatment plant effluent[J]. *Environmental Pollution*, 2016, **218**: 1045-1054.
- [34] Mincer T J, Zettler E R, Amaral-Zettler L A. Biofilms on plastic debris and their influence on marine nutrient cycling, productivity, and hazardous chemical mobility[A]. In: Takada H, Karapanagioti H K (Eds.). *Hazardous Chemicals Associated with Plastics in the Marine Environment*[M]. Cham: Springer, 2016. 221-233.
- [35] Zhang K, Gong W, Lv J Z, *et al.* Accumulation of floating microplastics behind the Three Gorges Dam[J]. *Environmental Pollution*, 2015, **204**: 117-123.
- [36] Cole M, Lindeque P, Fileman E, *et al.* The impact of polystyrene microplastics on feeding, function and fecundity in the marine copepod *Calanus helgolandicus* [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(2): 1130-1137.
- [37] Cesa F S, Turra A, Baroque-Ramos J. Synthetic fibers as microplastics in the marine environment: a review from textile perspective with a focus on domestic washings[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **598**: 1116-1129.
- [38] Simon M, Van Alst N, Vollertsen J. Quantification of microplastic mass and removal rates at wastewater treatment plants applying Focal Plane Array (FPA)-based Fourier Transform Infrared (FT-IR) imaging[J]. *Water Research*, 2018, **142**: 1-9.
- [39] Zhao S Y, Zhu L X, Wang T, *et al.* Suspended microplastics in the surface water of the Yangtze estuary system, China: First observations on occurrence, distribution[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, **86**(1-2): 562-568.
- [40] Dris R, Gasperi J, Rocher V, *et al.* Microplastic contamination in an urban area: a case study in Greater Paris [J]. *Environmental Chemistry*, 2015, **12**(5): 592-599.
- [41] Eckert E M, Di Cesare A, Kettner M T, *et al.* Microplastics increase impact of treated wastewater on freshwater microbial community[J]. *Environmental Pollution*, 2018, **234**: 495-502.

CONTENTS

Size Distributions of Different Carbonaceous Components in Ambient Aerosols	DU Xiang, ZHAO Pu-sheng, DONG Qun, <i>et al.</i> (3849)
Analysis of Air Pollution Characteristics and Meteorological Conditions in Zhengzhou from 2014 to 2017	GUO Meng-meng, JIANG Nan, WANG Shen-bo, <i>et al.</i> (3856)
Characteristics of Atmospheric PM _{2.5} Pollution and Its Influence on Visibility in Background Areas of Ji'nan	BIE Shu-jun, YANG Ling-xiao, GAO Ying, <i>et al.</i> (3868)
Source Analysis and Health Risk Assessment of PAHs in PM _{2.5} During Winter in Liaocheng City	LIU Xiao-di, HOU Zhan-fang, MENG Jing-jing, <i>et al.</i> (3875)
Temporal-Spatial Characteristics and Variability in Aerosol Optical Depth over China During 2001-2017	LIU Hai-zhi, GUO Hai-yan, MA Zhen-feng, <i>et al.</i> (3886)
Spatial-Temporal Distribution of Absorptive Aerosols in the Yangtze River Delta	ZHAO Nan, CAO Fan-shi, TIAN Qing, <i>et al.</i> (3898)
Emission Characteristics of Chemical Composition of Particulate Matter from Coal-fired Boilers	YANG Yan-rong, ZHOU Xue-ming, QIN Juan-juan, <i>et al.</i> (3908)
Pollution Characteristics of Heavy Metals in PM _{2.5} Near Highway	LI Xiao-bao, LIAO Zu-wen, ZHAO Hong, <i>et al.</i> (3916)
Pollution Characteristics and Potential Ecological Risks of Heavy Metals in Road Dust in Beijing	HU Yue-qi, GUO Jian-hui, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (3924)
Application of Test Method for Dust Suppression Efficiency of Wind Erosion Dust Suppressant	QIN Jian-ping, LI Bei-bei, YANG Tao, <i>et al.</i> (3935)
