

微塑料在污水处理过程中的演变与归宿

郝晓地, 翟学棚, 吴远远, 刘然彬

(北京建筑大学城市雨水系统与水环境教育部重点实验室 中-荷未来污水处理技术研发中心, 北京 100044)

摘要: 微塑料(粒径 $< 5\text{ mm}$)因生产、生活使用废弃后所产生,分原生与次生两种形式。按不同检测粒径分级,原污水中微塑料数量不一,但每 m^3 至少达千粒至十万粒以上,且多属于生物难降解成分。微塑料进入污水处理厂后主要被一级处理吸附截留去除;二级处理亦以吸附去除为主,但作用不大;三级处理可通过膜截留方式具有一定去除作用。污水一、二级处理对微塑料的总去除率约为 80%,出水残留微塑料($\leq 20\%$)则进入水环境,也是目前水圈中微塑料迁移、累积的重要来源。环境中的微塑料可通过饮用水、食盐、海鲜等方式进入人体,对人类健康形成各种潜在危害。为此,介绍了污水中微塑料的来源及危害,总结了检测水中微塑料的方法,分析微塑料在污水处理过程中的迁移转化规律,阐述微塑料之环境归宿以及防范策略。

关键词: 微塑料; 生态风险; 污水处理

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)08-0020-07

Evolution and Fate of Microplastics in Sewage Treatment

HAO Xiao-di, ZHAI Xue-peng, WU Yuan-yuan, LIU Ran-bin

(Sino-Dutch R & D Centre for Future Wastewater Treatment Technologies, Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment <Ministry of Education>, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

Abstract: Microplastics (size $< 5\text{ mm}$) are produced due to daily discard from both daily life and industry production, in which there are two forms: primary and secondary microplastics. Numbers of microplastics vary a lot due to different testing particle sizes, and there are at least 1 000 to 100 000 n/m^3 in raw sewage, most of which are unbiodegradable. Microplastics were mainly removed by adsorption in the primary treatment facilities; some microplastics could be adsorbed in the secondary treatment process, but the role of the secondary treatment was not great; the membrane interception method in the tertiary treatment (membrane and/or filtration) could effectively remove microplastics. The average removing efficiency of microplastics via both primary and secondary treatment was around 80%, the residue ($\leq 20\%$) of microplastics in the effluent would enter into the water environment, which was a major source of evolution and accumulation in the hydrosphere. Microplastics in the environment could be taken up by the human beings through drinking water, salt, seafood, etc. For this reason, the sources and hazards of microplastics were reviewed; and detecting methods in water/wastewater were summarized; evolution patterns were analyzed; fate in the environment and preventive measures into both

products and the environment were elucidated.

Key words: microplastics; ecological risk; sewage treatment

塑料是一种高分子质量的有机聚合物,全球年产量已高达 3.35×10^8 t。作为仅部分可再生回收的合成材料,塑料回收再利用率其实并不是很高,欧洲为 30%,中国约 25%,美国还不到 10%^[1]。结果,废塑料逐渐成为城市垃圾中增长最快的废弃物。预计到 2050 年,全球将有超过 130×10^8 t 废塑料进入自然环境。塑料破碎后形成大小尺寸不等的碎块,其中,尺寸 < 5 mm 的微碎片被称为微塑料(Microplastics, MPs),也包括纳米级微塑料。微塑料分初生微塑料和次生微塑料两种;初生是指在源头破碎而成,次生指的是离开源头逐渐破碎形成。

目前微塑料在环境中分布已十分广泛,遥远的南极洲也已检测到微塑料的踪迹^[2]。污水中亦常常含有很多微塑料,因生活或生产废料直接排入或因降雨径流冲刷地面汇入市政排水管网而产生^[3]。随市政管网进入污水处理厂的微塑料大多难以在生物处理过程中被降解,最终会随出水排放或因污泥填埋/堆肥进入环境,从而形成持久性有机物(POPs),对生态环境甚至人类健康构成生态风险^[4]。为此,总结了污水中微塑料来源、对生物及人类危害、检测方法及其在污水处理过程中演变过程,以揭示传统污水处理工艺对这一新型污染物的去除作用及其归宿。

