

述评与讨论

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.16.004

中国水环境微塑料污染及水处理工艺对其去除效果

吴君怡, 张燕, 李宁远, 封黎扬, 方瑜媛
(浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310058)

摘 要: 随着近年来公众对塑料垃圾问题的热议,微塑料污染亦得到更多关注,国内有关微塑料水体污染研究逐年增多。为全面了解国内水环境中微塑料污染现状和传统水处理工艺对微塑料的去除效果,对国内水体微塑料污染相关研究进行收集整理。结果显示,目前国内水环境普遍受到微塑料污染,淡水系统较近海海域的污染更重,水源水的污染现状亦不容乐观。而污水厂无法实现对污水中微塑料的完整截留因而不加剧受纳水体的污染情况,国内给水厂对微塑料的去除效果研究较少。如何控制污水厂的点源污染以及给水厂能否实现对微塑料的高度净化以保障饮用水卫生安全已成为当下刻不容缓的研究议题。通过分析不同水处理工艺对微塑料的去除效果,探讨了微塑料去除技术的发展趋势,为国内水体微塑料污染研究的发展提供参考。

关键词: 微塑料; 水环境; 污水厂; 给水厂

中图分类号: TU99 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)16-0017-07

Microplastic Pollution in China Water Environment and the Effect of Water Treatment Process on Microplastics Removal

WU Jun-yi, ZHANG Yan, LI Ning-yuan, FENG Li-yang, FANG Yu-yuan
(College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: With the public's hot discussion on plastic waste problem in recent years, microplastic pollution also has received more attention, and domestic research on microplastic water pollution has increased year by year. For a comprehensive understanding the current situation of microplastic pollution in domestic water environment and the removal effect of traditional water treatment technology on microplastic, the related research on microplastics pollution in domestic water was collected and sorted out. The results showed that the domestic water environment is generally polluted by microplastics at present, and the pollution of fresh water system is more serious than that of offshore sea area, and the pollution of source water is also not optimistic. However, the sewage treatment plant cannot realize the complete interception of the microplastic in the sewage and thus continuously aggravate the pollution situation of the receiving waterbody, and the removal effect of drinking water treatment plant on the microplastic is lack of case studies. How to control the point source pollution of sewage treatment plant and whether the drinking water treatment plant can realize the high purification of microplastic to ensure the safety of drinking water has become urgent research topics. By analyzing the removal effect of

different water treatment processes on microplastic, the development trend of microplastic removal technology was discussed, which could provide a reference for the development of water microplastic pollution research in China.

Key words: microplastic; water environment; sewage treatment plant; drinking water treatment plant

微塑料是指一种粒径 $<5\text{ mm}$ 的塑料颗粒,因其易吸附水体中其他有机污染物,同时本身含有的添加剂可能释放而引起水体污染,对人类存在潜在的健康威胁。我国是塑料的生产和消费大国,对水环境造成了严重的微塑料污染负担。因此,亟需对国内水环境中的微塑料污染现状及水处理工艺对其去除效率进行评估,尽早制定有效的治理和减排策略,以保障水生态健康与饮用水安全。

虽然我国水体微塑料污染研究逐年增多,但仍缺少对其做出全面的总结和评价,更缺少对国内水处理工艺去除微塑料效果的分析。因此,通过梳理有关国内不同水环境中微塑料污染方面的文献,对我国水环境微塑料污染现状进行总结,并分析国内外污水厂及给水厂对微塑料的去除能力。在此基础上,探讨了提高微塑料去除能力的水处理技术发展趋势。

1 我国水环境中微塑料污染现状

1.1 地区间的污染差异

我国水环境微塑料污染研究多集中于长江流域的河流湖泊与沿海城市的入海口及近海岸带,自然水体中普遍存在微塑料污染,且沿海发达地区与西部高原地区的污染水平有一定差距。现有的数据表明,广州市珠江城市河段的微塑料含量在表层水中可达 $53\ 250\text{ 个}/\text{m}^3$ ^[1],比同为城市河段的武汉市汉江及扬子江^[2]高一个数量级。香港特区河流表层水调查中因检测粒径下限设定为较高的 $355\ \mu\text{m}$,使微塑料含量的检测结果最大值仅为 $14.015\text{ 个}/\text{m}^3$ ^[3]。高海拔且人口密度较低的青藏高原河流^[4]中亦发现一定量的微塑料,其河流表层水中微塑料平均值为 $694.5\text{ 个}/\text{m}^3$,远小于珠江河段,但比沿海长江河口表层水(检测粒径范围相近)的检测结果大4倍。造成这种现象的原因可能为偏远地区污(废)水处理设施不完善,使生活污水和生活垃圾未经合理处理和处置直接进入自然水体。因此,不同地区水环境中的微塑料污染可能受当地人口密度、经济结构以及废弃物管理制度等因素影响而产