Emission Characteristics and Ozone Formation Potential of VOCs in Printing Enterprises in Beijing-Tianjin-Hebei	LIU Wen-wen, FANG Li, GUO Xiu-rui, <i>et al.</i> (3942)
Source Profiles of VOCs Associated with Typical Industrial Processes in Chengdu	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, WU Ke-ying, <i>et al.</i> (3949)
Characterization and Health Risk Assessment of Exposure to Odorous Pollutants Emitted from Industrial Odor Sources	MENG Jie, ZHAI Zeng-xiu, JING Bo-yu, <i>et al.</i> (3962)
Analysis of HONO Concentration and Source in Typical Rural Area of North China	WANG Yu-zheng, XUE Chao-yang, ZHANG Cheng-long, <i>et al.</i> (3973)
CO-SCR Performance and Mechanism over Co ₃ O ₄ Catalysts	ZHONG Xue-mei, ZHANG Tao, LI Jia-yin, <i>et al.</i> (3982)
Pollution Characteristics of Perfluorinated Alkyl Substances (PFASs) in Seawater, Sediments, and Biological Samples from Jiaozhou Bay, China	 CUI Wen-jie, PENG Ji-xing, TAN Zhi-jun, <i>et al.</i> (3990)
Occurrence and Influencing Factors of Odorous Compounds in Reservoirs Used as Drinking Water Resources in Jiangsu Province	 SHI Peng-cheng, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (4000)
Fluorescence Characteristics and Influencing Factors of Dissolved Organic Matter (DOM) in Water and Sediment of Urban Watershed: A Case Study of Xiaojia River in Ningbo City	 GAO Feng, SHAO Mei-ling, TANG Jian-feng, <i>et al.</i> (4009)
Water Bloom Modified Sediment Nitrogen Transformation and Removal	 XIAO Lin, YANG Jia-yi (4018)
Applicability of Bioavailable Phosphorus in Sediments to Indicating Trophic Levels of Lakes and Reservoirs	LIU Hui, HU Lin-na, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> (4023)
Analysis of Nitrate Pollution Sources in the Rainy Season of the Lower Fenhe River	WANG Yin-long, FENG Min-quan, DONG Xiang-qian (4033)
Hydrochemical Characteristics and Evolution of Groundwater in the Kashgar Delta Area in Xinjiang	WEI Xing, ZHOU Jin-long, NAI Wei-hua, <i>et al.</i> (4042)
Community Diversity of Eukaryotic Nano-phytoplankton in Yellow Sea Using DNA Metabarcoding Technology Based on Multiple Amplicons	 ZHANG Li, ZHANG Yuan, LIN Jia-ning, <i>et al.</i> (4052)
Comparison of Functional Groups of Phytoplankton in FG, MFG, and MBFG; Taking Three Reservoirs as an Example in Guizhou Plateau	CHEN Qian, LI Qiu-hua, MA Xin-yang, <i>et al.</i> (4061)
Adsorption and Mechanism of Arsenic by Natural Iron-containing Minerals	SHAO Jin-qiu, WEN Qi-qian, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (4072)
Removal of Pb ²⁺ from Aqueous Solution by Magnesium-Calcium Hydroxyapatite Adsorbent	HE Hao, ZHU Zong-qiang, LIU Jie, <i>et al.</i> (4081)
Intensified Electrosorption of Pb ²⁺ by 2,6-diaminoanthraquinone/Graphene Composite Electrode	JIN Sheng-yao, XIANG Yang, ZHANG Jun-yu, <i>et al.</i> (4091)
Experiment on Recovery of Phosphorus from Aqueous Solution by Calcium Doped Fe ₃ O ₄	BAI Run-ying, LIU Jian-ming, HAO Jin-feng, <i>et al.</i> (4098)
Removal of Microplastics by Different Treatment Processes in Shanghai Large Municipal Wastewater Treatment Plants	JIA Qi-long, CHEN Hao, ZHAO Xin, <i>et al.</i> (4105)
Enhanced Nutrient Removal and Microbial Community Structure in a Step-feed A ² /O Process Treating Low-C/N Municipal Wastewater	RONG Yi, LIU Xiao-chai, HE Yin-xuan, <i>et al.</i> (4113)
Performances Analysis of an Upflow Anaerobic Filter for Domestic Sewage Treatment	YANG Zhong-qi, LIU Xiu-hong, LI Hai-xin, <i>et al.</i> (4121)