1 污水中的微塑料

1.1 来源

污水中微塑料首先来自初生,直接排入污水。微塑料按形态分为纤维(Fiber)、碎块(Fragment)、薄片(Film/Sheet)、球状(Sphere/Pellet)4 种类型;已有研究发现大多纤维状微塑料材质为尼龙,可能源于纺织业废水和家庭洗衣排水,其他材质主要是 PVC、PET、PP 等,各材质占比可能与各地区使用量有关^[5]。大多数磨砂洗面奶中都含有粒径 < 100 μm 的 PVC 颗粒以替代天然材料;每 mL 磨砂洗面奶可释放 4 594 ~ 94 500 粒微塑料^[6]。荷兰估算出,污水处理厂出水中由个人化妆品和护理品贡献的微塑料为 0.2 $\mu\text{g/L}$,另有 2.7 $\mu\text{g/L}$ 和 66 $\mu\text{g/L}$ 微塑料分别由表面清洗剂和油漆涂料所产生^[7]。作为药物载体,微塑料在医学领域使用也非常广泛,药物残留亦会随排泄物进入污水。

污水中次生微塑料主要因大块塑料受机械剪切、光氧化断键、微生物作用等逐渐破碎而形成。两种形式微塑料从居家、生产或地面(雨水径流)进入下水道,继而进入污水处理厂;在污水处理工艺过程中亦可能有次生微塑料形成。微塑料在环境中的物质流见图 1。

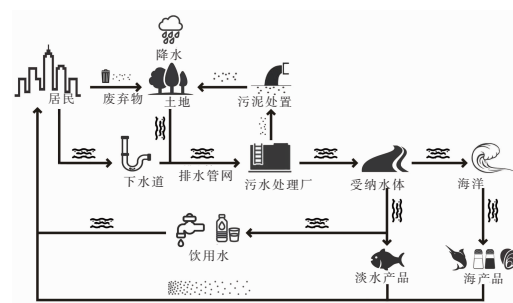


图1 微塑料在环境中的物质流

Fig. 1 Microplastics' mass flow in the environment

1.2 危害

微塑料(非生物降解成分)一般难以生物降解,以至于进入污水处理厂的微塑料或者随出水或者随污泥进入环境。数量惊人的微塑料一旦进入水体或土壤,亦难以降解,多残留于环境中形成 POPs,甚至可能随饮用水重新回到城市,并被人体摄入^[8]。人体摄入微塑料的方式除饮用水外,也包括食用海鲜(牡蛎、鱼类等具有食物链富集效应)^[4]。有 13 个国家分别在自来水中检出微塑料成分,最高浓度达 6×10^4 n/m³ (n 代表数目,等同粒数)^[9]。一些国家在市售瓶装饮用水中亦发现了微塑料的踪迹,其中,93% 检出的微塑料粒径 < 100 μm ^[10]。也有一些国家在食用盐中检测出微塑料,在 94% 的食用盐中检出了粒径 > 149 μm 的微塑料^[11]。

微塑料进入生物/人体后会在生物组织、循环系统和大脑中逐渐积累,对其健康造成伤害^[12-15]。有 8 个国家从人体粪便中检出微塑料,平均浓度为 200 n/kg^[8]。可见,处于食物链顶端的人类正在承受着微塑料后患之恶果。

除对人体的直接危害外,在污水处理过程中进入剩余污泥的微塑料不仅本身难以生物降解,还会在污泥厌氧消化中抑制甲烷产量与速率^[16];纤维型微塑料与纤维素结构十分类似,可充当污泥“骨

