

污水处理与回用

邓海洋, 廖芷安琪, 刘沛文, 等. 华南地区污水处理厂污泥中微塑料的典型赋存特征[J]. 净水技术, 2024, 43(12): 84-95.

DENG H Y, LIAO Z A Q, LIU P W, et al. Typical occurrence characteristics of microplastics in sludge of WWTP in southern China[J]. Water Purification Technology, 2024, 43(12): 84-95.

华南地区污水处理厂污泥中微塑料的典型赋存特征

邓海洋¹, 廖芷安琪², 刘沛文¹, 区华丽², 曹耀宇³, 欧桦瑟^{2,*}

(1. 中节能建设工程设计院有限公司, 四川成都 610052; 2. 暨南大学环境与气候学院, 广东广州 511443; 3. 暨南大学物理与光电工程学院, 广东广州 510632)

摘要 在污水处理过程中大部分城市污水中的微塑料污染物被转移到剩余污泥中, 阐明其分布特性, 对于明晰城市微塑料排放和环境影响, 具有重要的意义。研究以位于广州市不同行政区的3座污水处理厂为调查对象, 跟踪采集其污水和污泥样品, 分离其中所含微塑料污染物, 通过显微拉曼分析其特性, 绘制污水处理厂微塑料污染图谱。3座污水处理厂对污水中微塑料的去除率>95%。这些微塑料被转移到剩余污泥中。干污泥中, 微塑料浓度为(19.6±8.4)、(39.5±15.6)个/g和(15.9±4.8)个/g。污泥中微塑料的形状可分为球状、不规则块状、纤维状和薄膜状。球状和纤维状来自生活污水, 不规则块状则有一部分来自工业源。所检测到的微塑料中, 尺寸为1~100 μm的占比达到80%~90%。而且, 纤维状微塑料与较大尺寸(50~100 μm)微塑料之间存在一定的关联性。在所检测到的微塑料中, 透明和白色占主要部分, 其数量比例为60%~90%。在材质方面, 聚乙烯和聚丙烯微塑料占比为60%~80%, 而其他十几种材质的微塑料则占比较少。总之, 污水处理厂的微塑料与其污水来源关系密切相关。

关键词 微塑料 污水处理 拉曼光谱 迁移转化 新污染物

中图分类号: TU992 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2024)12-0084-12

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2024.12.010

Typical Occurrence Characteristics of Microplastics in Sludge of WWTP in Southern China

DENG Haiyang¹, LIAO Zhanqi², LIU Peiwen¹, OU Hualie², CAO Yaoyu³, OU Huase^{2,*}

(1. CECEP Construction Engineering Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610052, China;

2. College of Environment and Climate, Jinan University, Guangzhou 511443, China;

3. College of Physics & Optoelectronic Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632, China)

Abstract Most of the microplastic pollutants in urban wastewater are migrated to the remaining sludge during the wastewater treatment process. Elucidating their distribution characteristics is of great significance for clarifying the emission and environmental impact of microplastics from urban wastewater sources. Herein, three wastewater treatment plants (WWTPs) located in different administrative districts of Guangzhou were selected, and their wastewater and sludge samples were tracked and collected. The three WWTPs contributed a removal rate of over 95% for microplastics in wastewater. These microplastics were migrated to the remaining sludge. In the dry sludge, microplastic concentrations were (19.6±8.4), (39.5±15.6) g⁻¹ and (15.9±4.8) g⁻¹. The shapes of microplastics in sludge included spherical, irregular block, fibrous and film shapes. The spherical and fibrous shapes originated from domestic wastewater, while part of the irregular blocks originated from industrial sources. Among the detected microplastics, 80%~90% had sizes in the range of 1 μm to 100 μm. Moreover, there was a certain correlation between fibrous microplastics and larger size (50~100 μm).

[收稿日期] 2024-03-12

[基金项目] 国家自然科学基金面上项目(42377373, 51778270)

[作者简介] 邓海洋(1984—), 男, 高级工程师, 主要从事水处理与新能源技术工作。

[通信作者] 欧桦瑟(1984—), 男, 博士, 研究方向为环境新污染物的归趋与控制技术、水污染与控制技术, E-mail: touhuase@jnu.edu.cn。

μm) microplastics. Among the detected microplastics, transparent and white materials accounted for the main parts, with their quantity proportion ranging from 60% to 90%. In terms of materials, polyethylene and polypropylene microplastics accounted from 60% to 80%, while microplastics of more than a dozen other materials account for relatively small amounts. In summary, microplastics in WWTPs are closely related to their wastewater sources.