Electron Equilibrium Analysis of Integrated Autotrophic and Heterotrophic Denitrification Process Under Micro-aerobic Conditions	ZHANG Ruo-chen, CHEN Chuan, SHAO Bo, <i>et al.</i> (4128)
Pilot Study on Start-up and Stable Operation at Low Temperature Based on Denitrifying Phosphorus Removal	ZHANG Fan, YU De-shuang, LIU Jie, <i>et al.</i> (4136)
Comparison of Polycaprolactone and Poly-3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate for Nitrogen Removal	YI Cheng-hao, QIN Wei, CHEN Zhan, <i>et al.</i> (4143)
Rapid Cultivation of Anaerobic Ammonium Oxidation Granular Sludge and Inhibition Kinetics of Granular Sludge	TANG Peng, YU De-shuang, CHEN Guang-hui, <i>et al.</i> (4152)
Effect of Ca ²⁺ on the Nitrification Activity and the Flocculation and Sedimentation Performances of the Activated Sludge	ZHANG Lan-he, ZHAO Qian-nan, ZHANG Hai-feng, <i>et al.</i> (4160)
Recovery of Phosphorus in the Form of Struvite from the Anaerobic Fermentation Supernatant of Excess Sludge	CHANG Xiao, ZENG Wei, WANG Bao-gui, <i>et al.</i> (4169)
Effect of Signal Molecule Combined with <i>Thiobacillus denitrificans</i> on Simultaneous Removal of Nitrogen and Sulfur	XU Jin-lan, CHEN Zi-wei, ZHANG Shao-feng, <i>et al.</i> (4177)
Bacterial Community Composition in Channel Sediment in Response to Mariculture Wastewater Drainage	HU Yue-hang, XUAN Li-xia, QIU Qiong-fen (4185)
Setup and Microbial Community Analysis of ANAMMOX System for Landfill Leachate Treatment Coupling Partial Nitrification-Denitrification Process	 ZHAO Qing, LIU Meng-ying, LÜ Hui, <i>et al.</i> (4195)
Effects of Rice Straw Addition on Methanogenic Archaea and Bacteria in Two Paddy Soils	BAO Qiong-li, WANG Feng-hua, BAO Wan-kui, <i>et al.</i> (4202)
Effect of Plastic Film Mulching on Greenhouse Gas Emissions from Rice-Rapeseed Rotation in Cropland	CHEN Shi-jie, JIANG Chang-sheng, NI Xue, <i>et al.</i> (4213)
N ₂ O Emissions from a Tea Field with Deep Application of Nitrogen Fertilizer and Intercropping with White Clover	LÜ Tian-xin, WU Yan-zheng, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (4221)
Distribution and Emission of Nitrous Oxide (N ₂ O) in Three Gorges Reservoir and Downstream River	CHENG Fang, DING Shuai, LIU Su-mei, <i>et al.</i> (4230)
Synergy of Algal Sedimentation and Sediment Capping for Methane Emission Control in Bloom Waters	ZHU Lin, YU Jiang-hua, SHI Wen-qing, <i>et al.</i> (4238)
Impact of Newly Build Lead-Acid Battery Agglomeration Area on the Surrounding Soil Environment: A Study Based on the Spatial Characteristics of Heavy Metals	 DING Ya-li, LIAO Min, FANG Zhi-ping, <i>et al.</i> (4244)
Effects of Amendments with Different C/N/P Ratios on Plant and Soil Properties of a Pb-Zn Mine Tailings	YANG Sheng-xiang, LI Feng-mei, PENG Xi-zhu, <i>et al.</i> (4253)
Derivation of the Thresholds of Available Concentrations of Heavy Metals in Soil Based on Agricultural Product Safety	ZHANG Yun-hui, DU Ping, HE Ying, <i>et al.</i> (4262)
Content of Soil Phytolith-Occcluded Organic Carbon in Different Land Use Patterns at Jinyun Mountain	LUO Dong-hai, WANG Zi-fang, LU Chang, <i>et al.</i> (4270)
Influence of Land Use Change on Litter and Soil C, N, P Stoichiometric Characteristics and Soil Enzyme Activity in Karst Ecosystem, Southwest China	 TIAN Jing, SHENG Mao-yin, WANG Pan, <i>et al.</i> (4278)
Effect of Conditioning Agent Combined with Flooding Measures on Absorption and Accumulation of Cadmium in Rice	PENG Ou, LIU Yu-ling, TIE Bai-qing, <i>et al.</i> (4287)
Distribution and Sources of OPEs in Plants and Snow in Hailuoguo	CHEN Yang, YIN Hong-ling, WU Di, <i>et al.</i> (4295)