生差异。

1.2 水体间的污染差异

研究表明,微塑料污染在不同水体间亦存在差异,对国内不同水体中微塑料含量检测结果的分布范围和中位数^[1-19]进行了进一步梳理,结果如图1所示。

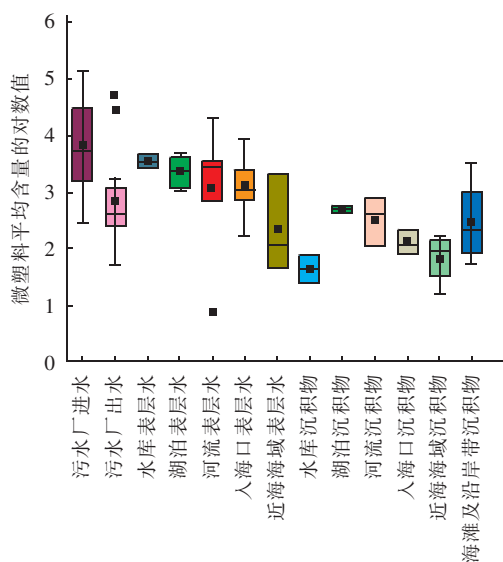


图1 国内不同水体微塑料含量检测结果的分布范围和中位数

Fig.1 Distribution range and median of microplastic content in different water samples in China

由图1可知,从中位数来看,表层水中,水库、湖泊与河流微塑料含量 $>$ 入海口 $>$ 近海海域;沉积物中,湖泊与河流微塑料含量 $>$ 海滩沿岸带 $>$ 入海口 $>$ 近海海域 $>$ 水库,且城市湖泊的微塑料含量均大于其城市段河流^[2,5]。由此推测,我国淡水环境微塑料污染程度可能比海洋环境更加严重,这可能是由于湖泊、河流以及海滩沿岸带在微塑料向海洋运输的过程中起到了阻滞作用。另外,淡水系统中水源水的微塑料污染情况亦不理想:太湖^[6]表层水中微塑料含量最高可达 $25\ 800\text{ 个}/\text{m}^3$,其浮游生物网样本中微塑料的含量比美国劳伦特五大湖^[7]高两个数量级;丹江口水库^[8]主体区域污染水平虽然

较低,但是在丹江口大坝和人口密集处的采样点调查结果依旧存在严重污染。水源水中微塑料的来源普遍为渔业、农业灌溉和人类活动产生的固体废弃物,因此饮用水水源地处的渔业、农业和观光旅游活动需严令禁止。

1.3 表层水与沉积物的污染相关性

微塑料在同一水体中的表层水和沉积物中分布状况一般具有一定相关性,青海湖^[9]表层水和沉积物最严重的污染点均出现在湖泊中心,湖泊河口处微塑料含量均为最低。但这种相关性并不是绝对的,鄱阳湖^[10]的表层水微塑料含量在湖中心最高,沉积物微塑料含量在北部湖水汇入扬子江的地方最高;三峡水库^[11]中城市地区表层水中的微塑料污染比农村地区严重,而农村地区沉积物中的微塑料污染程度大于城市地区。

水动力条件、源载荷、污染源距离、废弃物管理模式等皆为影响微塑料在表层水和沉积物中分布情况的因素,且微塑料的运输和沉降运动规律也受不同类型微塑料的影响,因此为评估和解释某一区域水环境中微塑料的分布,需要更多区域化的物质流分析和环境分区的详细信息,以进一步确定区域内塑料的运输路径和堆积模式。