Keywords microplastics(MP) wastewater treatment Raman spectrum migration and transformation novel pollutant

城市污水处理厂对污水中微塑料的去除效率达到 90%~99%,但该过程以转移为主,矿化降解占极少的比例。其本质是各种污水处理工艺将大部分微塑料从污水中分离,并转移到污泥中^[1-4]。随后的污泥处理也仅能矿化降解部分微塑料,大量的微塑料经过各种最终处置,例如焚烧、农用肥等,最终进入到环境介质中^[5-7]。进入环境的微塑料污染物,对于生态环境是严重的灾难,并最终会影响人类的身体健康^[8]。微塑料污染会影响人类的呼吸、消化、神经、免疫等系统,值得注意的是,人类胎盘、睾丸等关键生殖器官中也发现有微塑料存在^[9-10]。因此,调查污水处理厂污泥中所含微塑料的浓度和组成,对于明晰城市污水处理过程的微塑料排放,减少其对生态环境和人类健康的影响,具有重要的意义。

研究以位于广州市的污水处理厂为调查对象,跟踪采集其污水和污泥样品,分离其中所含微塑料污染物,通过显微拉曼光谱技术分析其特性,绘制污水处理厂微塑料污染图谱,为从排放源头控制微塑

料污染提供参考。

1 材料和方法

1.1 污水处理厂

从广州市周边的 3 座污水处理厂采样,选择位于不同功能区域的污水处理厂作为典型代表。1 号污水处理厂位于广州市郊区,所在区域以城镇和旅游景区为主,设计污水处理量为 80 000 m³/d;2 号污水处理厂位于广州市中心城区,所在区域以城镇为主,设计污水处理量为 120 000 m³/d;3 号污水处理厂位于广州市郊区,所在区域以工业园区为主,设计污水处理量为 54 000 m³/d。3 座污水处理厂的污水和污泥处理工艺流程如图 1 所示,包括一级处理、二级处理和三级处理工艺,二级工艺均以生物法为核心工艺。污泥处理工艺也有所区别;1 号污水处理厂的污泥考虑被附近农田使用,因此在自然干化之后经历堆肥处理;2 号污水处理厂和 3 号污水处理厂的污泥则考虑焚烧和其他用途,因此其处理流程中包含消化和机械脱水,目的是无害化和减小