架”^[17],会阻碍污泥降解而减量。

2 检测水中微塑料

2.1 采样

对水中微塑料检测,目前国内外尚未建立起统一标准,采样、提取、检测方法各异。微塑料采样有的基于美国国家海洋和大气管理局(NOAA)333 μm 膜滤标准,也有采用 500 μm 膜滤标准的案例。无论哪种尺度,均忽略了生态风险更大的细小颗粒。所以,微塑料采样也出现了分级膜滤(500/190/100/25 μm)如此细分的标准。可见,相同水样选择不同孔径膜采样,微塑料检出浓度可相差十万倍^[18]。

2.2 提取

提取微塑料方法多样,有用密度分离的,如,把含 PVC 颗粒样品放入饱和氯化钠(NaCl)溶液中,颗粒上浮至表层后将表层液体分离;此法虽安全、价廉,但易受溶液密度限制,不适用于组分复杂的污

水^[19]。污水中含大量有机干扰物,主要是纤维素,会干扰微塑料提取的纯度和检测结果;先用 Fenton 法消化氧化样品可大大缩短提取时间,但只有循环消化 3~6 次后有机干扰物去除效果方见明显^[20],亦可加入特种酶进一步降解样品中的纤维素;之后将样品送入金属转盘,外加电场,利用惯性和塑料颗粒的静电特性,将其他物质先分离到杂质区,微塑料先吸附在转盘上,随后落入样品区,采用此法提取的样品中几乎没有干扰物残留,微塑料回收率接近 100%^[21]。

2.3 鉴别

微塑料不易精确定量,视觉识别和红外光谱显微检测数目(粒)是目前使用最多的鉴别方法^[22],各种鉴别方法及优缺点见表 1。热分析能帮助定量微塑料的质量浓度,而其数目与质量浓度并无必然联系,质量浓度是原水中 SS 的千分之一^[23]。

表 1 常见微塑料鉴别方法

Tab. 1 Common identifying methods for microplastics

鉴别方法	原理	优缺点
视觉识别(Visual Sorting)	体视显微镜视野计数	操作简便,检测成本低;微小颗粒计数困难,易错认
傅里叶红外光谱(FTIR)	检测红外激发化学键、官能团振动产生的吸收特异性红外光谱	非破坏性检测;无法检测粒径 $\leq 10\ \mu\text{m}$ 的颗粒,耗时长,对样品要求高
热裂解-气质联用(GCMS)	热解产物光谱与标准光谱比对	样品无需消化,背景污染无影响;设备复杂,破坏性检测
拉曼光谱(Raman Spectra)	激光与原子作用检测特异拉曼光谱	非破坏性检测,可识别粒径 $\leq 1\ \mu\text{m}$ 的颗粒,有干扰物标准光谱库;易背景污染
高效液相色谱(HPLC)	选择溶剂溶解,通过液-固的物质的量分配比差异,对混合物进行分析鉴别	特定检测准确;只能测量极小尺寸样品,无法认知颗粒的物理性质
扫描电子显微镜(SEM)	电子束与样品相互作用,产生二次电子信号成像观测	生成高分辨率图像;样品需前处理,破坏性检测,无详细识别信息
标记法(Tagging)	疏水性染料吸附到微塑料表面,并在蓝光照射时呈现荧光	易识别计数荧光颗粒,其他颗粒亦可能被染色,致结果偏高
透射电子显微镜(TEM)和原子力显微镜(AFM)	探测器感知探针受力的大小,获得样品表面形貌的信息	可检测纳米颗粒,生成高分辨率图像;方法不成熟
扫描电子显微镜能谱仪联用(SEM-EDS)	扫描电镜和 EDS 元素含量分析	可检出微塑料中无机添加剂成分;方法不成熟

3 微塑料在污水处理过程中的演变

我国污水处理厂格栅间距一般为 10~30 mm,即使欧洲的格栅间距较小(如,希腊格栅间距为 5~40 mm^[24])一般也在 5 mm 以上,几乎拦截不了微塑料,以至于原污水中微塑料大都会进入污水处理流程。总结了一些国家污水处理厂进水与出水中微塑料数目范围^[5,25-31],结果见表 2。因地理位置、水文