1.4 微塑料污染的主要来源

水环境中微塑料的主要类型在一定程度上能够反映该塑料污染的来源。现有文献结果多数显示水环境中微塑料的主要成分为PP与PE,主要形态为纤维状。PP与PE为包装和家用塑料的常用材料,而人造纤维的来源除了港口养殖业和渔业,更多来自生活污水中的服装纤维,我国洗涤和洗护过程中纤维微塑料和微珠等原生微塑料颗粒的水体排放量随着人民生活水平的提高呈现增加趋势。由此可推测,管理不当的塑料垃圾与污水厂排放的生活污水是水环境微塑料污染的重要来源。因此,推广可降解塑料的使用,实行垃圾分类提高塑料垃圾的回收率,以及提高污水厂对微塑料的去除能力对保护水环境免受微塑料污染侵害有着重要意义。

2 水处理工艺去除微塑料现状

2.1 国内外污水厂调查

提高污水厂对微塑料的去除能力已成为预防水环境微塑料污染的重要措施之一。目前,国外污水厂多数研究结果显示,二级以上污水处理工艺对微塑料的总去除率可达90%以上,而国内二级以上污水处理工艺对微塑料的总去除率为53.6%~99.5%,具体见表1。

表1 国内外污水厂对微塑料去除效果的研究

Tab.1 Researches on removal efficiency of microplastics by sewage treatment plants at home and abroad

项 目	污水处理工艺	检测粒径范围/ μm	进水(平均值)/ (个 $\cdot\text{L}^{-1}$)	出水(平均值)/ (个 $\cdot\text{L}^{-1}$)	去除率/%
中国北京再生水厂 ^[12]	曝气沉砂池+一级沉淀池+A/A/O+二级沉淀池+反硝化池/超滤/臭氧/紫外消毒	50~5 000	12.03 \pm 1.29	0.59 \pm 0.22	95
中国上海污水厂 ^[13]	三级处理	125~5 000	117	52	55.60
中国无锡污水厂 ^[14]	平行工艺系统A:曝气沉砂池+氧化沟+二沉池+紫外消毒	25~5 000	0.28 \pm 0.02 [质量浓度: (5.6 \pm 0.9) mg/L]	0.13 \pm 0.01 [质量浓度: (0.16 \pm 0.02) mg/L]	53.6 (质量浓度 去除率:97%)
	平行工艺系统B:旋流沉砂池+A/A/O+MBR	25~5 000	0.28 \pm 0.02 [质量浓度: (5.6 \pm 0.8) mg/L]	0.05 \pm 0.01 [质量浓度: (0.028 \pm 0.01) mg/L]	82.1 (质量浓度 去除率:99.5%)
中国武汉污水厂 ^[15]	曝气沉砂池+一级沉淀池+A/A/O+二级沉淀+氯化消毒	20~5 000	79.9	28.4	64.40
芬兰污水厂 ^[16]	沉砂池+化学处理+一级沉淀+曝气池+二级澄清池+生物活性滤池	20~5 000	(380 \pm 52.2)~ (686.7 \pm 155.0)	(0.7 \pm 0.6)~ (3.5 \pm 1.3)	99.90
苏格兰污水厂 ^[17]	沉砂池+一级沉淀+曝气池+澄清池	>65	15.7 \pm 5.23	0.25 \pm 0.04	98.41
丹麦10座污水厂 ^[18]	三级处理	10~500	7 216	54	99.30
意大利污水厂 ^[19]	沉砂池+生物处理+沉淀+砂滤+消毒	10~5 000	2.5 \pm 0.3	0.4 \pm 0.1	84

虽然不同污水厂因处理水量、水质和工艺组成皆不同而不能构成严谨的效果对比,但从总去除效率来看,国内较多污水厂总去除效率低于国外污水厂,而从最终出水的微塑料含量来看,国内污水厂与国外相当甚至更少。上海与武汉污水厂对微塑料的去除率较其他污水厂低的原因除了与污水的特性、来源有关,也可能受工艺的组成影响。为了明确我国污水厂在微塑料去除方面的改进方向,各级处理工艺所起到的微塑料去除作用值得深入分析。

预处理和一级处理阶段可通过格栅拦截、表层刮渣、沉砂(淀)过程实现对微塑料颗粒的有效去除,对纤维状微塑料的去除率可达92.1%^[20],而微珠类微塑料颗粒因成分多为PE,在水中受到较强的浮力,易附着在污水表层,故在刮渣时容易从表层撤去^[17]。国内污水厂的预处理和一级处理工艺对微塑料的总去除效率为40.7%~58.84%^[12,15]。二级处理工艺中,可通过活性污泥工艺与沉淀池或澄清池的联用,从而在污泥絮凝体的聚集沉降过程中实现对剩余微塑料的有效去除,去除率为15.0%~54.5%^[12,14-15]。三级处理工艺中的过滤过程则进一步去除小粒径微塑料颗粒和纤维状微塑料,尤其是膜生物反应器与生物活性滤池的应用,可实现最终去除率达99%以上^[14,16]。