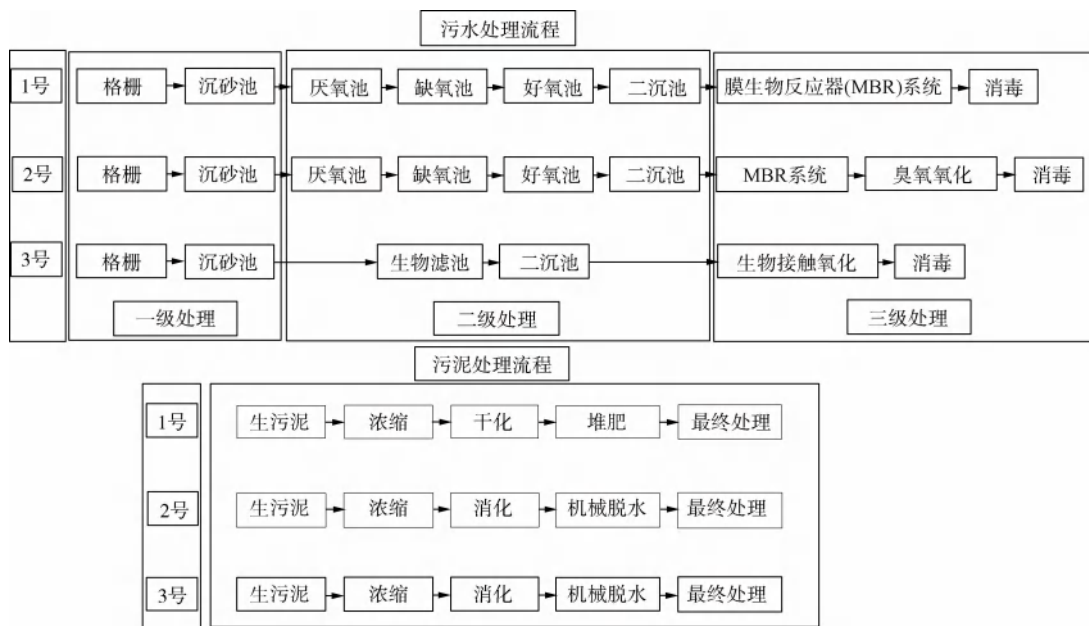


图 1 污水处理厂工艺流程

Fig. 1 Process Flow of WWTPs

体积,方便后期运输。本试验中,1号污水处理厂在干化后进行采样,2号污水处理厂和3号污水处理厂则是在机械脱水后进行采样。

1.2 样品保存和预处理

在污水处理厂的污泥处理设施采集适量的干污泥样品。运回实验室后,在4℃冷藏条件下保存。试验前,将污泥样品平铺分散在玻璃培养皿中,之后放置于烘箱中50℃真空干燥至质量不变。称取10g的污泥样品,将其研磨成粉末,转移至烧杯中。往烧杯中加入200 mL蒸馏水,再加入15 mL过氧化氢

溶液(质量分数为30%),搅拌均匀,将样品置于40℃烘箱中24 h,维持磁力搅拌,消化污泥中的有机物质。之后,将样品置于真空干燥箱中(60℃),烘干至质量不变(图2)。为了避免外来塑料干扰,所有预处理和分离步骤采用的器皿和工具均为非塑料材质。例如,所采用的液体试剂,都经过玻璃纤维滤纸(孔径为0.45 μm)过滤之后再使用;污泥采样的工具和器皿都为不锈钢和玻璃材质。每个样品都采集3个平行样来进行试验。本研究后续结果图片中展示的柱状图均为3个平行样的平均数据。

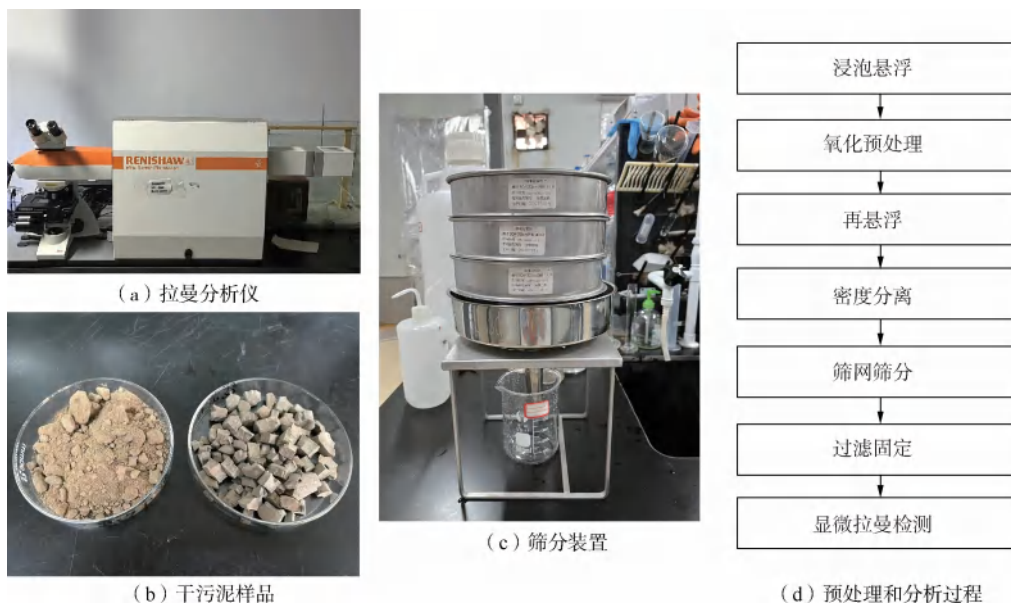


图2 样品预处理和分离方法

Fig. 2 Samples Pre-Treatment and Separation Methods

1.3 微塑料分离方法

基于密度分离法,对污泥中的微塑料进行分离提取。首先,配制100 mL密度为1.5 g/cm³的氯化锌溶液,将消解和烘干后的污泥样品分散于氯化锌溶液中,并移至分液漏斗,将悬浊液搅拌均匀。分液漏斗静置至少6 h后,出现稳定的分层现象时,排出下层固体杂质,留取上层液体。将上层清液分别过20、40、150目和300目不锈钢筛,再用蒸馏水分别反向冲洗不同目数的钢筛,清洗至钢筛上无法再洗出杂质。将冲洗下来的所有悬浊液收集。根据不同目数所收集到的蒸馏水分别进行抽滤,截留获得表面附着有微塑料的滤膜。滤膜为玻璃纤维滤纸,孔径为0.45 μm。获得带有微塑料的滤纸放置在带盖培养皿中避光储存。