气候、居民习惯、排水体制(雨污分流)不同,导致各国污水处理厂进水微塑料数目存在很大的时空差异,对微塑料去除效果不一,所以表 2 显示结果不宜横向比较。再者,微塑料去除率如果按进、出相减再与进的相比计算很不准确,因为次生微塑料很容易在污水处理过程中形成。

对北京某市政污水处理厂($Q = 5 \times 10^4\ \text{m}^3/\text{d}$)

各单元微塑料“全谱”分析(WPO 法做消化处理^[20]; 蔡司 Stemi508 显微镜鉴别),检测结果见表 3。

表 2 国内外部分污水处理厂进、出水微塑料浓度

Tab.2 Microplastic numbers in the influent and effluent from some WWTPs at home and abroad

项目	规模/ (10 ⁴ m ³ · d ⁻¹)	处理级别	最小采样 孔径/μm	进水平均数目/ (10 ³ n · m ⁻³)	出水平均数目/ (n · m ⁻³)
美国洛杉矶	多家	二/三级	45	—	20 ~ 190
澳大利亚悉尼	多家	一/二/三级	25	—	280 ~ 1 540
澳大利亚新南威尔士	—	三级	—	—	1 000
苏格兰格拉斯哥	26	二级	11	15.7	250
法国巴黎塞纳中心	24	二级	100	293	35 000
德国下萨克森州	多家	二/三级	20	—	1 000 ~ 9 050
意大利	40	三级	10	2.5	400
瑞典吕瑟希尔	—	三级	300	15	83
丹麦	多家	二/三级	10	2.2 ~ 18	19 ~ 447
芬兰赫尔辛基	多家	二/三级	20	180 ~ 430	4 900 ~ 8 600
芬兰米凯利	1	三级	0.4	57.6	400 ~ 1 000
芬兰图尔库	—	三级	20	0.7	20
芬兰海门林纳	—	三级	20	2	100
美国	多家	二/三级	125	—	4 ~ 127
加拿大温哥华	5	二级	1	31.1	500
中国上海	280	二级	75	117	52 000

表 3 北京某市政污水处理厂各单元微塑料分级与数目

Tab.3 Distribution and numbers of microplastics in a WWTP of Beijing

项目	微塑料 数目/ (10 ⁴ n · m ⁻³)	粒径分布占比/%				
		1 000 ~ 5 000 μm	500 ~ 1 000 μm	300 ~ 500 μm	50 ~ 300 μm	10 ~ 50 μm
A	4.72	6.57	20.55	49.79	11.44	11.65
B	1.75	12.00	31.43	26.86	23.43	6.29
C	2.05	7.32	20.00	57.07	13.17	2.44
D	1.24	8.06	37.10	26.61	20.97	7.26
E	0.33	—	—	—	—	100
F	2.25	—	—	—	—	100

注: A 为原水,B 为沉砂池,C 为曝气结束,D 为沉淀结束,E 为溶气浮选,F 为剩余污泥。

表 3 结果证实曝气前后微塑料数目确有不同;进水中 300 ~ 500 μm 微塑料约占 50%,而曝气后这一级差比例增多,总数目相对沉砂池增加 17.1%。若以进水数目为基准计算去除率,沉砂池去除率为 62.9%,曝气池去除率为 -6.4%,二沉池去除率为 17.2%,溶气浮选去除率为 19.3%,即,沉砂池去除了一半以上的微塑料,后续二、三级过程亦少部分去除。检测发现,在污水处理过程中形成新的次生微塑料中尺寸 < 500 μm 的颗粒数目增多、占比增大,进出水中以碎块和纤维成分为主。