另外,表1中无锡污水厂的去除率在数量统计与质量统计上有较大差异是因为部分污水处理工艺可能对微塑料具有碎化作用,如设置机械搅拌的旋流沉砂池、具有曝气作用的氧化沟与A/A/O工艺好氧段,以及消毒工艺。Lv等^[14]发现这些工艺的池水中小粒径的微塑料颗粒含量比进水中大幅增多,导致微塑料总数不减反增,同时可能产生更多粒径值低于检测限的微塑料^[14-15]。水处理工艺对微塑料的碎片化作用不仅影响微塑料检测工作的准确性,更加大了水体微塑料净化的难度,需采用成本较高的深度处理工艺实现对小粒径微塑料的高效去除,且若一、二级处理出水中产生大量小粒径微塑料絮凝体亦将加剧后续深度处理中超滤膜等的膜污染问题^[21]。

2.2 国内外饮用水及给水厂调查

给水厂的出水直接关系到人体与微塑料的接触水平,因此更需引起重视。目前国内外有关给水厂对微塑料去除效果的调查表明,给水处理工艺对1~5 000 μm 的微塑料颗粒的去除率可以达到80%

左右,20 μm 以上粒径的微塑料几乎未检出。但需要引起注意的是Schymanski等^[22]在多种瓶装水中均检出一定数量20 μm 以上粒径的微塑料,该结果与Cox等^[23]基于美国的饮食数据进行的微塑料摄入量保守估计的结果一致:每人每年仅以瓶装水作为饮用水时摄入微塑料颗粒的个数(9×10^4 个)远大于仅以自来水作为饮用水时的数量(4 000个)。因此,饮用自来水可能比瓶装水更能有效避免人体与微塑料的接触,但仍存在保守估计下的微量污染,饮用水中微塑料污染状况仍需更多研究补充。

根据相关文献对国内外污水厂及给水厂进出水中微塑料含量进行统计^[12-19,24-26],结果见图2。其中,给水厂案例较少,捷克和德国给水厂调查因选取的检测粒径下限值不同而使结果相差甚大,不适合合并展现国外给水厂进出水中微塑料含量分布范围和中位数,故分开单独展示。

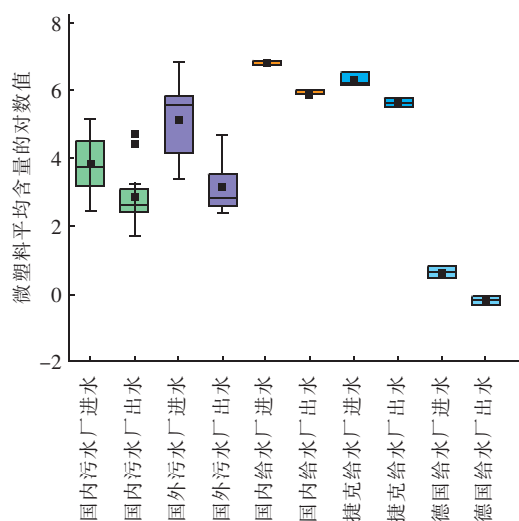


图2 国内外污水厂及给水厂进出水中微塑料含量分布范围和中位数

Fig. 2 Distribution range and median of microplastic content in influent and effluent of wastewater treatment plants and waterworks at home and abroad

图2中显示国内给水厂^[24]与捷克给水厂^[25]的进出水微塑料含量均与德国^[26]相差较大,甚至比污水厂更高,其原因是检测粒径下限值较低(国内与捷克调查设定下限值为1 μm ,德国设定下限值为20 μm),反映出给水厂出厂水中小粒径微塑料含量依旧较高,未能得到良好去除。国内给水厂在混凝沉淀阶段对粒径>10 μm 的微塑料基本实现完全去除,对粒径为1~10 μm 的微塑料去除率仅为

28.3%~47.5%^[24];捷克的3座给水厂对粒径>50 μm 的微塑料基本实现完全去除,而对粒径为10~50 μm 微塑料的去除率仅为45%~60%,且最终出厂水中95%以上的微塑料颗粒集中在1~10 μm 这一粒径范围^[25]。由此可见,给水厂的常规处理工艺对50 μm 以上粒径微塑料可实现高度净化,未来对微塑料的强化去除研究应聚焦于50 μm 以下的小粒径微塑料。