1.4 微塑料检测分析方法

拉曼光谱是一种常用识别微塑料的光谱方法^[11-12]。与傅里叶红外光谱(FTIR)相比,拉曼具有更好的空间分辨率,对非极性官能团具有较高敏感性,且对水和二氧化碳的干扰信号不敏感^[13-14]。使用拉曼光谱仪(Renishaw in Via 1017-44, Gloucestershire, UK)对玻璃纤维滤膜上的疑似微塑料颗粒进行识别分析^[15]。拉曼光谱仪在静态扫描模式下运行,激光波长为785 nm,波数为505~1 620 cm⁻¹,激光功率为0.03 W。得到的光谱由Wire软件(Renishaw, UK)处理,通过将光谱与拉曼内置的聚合物光谱库比较,与各种塑料高聚物材质的匹配度超过70%以上的,可被认定为微塑料。此外,还将含有微塑料的玻璃纤维滤纸置于显微镜下(Leica

Microsystems CMS GmbH, Germany) 观察其外表形态。通过拉曼光谱检测后,获得每个微塑料样品的材质和形貌信息,将其记录并统计之后,获得微塑料的统计特征信息,包括数量、形状、颜色、尺寸和材质。

1.5 检测结果分析

将微塑料分为 4 类形状,包括球状、不规则块状、纤维状和薄膜状。球状是外形接近于球状的微塑料,不规则块状是具有不规则形态的块状微塑料(长宽比 <5),纤维状是细长的条状微塑料(长宽比 ≥ 5),薄膜状是薄片状微塑料。在尺寸上,污泥样品经过 20、40、150 目和 300 目不锈钢筛后,可将微塑料尺寸分为近似 >100 、 $50\sim 100$ 、 $10\sim 50\ \mu\text{m}$ 和 $1\sim 10\ \mu\text{m}$ 4 个尺寸。微塑料的颜色分类包括透明、白色、红色、蓝色、黄色、绿色、灰色、黑色和紫色。根据拉曼识别的结果,对污泥样品中微塑料的材质进行分析,例如聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)、聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)、聚苯乙烯(PS)等。

2 结果和讨论

2.1 污水处理厂对微塑料的总体去除效率

3 个不同污水处理厂对微塑料的去除效果如图 3 所示。1 号污水处理厂的一级处理、二级处理和三级处理对微塑料的去除率分别达到 46%、92% 和 96%。可见,一级处理(格栅、沉砂池)和二级处理(生物处理)是去除微塑料的主要工艺,三级处理膜生物反应器(MBR)仅贡献 4% 的去除率。2 号污水处理厂和 3 号污水处理厂虽然采用的具体工艺和 1 号并不完全相同,但其各个阶段的去除率都比较接近。这说明常规的污水处理工艺对微塑料具有显著的去除效果。Jiang 等^[6]调查了国内的 4 座市政污水处理厂,统计发现这些污水处理厂对微塑料的去除效率达到 86.9%~95.2%。Yuan 等^[16]研究了南京的 2 座污水处理厂,发现其对微塑料的去除效率达到 97.7% 和 98.5%。本研究调查的污水处理厂中,大部分的大粒径微塑料都在一级处理的沉砂池被沉淀去除,剩余的大部分微塑料在生物处理过程中也被去除^[17]。值得注意的是,出水中仍含有一定浓度的微塑料。1、2 号和 3 号污水处理厂的出水中仍含有 (64 ± 21) 、 (84 ± 29) 个/ m^3 和 (42 ± 10) 个/ m^3 的微塑料。考虑到污水处理厂的水处理量为几万到