总之,微塑料去除率似乎与其粒径大小无关,应以砂砾或污泥吸附去除为主。对微塑料的吸附容量,油脂是砂砾的近 4 倍,而砂砾与污泥吸附容量相当^[32],应该是油脂与塑料间的相似相溶性和静电作用所致^[33]。所以,污水处理工艺是否设除油池、初沉池、前端是否投加絮凝药剂等不同情况对微塑料去除效果有较大差别。

不同污水处理厂处理阶段对微塑料去除贡献率总结见图 2。

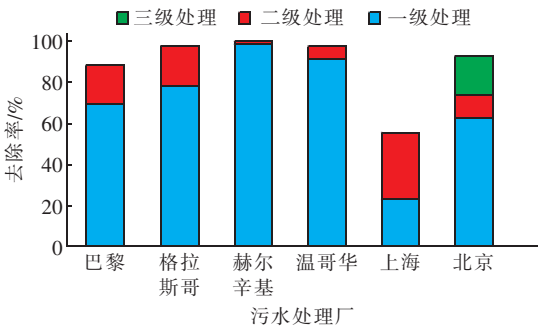


图 2 污水处理厂中微塑料在不同阶段的去除率

Fig.2 Removal efficiencies of microplastics at different stages in some WWTPs

通常,一级处理(包括除油池、沉砂池和初沉池)对微塑料去除贡献率约为 23% ~ 99%;二级处理(包括各种传统活性污泥工艺)的贡献率在 0 ~

32% (几乎已完全去除粒径 $>300\ \mu\text{m}$ 的纤维型微塑料, $20\sim100\ \mu\text{m}$ 分级占比由 40% 上升至 70%)^[18,25,29-32];三级处理对微塑料去除的贡献结论不一,微滤($10\sim20\ \mu\text{m}$)、快速砂滤池、溶气浮选、MBR 对微塑料的去除率分别为 40%~98%、97%、95% 和 99.9%^[26] (基于二级出水),但生物滤池对微塑料无明显去除作用^[30]。

4 微塑料归宿与防范

尽管污水处理工艺可去除 80% 以上的微塑料,但将处理规模放大后出水中残留 20% 微塑料之总量却不容小觑;在污水厂排水口下游已报道检测到有大量微塑料积累现象^[3,5];美国 17 座污水厂平均每座出水微塑料超过 $14.6\times10^8\ \text{n/a}$ ^[28];笔者课题组检测的北京某污水处理厂出水微塑料竟高达 $6\times10^{10}\ \text{n/a}$,且微塑料尺寸更小、潜在危害更大^[30,32]。

另一方面,被去除的 80% 的微塑料要么存在于砂砾中,要么被裹挟在剩余污泥中^[32]。砂砾外运填埋前若不及时清洗,微塑料会因填埋而进入环境;剩余污泥厌氧消化后微塑料也难减少^[34],若随后填埋也会进入环境。要想避免微塑料随砂砾与污泥进入环境,一是采用曝气沉砂池(但可能会影响后续脱氮除磷厌氧单元),二是对污泥采用焚烧处理^[35]。

2009 年,联合国环境规划署已将污水处理厂出水和下水道溢流列为海洋环境废物八大来源之一^[24];2011 年,国际海洋垃圾大会上制定的檀香山战略中也提及污水处理厂为海洋微塑料的贡献源。对此,国际上目前对污水处理厂中微塑料去除及归宿研究逐渐升温,反观国内研究显得偏少。且部分研究试图用所谓“高级”方法仅去除水相中的微塑料,但对砂砾或污泥填埋/堆肥后进入环境的微塑料却很少关注;这种作法只能是管中窥豹,必会加大污水处理成本,对整体环境效益实则徒劳无功。

其实,对微塑料去除不能仅是被动地采取“防患于既成之后”的方法,更应实施“防患于未然”的策略。这就需要在塑料生产、使用、废物处置和回收等方面多下功夫,需政府引导和全体公众参与。荷兰、比利时、瑞士、加拿大和美国等国分别出台了禁止在个人护理品中使用微塑料的规定,而我国目前尚没有相应限制性条款,估计大陆范围内每年仅洗面奶的使用便可造成 $210\times10^{12}\ \text{n/a}$ 初生微塑料进入环境^[36]。目前,一些国际商业公司(如,联合利华、强生、欧莱雅等)已开始重新回归使用天然材