另外,捷克给水厂中DWTP1(混凝/絮凝+砂滤)对纤维状微塑料的去除率仅为25%,而DWTP2(混凝/絮凝+沉淀+炭砂滤池)和DWTP3(混凝/絮凝+气浮池+砂滤+颗粒活性炭滤池)的去除率可达80%~90%。这与国内给水厂调查中混凝沉淀对纤维状微塑料的去除率为50.7%~60.6%,颗粒活性炭滤池对纤维状微塑料的去除率为38%~52.1%,均高于砂滤池(30.9%~49.3%)的结果一致,表明沉淀、气浮与混凝工艺的联用以及颗粒活性炭滤池工艺的应用可能在纤维状微塑料去除方面起到重要作用,且混凝沉淀工艺主要起到去除大粒径(10 μm 以上)微塑料颗粒作用,而颗粒活性炭滤池主要去除小粒径(1~10 μm)微塑料颗粒。目前,有关给水厂单个水处理工艺对微塑料去除能力的相关研究仍然很少,因此需要更多研究案例来剖析给水厂的工艺设置对微塑料去除率的影响。

3 微塑料去除技术的发展趋势

目前,提高污水厂与给水厂对微塑料的去除率可从两方面出发,一是优化原有水处理工艺,二是应用微塑料去除新技术。

3.1 水处理工艺的优化

水处理工艺的优化研究主要围绕传统处理工艺对微塑料的去除机理,从稳定性、物理和化学作用等方面预测水处理工艺对水中微塑料沉浮行为的影响及微塑料与水中其他物质之间的相互作用,从而调整现有处理工艺的相关操作参数或工艺组合方案以优化微塑料的去除效率。

Ma等^[21]通过模拟试验,研究了不同种类及不同投加量混凝剂对水体中PE微塑料的去除效果,发现铝盐混凝剂比铁盐混凝剂的效果更佳,且在中性条件下提高铝盐混凝剂投加量并配合PAM的使用,可有效提高PE微塑料的去除率,尤其是粒径偏小的PE颗粒更易吸附于絮凝体中。除了通过化学混凝剂促进微塑料絮凝沉降外,微塑料表面生物膜

对其沉降的影响亦得到关注。Carr等^[27]研究发现,微塑料与污水的接触时间越长越有利于微塑料表面形成生物膜。而生物膜会改变微塑料的相对密度,干扰其受到的浮力作用,可能导致微塑料悬浮于池体中部,从而严重影响去除效率。因此,可通过研究污水水质与工艺的水力停留时间对微塑料表面生物膜生成速度的影响,优化调整工艺的水力停留时间以提高微塑料的去除率。

在工艺组合方面,沉降作用较大且能够物理去除油脂和砂粒的工艺,比如曝气沉砂池、沉淀池、气浮池与A/A/O工艺,在水处理初期可有效去除较多微塑料。GAC滤池与MBR等膜工艺的应用能实现对小粒径微塑料的高效去除,可作为末端处理的首选。无锡污水厂平行工艺中^[14],A/A/O-MBR的工艺组合对微塑料的去除效果明显优于氧化沟,MBR不仅对微塑料的截留作用显著,其膜外污泥还可冲洗回流至活性污泥工艺中再次用于截留微塑料,但同时MBR也易出现膜池堵塞和破损问题,对污水厂的运营维护管理要求较高。

3.2 微塑料去除新技术

虽然水中微塑料可通过混凝、刮渣、沉淀和过滤去除,但仍然存在大量微塑料逃脱现象,且截留下的微塑料多滞留于水厂污泥中,仍需进一步处理。因此开发实现靶向去除甚至直接降解水体中微塑料的工艺技术,从而实现对微塑料的完整截留与彻底净化,是今后微塑料去除技术的研究发展方向。目前,已有研究从高级氧化、生物降解、锚定技术等新兴技术出发研究微塑料的降解,并在实验室范围内取得一定成效。Kang等^[28]通过合成具有磁性的可回收碳基复合材料作为催化剂,催化活化过硫酸盐,在硫酸根自由基和羟基自由基作用下,实现8 h内降解水体中50%的微塑料,且中间产物毒性很低,可作为水藻的生长碳源或被进一步矿化降解,是一种绿色高效的降解方式。Yoshida等^[29]分离出一种以PET为主要碳源的新型细菌,可在30 $^{\circ}\text{C}$ 环境下以0.13 $\text{mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$ 的速度水解PET薄膜表面,且其产物为对苯二甲酸和乙二醇等环境友好型单体。Islam等^[30]发现锚定肽Tachystatin A2能与聚丙烯、聚对苯二甲酸乙二醇酯和聚氨酯等聚合物紧密结合,并能作为细菌角质酶Tcur1278的黏附剂,使其对聚合物的降解能力提高6.6倍。这种锚定能力在低含量纳米聚合物颗粒溶液中尤为显著,十分适用