几十万 m^3/d ,随同处理尾水排放到环境中的微塑料总量仍非常可观的。

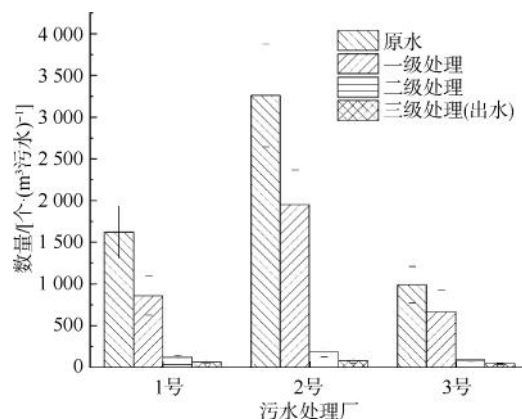


图 3 3 座污水中处理厂微塑料去除率

Fig. 3 Removal Rates of Microplastics in Three WWTPs

污泥中微塑料的浓度如表 1 所示。干污泥中微塑料的浓度分别为 (19.6 ± 8.4) 、 (39.5 ± 15.6) 个/ g 和 (15.9 ± 4.8) 个/ g 。相当于微塑料浓度可达到 1×10^5 个/(kg 干污泥)。已有的研究中,干污泥中微塑料的浓度不尽相同。国外学者^[4]发现,其市政污水处理厂的污泥中微塑料浓度可达 129~238 个/(g 干污泥);而国内研究^[18]发现,西南地区的部分污水处理厂污泥中微塑料浓度仅为 44.4~750.0 个/ kg 。这可能和不同地区污水中微塑料的来源和丰度差异有关。此外,不同研究所采用的筛分方法和检测手段也会影响结果。筛网孔隙越小,所能截留的微塑料就越多,其所测得的微塑料浓度就越高,反之亦然。而采用配备有显微设备的光谱系统,亦能提高小尺寸微塑料的检出率。但毋庸置疑的是,污泥中所含微塑料的浓度普遍高于自然环境土壤。本研究所采样的污泥中所含微塑料浓度比自然土壤所含微塑料要高 1~2 个数量级^[19]。如果这些污泥被排放到环境中,大量的微塑料势必进入到环境介质中,造成环境危害。

表 1 3 座污水处理厂干污泥中微塑料的浓度

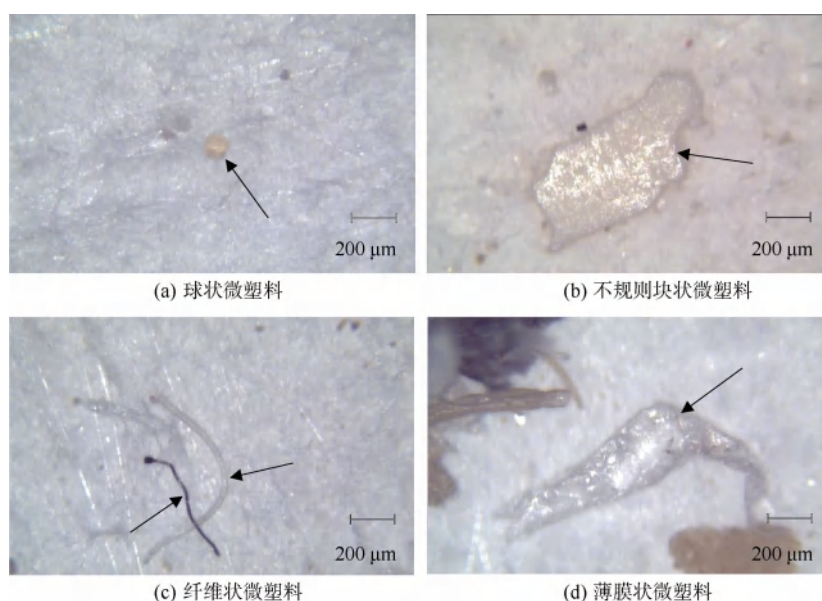
Tab. 1 Concentration of Microplastics in Dry Sludge from Three WWTPs

污水处理厂	微塑料浓度/[个·(g 干污泥) $^{-1}$]
1号	19.6 ± 8.4
2号	39.5 ± 15.6
3号	15.9 ± 4.8

2.2 形状

污泥中的微塑料形状各异, 若干微塑料样品的微观形貌如图 4 所示, 其中包含 4 种形状: 球状、不规则块状、纤维状和薄膜状。这和一些国内的其他污水厂的数据一致^[20]。球状微塑料一般尺寸都比较小[图 4(a)], 其大小为几微米到几十微米, 主要来自于个人护理用品中添加的塑料微球^[21]。个人护理用品在使用之后, 汇集到污水中, 排入污水处理厂。不规则块状微塑料[图 4(b)]则主要来自其他微塑料的降解和老化, 其尺寸各异, 从几微米到几百微米都有分布^[18]。其来源比较复杂, 可能来自于各