料^[6];全球最大两家瓶装饮用水公司达能和雀巢公司已着手联合开发可降解塑料水瓶;肯尼亚已开始实施史上最严的禁塑令;亦有倡议安装分离器防止微塑料随暴雨径流进入排水管网^[5];欧盟提出“循环经济中的欧洲塑料战略”,塑料行业者联合承诺实施“塑料 2030”战略,并持续增强塑料回收率。反观我国,2008 年出台的“禁塑令”实际上变成了“购塑令”,已名存实亡;2017 年底出台的“禁废令”虽全面禁止进口塑料垃圾,原意倒逼国内回收企业专注国内塑料垃圾再生,但国家统计局的数据表明 2018 年上半年塑料新料生产累计增长 1.6%。此外,最有效的防患于未然的方法还有,让纺织行业使用覆盖涂层和减少化纤纤维使用,对含微塑料的产品进行强制标识,以增加社会有效监督。

5 结语

微塑料(粒径 $<5\ \text{mm}$)作为一种新近发现对生物圈构成生态风险的污染物目前已引起全球普遍关注。微塑料主要通过水圈扩散、转移,远至南极洲现在也已发现微塑料的踪迹。微塑料主要通过污/废水、径流进入水系,因此,污水处理对微塑料的去除或截留作用则显得十分重要。

进入污水的微塑料数量高达 $(2\sim430)\times10^3\ \text{n/m}^3$ (取决于最小采样孔径: $1\sim300\ \mu\text{m}$)。因格栅间距往往在 5 mm 以上,所以,污水中微塑料多进入污水处理流程。在污水处理过程中,一级处理(除油池、沉砂池和初沉池)是微塑料的主要截留单元,通过油脂、砂砾、污泥吸附可去除 50% 以上的微塑料;二级处理(传统活性污泥法)对微塑料的去除(难以生物降解,主要为吸附作用)率不高($0\sim30\%$,但已几近完全去除粒径 $>300\ \mu\text{m}$ 的微塑料),也可能因次生微塑料产生而出现负的去除率;一、二级污水处理对微塑料的总去除率平均为 80%;三级处理对微塑料去除的贡献结论不一,但微滤、砂滤池、气浮、MBR 对微塑料均有一定去除作用。

检测水中微塑料方法很多,但目前尚没有形成统一的标准方法,检测时采用的最小膜孔径标准也不尽一致,以至于出现各国、各水厂进出水微塑料检测数目千差万别,难以横向比较。

尽管污水处理可以去除绝大部分微塑料(去除率 $\geq 80\%$),但将处理规模放大后出水中约 20% 的残留微塑料总量却不容小觑,它们仍是水环境中微塑料的重要来源。被砂砾吸附的微塑料处理不当会

随砂砾进入环境;进入污泥的微塑料在厌氧消化时会削弱产甲烷能力,另亦可能作为“骨架”阻碍污泥减量。因此,对微塑料的去除不能仅是被动地采取“除患于既成之后”的污水处理方法,更应像西方国家一样实施“防患于未然”的禁塑、限塑、回收策略。

参考文献:

- [1] Geyer R, Jambeck J R, Law K L. Production, use, and fate of all plastics ever made[J]. *Sci Adv*, 2017. DOI: 10.1126/sciadv.1700782.
- [2] Zarfl C, Matthies M. Are marine plastic particles transport vectors for organic pollutants to the Arctic? [J]. *Mar Pollut Bull*, 2010, 60(10):1810–1814.
- [3] Magnusson K, Norén F. Screening of microplastic particles in and down-stream a wastewater treatment plant [EB/OL]. <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:773505/FULLTEXT01.pdf>, 2015–03–04.
- [4] Rochman C M, Kross S M, Armstrong J B, *et al.* Scientific evidence supports a ban on microbeads [J]. *Environ Sci Technol*, 2015, 49(18):10759–10761.
- [5] Prata J C. Microplastics in wastewater: State of the knowledge on sources, fate and solutions [J]. *Mar Pollut Bull*, 2018, 129(1):262–265.
- [6] Napper I E, Bakir A, Rowland S J, *et al.* Characterization, quantity and sorptive properties of microplastics extracted from cosmetics [J]. *Mar Pollut Bull*, 2015, 99(1/2):178–185.
- [7] van Wezel A, Caris I, Kools S A E. Release of primary microplastics from consumer products to wastewater in the Netherlands [J]. *Environ Toxicol Chem*, 2016, 35(7):1627–1631.
- [8] Quenqua D. Microplastics find their way into your gut, a pilot study finds [EB/OL]. <https://www.nytimes.com/2018/10/22/health/microplastics-human-stool.html>, 2018–10–22.
- [9] 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.
- [10] Mason S A, Welch V, Neratko J. Synthetic polymer contamination in bottled water [EB/OL]. [https://orbmedia.org/sites/default/files/Final Bottled Water Report.pdf](https://orbmedia.org/sites/default/files/Final%20Bottled%20Water%20Report.pdf), 2018–03–13.
- [11] Karami A, Golieskardi A, Choo C K, *et al.* The presence of microplastics in commercial salts from different countries [J]. *Sci Rep*, 2017. DOI: 10.1038/srep46173.
- [12] 蔡亚云, 赵佳玥, 李文锋, 等. 不同粒径塑料微颗粒在斑马鱼腮组织中的积累及其对蒽毒性的影响 [J]. *应用与环境生物学报*, 2017, 23(6):1154–1158.
Cai Yayun, Zhao Jiayue, Li Wenfeng, *et al.* Retention of polystyrene particles of different sizes in zebrafish gills and their effect on toxicity of anthracene to gill cells [J]. *Chinese Journal of Applied Environmental Biology*, 2017, 23(6):1154–1158 (in Chinese).
- [13] 徐擎擎, 张弢, 邹亚丹, 等. 微塑料与有机污染物的相互作用研究进展 [J]. *生态毒理学报*, 2018, 13(1):40–49.
Xu Qingqing, Zhang Ge, Zou Yadan, *et al.* Interactions between microplastics and organic pollutants: Current status and knowledge gaps [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2018, 13(1):40–49 (in Chinese).
- [14] 李子豪. 微塑料摄入对高脂饮食大鼠代谢、肝功能及生殖系统相关参数的影响 [D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
Li Zihao. Effects of Microplastics on Cardiometabolic Parameters, Liver Function and Reproductive Endocrinology of Rats with High Fat Diet [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018 (in Chinese).
- [15] 高丰蕾, 李景喜, 孙承君, 等. 微塑料富集金属铅元素的能力与特征分析 [J]. *分析测试学报*, 2017, 36(8):1018–1022.
Gao Fenglei, Li Jingxi, Sun Chengjun, *et al.* Analysis on ability and characteristics of microplastics to enrich metal lead [J]. *Journal of Instrumental Analysis*, 2017, 36(8):1018–1022 (in Chinese).
- [16] Fu S, Ding J, Zhang Y, *et al.* Exposure to polystyrene nanoplastic leads to inhibition of anaerobic digestion system [J]. *Sci Total Environ*, 2018, 625:64–70.
- [17] 郝晓地, 翟学棚, Mark van Loosdrecht, 等. 污水碳源分离新概念——筛分纤维素 [J]. *中国给水排水*, 2017, 33(14):9–12.
Hao Xiaodi, Zhai Xuepeng, Mark van Loosdrecht, *et al.* A new concept of separating carbon source from wastewater: Sieving fibers [J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33(14):9–12 (in Chinese).
- [18] Dris R, Gasperi J, Rocher V, *et al.* Microplastic contamination in an urban area: A case study in Greater Paris [J]. *Environ Chem*, 2015, 12(5):592–599.
- [19] Li J, Liu H, Chen J P. Microplastics in freshwater systems: A review on occurrence, environmental effects, and methods for microplastics detection [J]. *Water Res*, 2017, 137:362–374.
- [20] Dyachenko A, Mitchell J, Arsem N. Extraction and