于给水厂或污水厂后阶段中小粒径微塑料颗粒及纳米级塑料颗粒的靶向降解。

4 结论

① 微塑料污染普遍存在于我国水环境中,沿海发达地区较西部高原地区的污染水平高,淡水系统较近海海域的污染水平高,水源水的污染现状亦不容乐观。管理不当的塑料垃圾和污水厂的点源排放是国内水环境微塑料污染的重要来源。

② 目前在给水厂对微塑料去除效果方面的相关研究很少,因此需积极开展给水厂对水体中微塑料去除现状的调查,为人体与微塑料接触水平提供基础数据。给水厂的进厂原水中,小粒径微塑料占绝大部分比重,而此部分对应的去除效果较差,未来给水厂在去除微塑料方面的优化设计与技术开发应聚焦于 50 μm 以下的小粒径微塑料。

③ 水体中微塑料的去除研究尚处于起步阶段,强化混凝、沉淀、活性炭滤池和膜工艺技术的优化发展有着良好前景,高级氧化、生物降解和锚定技术等取得的试验成果多限于实验室范围,仍需大量试验验证其在实际水处理中的适用性。

④ 为了向今后探讨影响水环境中微塑料含量因素或者水处理工艺对微塑料去除效果的研究提供更多严谨、全面且具有可比性的基础数据,针对不同水体性质,合理标准化制定微塑料含量检测方案至关重要,需在今后的研究中对粒径检测范围、采样方法、统计单位等细节实现统一规范化。

参考文献:

- [1] Yan M T, Nie H Y, Xu K H, *et al.* Microplastic abundance, distribution and composition in the Pearl River along Guangzhou City and Pearl River estuary, China[J]. *Chemosphere*, 2019, 217: 879 – 886.
- [2] Wang W F, Ndungu A W, Li Z, *et al.* Microplastics pollution in inland freshwaters of China: A case study in urban surface waters of Wuhan, China[J]. *Sci Total Environ*, 2017, 575: 1369 – 1374.
- [3] Cheung P K, Hung P L, Fok L. River microplastic contamination and dynamics upon a rainfall event in Hong Kong, China[J]. *Environ Process*, 2019, 6(1): 253 – 264.
- [4] Jiang C B, Yin L S, Li Z W, *et al.* Microplastic pollution in the rivers of the Tibet Plateau[J]. *Environ Pollut*, 2019, 249: 91 – 98.
- [5] Wen X F, Du C Y, Xu P, *et al.* Microplastic pollution in surface sediments of urban water areas in Changsha, China: Abundance, composition, surface textures [J]. *Mar Pollut Bull*, 2018, 136: 414 – 423.
- [6] Su L, Xue Y G, Li L Y, *et al.* Microplastics in Taihu Lake, China[J]. *Environ Pollut*, 2016, 216: 711 – 719.
- [7] Eriksen M, Mason S, Wilson S, *et al.* Microplastic pollution in the surface waters of the Laurentian Great Lakes[J]. *Mar Pollut Bull*, 2013, 77(1/2): 177 – 182.
- [8] Di M X, Liu X N, Wang W F, *et al.* Manuscript prepared for submission to environmental toxicology and pharmacology pollution in drinking water source areas: Microplastics in the Danjiangkou Reservoir, China[J]. *Environ Toxicol Pharmacol*, 2019, 65: 82 – 89.
- [9] Xiong X, Wu C X, Elser J J, *et al.* Occurrence and fate of microplastic debris in middle and lower reaches of the Yangtze River—From inland to the sea[J]. *Sci Total Environ*, 2019, 659: 66 – 73.
- [10] Yuan W, Liu X, Wang W, *et al.* Microplastic abundance, distribution and composition in water, sediments, and wild fish from Poyang Lake, China[J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2019, 170: 180 – 187.
- [11] Di M X, Wang J. Microplastics in surface waters and sediments of the Three Gorges Reservoir, China[J]. *Sci Total Environ*, 2018, 616/617: 1620 – 1627.
- [12] Yang L B, Li K X, Cui S, *et al.* Removal of microplastics in municipal sewage from China's largest water reclamation plant [J]. *Water Res*, 2019, 155: 175 – 181.
- [13] 白濛雨, 赵世烨, 彭谷雨, 等. 城市污水处理过程中微塑料赋存特征[J]. *中国环境科学*, 2018, 38(5): 1734 – 1743.
- Bai Mengyu, Zhao Shiye, Peng Guyu, *et al.* Occurrence, characteristics of microplastic during urban sewage treatment process [J]. *China Environmental Science*, 2018, 38(5): 1734 – 1743 (in Chinese).
- [14] Lv X M, Dong Q, Zuo Z Q, *et al.* Microplastics in a municipal wastewater treatment plant: Fate, dynamic distribution, removal efficiencies, and control strategies [J]. *J Clean Prod*, 2019, 225: 579 – 586.
- [15] Liu X N, Yuan W K, Di M X, *et al.* Transfer and fate of microplastics during the conventional activated sludge process in one wastewater treatment plant of China[J]. *Chem Eng J*, 2019, 362: 176 – 182.
- [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 Res*,2017,109:164–172.
- [17] Murphy F, Ewins C, Carbonnier F, *et al.* Wastewater treatment works (WwTW) as a source of microplastics in the aquatic environment[J]. *Environ Sci Technol*, 2016,50(11):5800–5808.
- [18] 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 Res*,2018,142:1–9.
- [19] Magni S, Binelli A, Pittura L, *et al.* The fate of microplastics in an Italian wastewater treatment plant[J]. *Sci Total Environ*,2019,652:602–610.
- [20] Talvitie J, Heinonen M, Pääkkönen J, *et al.* Do wastewater treatment plants act as a potential point source of microplastics? Preliminary study in the coastal Gulf of Finland, Baltic Sea[J]. *Water Sci Technol*, 2015,72(9):1495–1504.
- [21] Ma B W, Xue W J, Hu C Z, *et al.* Characteristics of microplastic removal via coagulation and ultrafiltration during drinking water treatment[J]. *Chem Eng J*,2019,359:159–167.
- [22] Schymanski D, Goldbeck C, Humpf H U, *et al.* Analysis of microplastics in water by micro-Raman spectroscopy: Release of plastic particles from different packaging into mineral water[J]. *Water Res*,2018,129:154–162.
- [23] Cox K D, Covernton G A, Davies H L, *et al.* Human consumption of microplastics[J]. *Environ Sci Technol*, 2019,53(12):7068–7074.
- [24] Wang Z F, Lin T, Chen W. Occurrence and removal of microplastics in an advanced drinking water treatment plant (ADWTP)[J]. *Sci Total Environ*, 2020,700:134520.
- [25] Pivokonsky M, Cermakova L, Novotna K, *et al.* Occurrence of microplastics in raw and treated drinking water[J]. *Sci Total Environ*,2018,643:1644–1651.
- [26] Mintenig S M, Löder M G J, Primpke S, *et al.* Low numbers of microplastics detected in drinking water from ground water sources[J]. *Sci Total Environ*,2019,648:631–635.
- [27] Carr S A, Liu J, Tesoro A G. Transport and fate of microplastic particles in wastewater treatment plants[J]. *Water Res*,2016,91:174–182.
- [28] Kang J, Zhou L, Duan X G, *et al.* Degradation of cosmetic microplastics via functionalized carbon nanosprings[J]. *Matter*,2019,1(3):745–758.
- [29] Yoshida S, Hiraga K, Takehana T, *et al.* A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate)[J]. *Science*,2016,351(6278):1196–1199.
- [30] Islam S, Apitius L, Jakob F, *et al.* Targeting microplastic particles in the void of diluted suspensions[J]. *Environ Int*,2019,123:428–435.



作者简介:吴君怡(1996–),女,浙江温州人,硕士研究生,主要研究方向为水体微塑料污染。

E-mail:wujunyi896109@163.com

收稿日期:2019–11–26