种生活和生产过程中塑料制品的老化和降解所剥落分离产生的塑料残渣, 通过污水排放汇集到污水处理厂。纤维状微塑料[图 4(c)]的尺寸分布也较广, 其主要来源为衣物洗涤废水。大部分的现代衣物都是由高分子塑料纤维所构成, 衣物在洗衣机洗涤过程中受到物理机械搅拌和化学药剂(洗衣粉、洗衣液、消毒水等)的浸泡腐蚀, 会老化掉落一些纤维状的碎片, 从而进入到污水中^[22]。薄膜状微塑料[图 4(d)]一般来源于塑料袋和塑料薄膜(大棚、地膜等)。这些薄膜用品所释放的微塑料碎片, 通过雨水冲刷或污水排放过程, 汇集到污水处理厂。



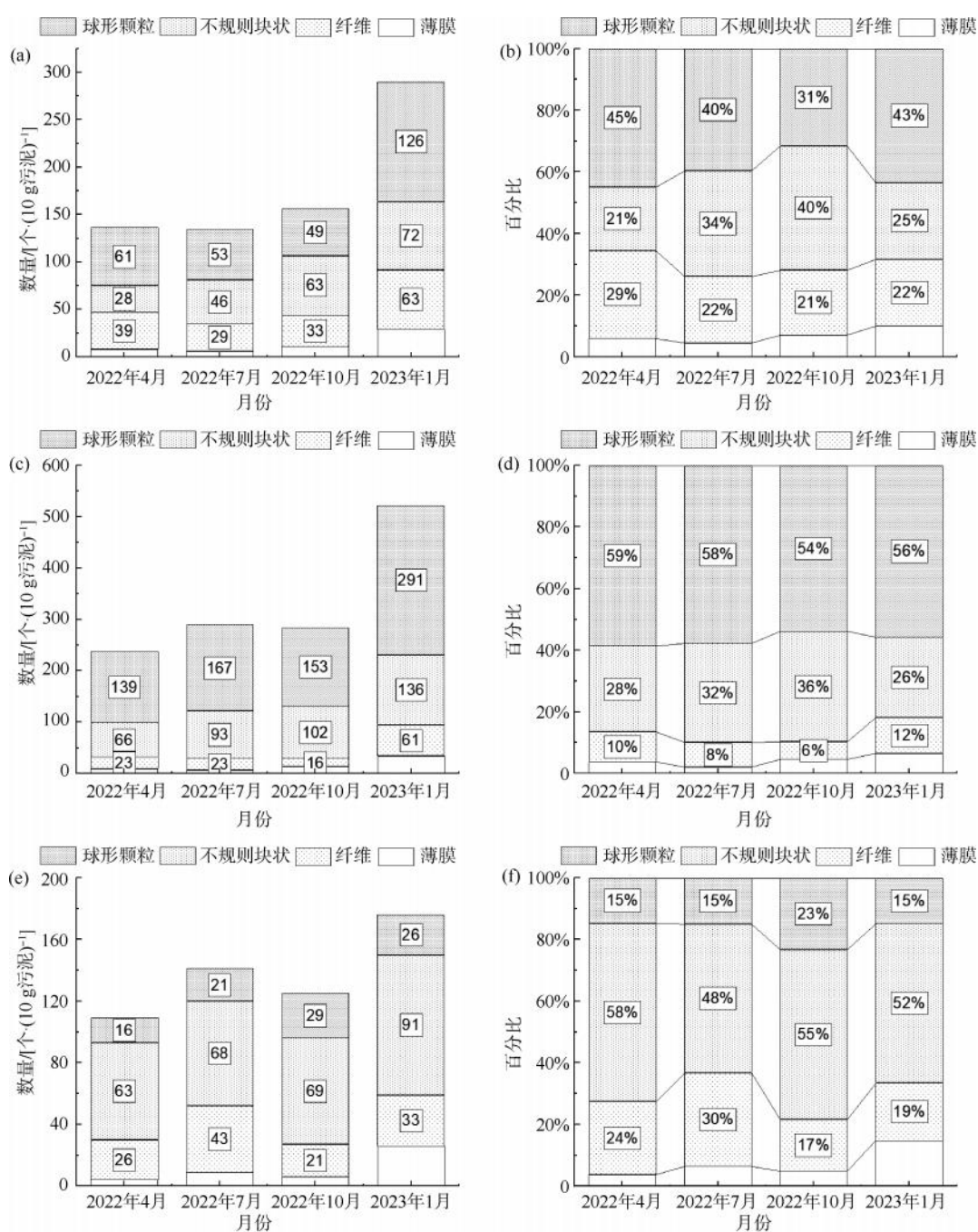
注: 图片所展示碎片均经过拉曼光谱识别并确认为塑料材质。

图 4 典型微塑料微观形貌

Fig. 4 Micromorphology of Typical Microplastics

不同的污水处理厂污泥中的微塑料呈现不同的统计分布规律(图 5)。1 号污水处理厂的污泥样品中, 球状、不规则块状和纤维状微塑料是主要成分, 其中, 球状颗粒占比为 31%~45%, 不规则块状占比为 21%~40%。球状颗粒主要来自于初级微塑料, 即通过工业生产专门制造的微球状微塑料颗粒。不规则块状的微塑料, 则主要来自于次级微塑料, 即由其他常规尺寸塑料或者微塑料降解破碎所生成。这部分微塑料可能是塑料用品在使用过程中破碎所生成, 也可能是塑料在污水处理过程中降解老化所生成, 既包含生活污水来源, 也可能来自工业生产过程。纤维状的微塑料占比为 21%~29%, 其主要来源于衣物和纤维制品洗涤过程, 是生活污水的主要