- identification of microplastic particles from secondary wastewater treatment plant (WWTP) effluent [J]. *Anal Methods*, 2016, 9(9): 1412 – 1418.
- [21] Felsing S, Kochleus C, Buchinger S, *et al.* A new approach in separating microplastics from environmental samples based on their electrostatic behavior [J]. *Environ Pollut*, 2018, 234: 20 – 28.
- [22] 杨东琪. 环境样品中微塑料理化特征的检测和表征方法[D]. 上海: 华东师范大学, 2017.
Yang Dongqi. Methods for Detecting and Representing Physical and Chemical Features of Microplastics in Environmental Samples [D]. Shanghai: East China Normal University, 2017 (in Chinese).
- [23] Márta S, 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.
- [24] Mourgkogiannis N, Kalavrouziotis I K, Karapanagioti H K. Questionnaire-based survey to managers of 101 wastewater treatment plants in Greece confirms their potential as plastic marine litter sources [J]. *Mar Pollut Bull*, 2018, 133: 822 – 827.
- [25] 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 Res*, 2018, 133: 236 – 246.
- [26] Talvitie J, Mikola A, Koistinen A, *et al.* Solutions to microplastic pollution—Removal of microplastics from wastewater effluent with advanced wastewater treatment technologies [J]. *Water Res*, 2017, 123: 401 – 407.
- [27] 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.
- [28] Mason S A, Garneau D, Sutton R, *et al.* Microplastic pollution is widely detected in US municipal wastewater treatment plant effluent [J]. *Environ Pollut*, 2016, 218: 1045 – 1054.
- [29] Gies E A, LeNoble J L, Noël M, *et al.* Retention of microplastics in a major secondary wastewater treatment plant in Vancouver, Canada [J]. *Mar Pollut Bull*, 2018, 133: 553 – 561.
- [30] 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.
- [31] 白濛雨, 赵世焯, 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 microplastics during urban sewage treatment process [J]. *China Environmental Science*, 2018, 38(5): 1734 – 1743 (in Chinese).
- [32] 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.
- [33] Saleem J, Riaz A, McKay G. Oil sorbents from plastic wastes and polymers: A review [J]. *J Hazard Mater*, 2018, 341: 424 – 437.
- [34] Mahon A M, O'Connell B, Healy M G, *et al.* Microplastics in sewage sludge: Effects of treatment [J]. *Environ Sci Technol*, 2017, 51(2): 810 – 818.
- [35] 郝晓地, 陈奇, 李季, 等. 污泥干化焚烧乃污泥处理/处置终极方式 [J]. *中国给水排水*, 2019, 35(4): 35 – 42.
Hao Xiaodi, Chen Qi, Li Ji, *et al.* Incineration after drying is an ultimate approach to handling excess sludge [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(4): 35 – 42 (in Chinese).
- [36] Cheung P K, Fok L. Characterisation of plastic microbeads in facial scrubs and their estimated emissions in Mainland China [J]. *Water Res*, 2017, 122: 53 – 61.



作者简介: 郝晓地 (1960 –), 男, 山西柳林人, 教授, 从事市政与环境工程专业教学与科研工作, 主要研究方向为污水生物脱氮除磷技术、污水处理数学模拟技术、可持续环境生物技术。现为国际水协期刊《Water Research》区域主编 (Editor)。

E – mail: haoxiaodi@bucea.edu.cn

收稿日期: 2018 – 11 – 07