成分。而薄膜状微塑料则为少数, 其来源为薄膜塑料袋的分解和降解。所观察到的形状分布特征, 说明 1 号污水处理厂的微塑料主要来自于生活污水, 2 号污水处理厂同样以生活污水为主。其中, 球状颗粒的比例提高到 54%~59%, 而不规则块状的微塑料的比例则与 1 号污水处理厂接近。这说明其来源于个人护理清洗的污水比例相对于 1 号污水处理厂要高。3 号污水处理厂则有所不同, 球状颗粒微塑料的比例降低到 15%~23%, 说明其来自于个人护理的污水比较少。同时, 来自于衣物洗涤的纤维状微塑料比例则与 1 号污水处理厂持平。值得注意的是, 不规则块状微塑料的比例为 48%~58%, 远高于 1 号污水处理厂和 2 号污水处理厂。这个比例分布



注:(a)和(b)表示1号污水处理厂,(c)和(d)表示2号污水处理厂,(e)和(f)表示3号污水处理厂,下同。

图5 微塑料形状分布

Fig. 5 Shapes Distribution of Microplastics

说明3号污水处理厂与1号污水处理厂和2号污水处理厂的污水来源显著不同。3号污水处理厂接纳了不少工业产业,包括智能汽车制造、芯片制造和智慧物流等。这些产业所排放的污水中可能含有各种材质的塑料制品所老化破碎所生成的微塑料,这些微塑料形状各异,所以都被归入不规则块状的种类

中。以上结果表明,污水来源的差异会显著影响其剩余污泥中微塑料的形状特性。

2.3 尺寸

污泥中的微塑料污染物尺寸分布如图6所示。总体上,3座污水处理厂的微塑料以小尺寸为主,包括1~10 μm和10~50 μm。例如,2号污水处理厂

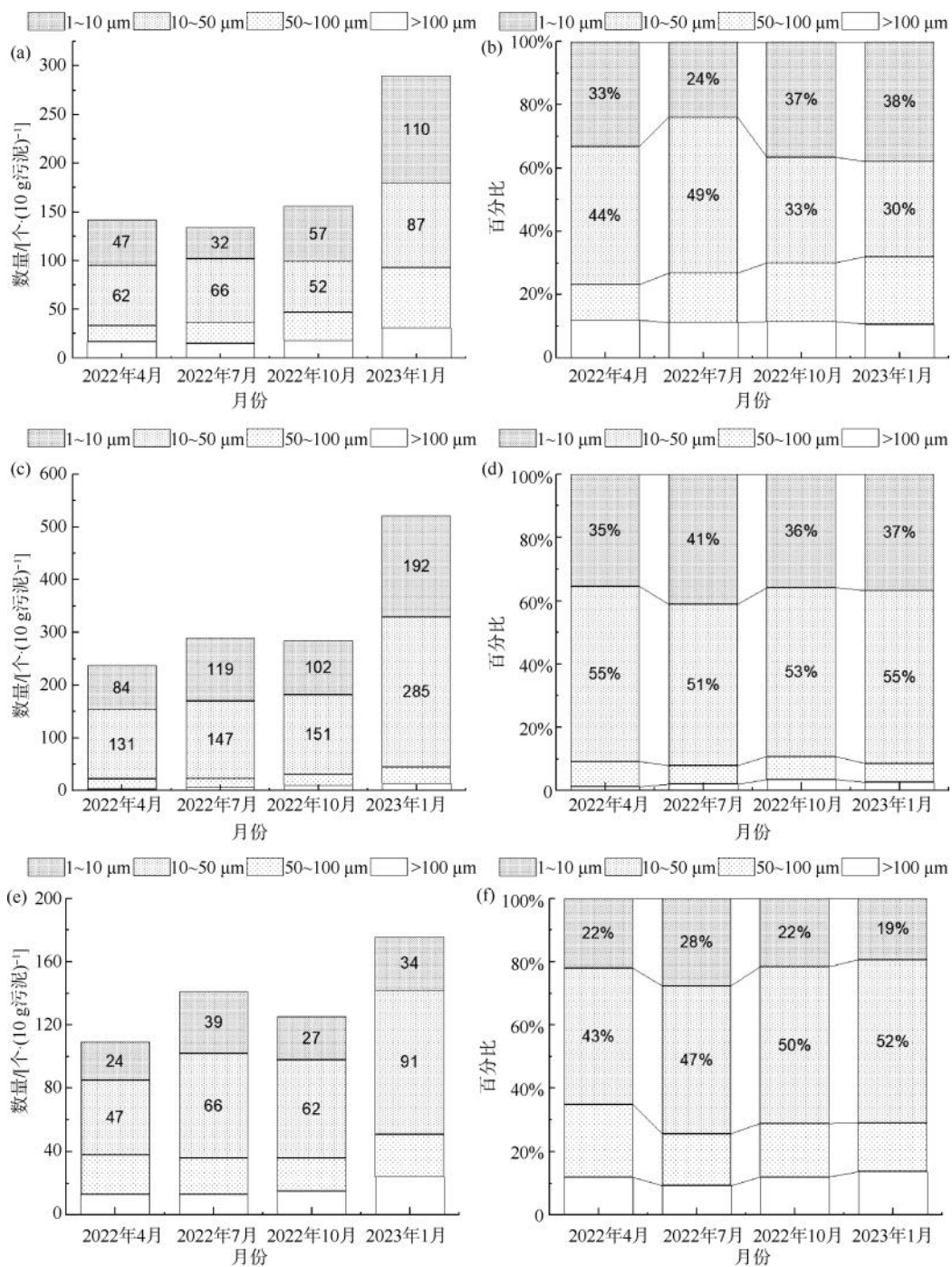


图6 微塑料尺寸分布

Fig. 6 Sizes Distribution of Microplastics

所采的样品中,这2个尺寸的微塑料占比例约为80%。相反的,较大尺寸的微塑料(50~100 μm和>100 μm)则仅占20%不到,值得注意的是,10 g干污泥中,往往只含有若干个粒径>100 μm的微塑料。这说明常规污水处理过程中,通过常规一级处理、二级处理等分离并转移到污泥中的微塑料,小尺寸占

了主要比例。这可能是多方面原因造成:首先,较大尺寸的微塑料,在物理分离过程,例如格栅、沉砂池等过程中被去除,而这些分离过程的残渣并不会进入到剩余污泥中;其次,一部分大尺寸的微塑料,可能在生物处理以及污泥的浓缩、干化和机械脱水等过程中,发生断裂从而形成小尺寸微塑料。

然而,1号污水处理厂和3号污水处理厂的大尺寸微塑料的比例比2号污水处理厂要高,在分析过程中发现大量大尺寸微塑料以纤维状微塑料为主。结合形状数据(图5),1号污水处理厂和3号污水处理厂污泥中含有较多的纤维状微塑料,这是造成大尺寸微塑料比例较高的原因。而2号污水处理厂纤维状微塑料含量则较少,因此以小尺寸微塑料为主。从时间尺度上分析,总体上不同污水处理厂在不同时间点的样品尺寸分布较为接近。

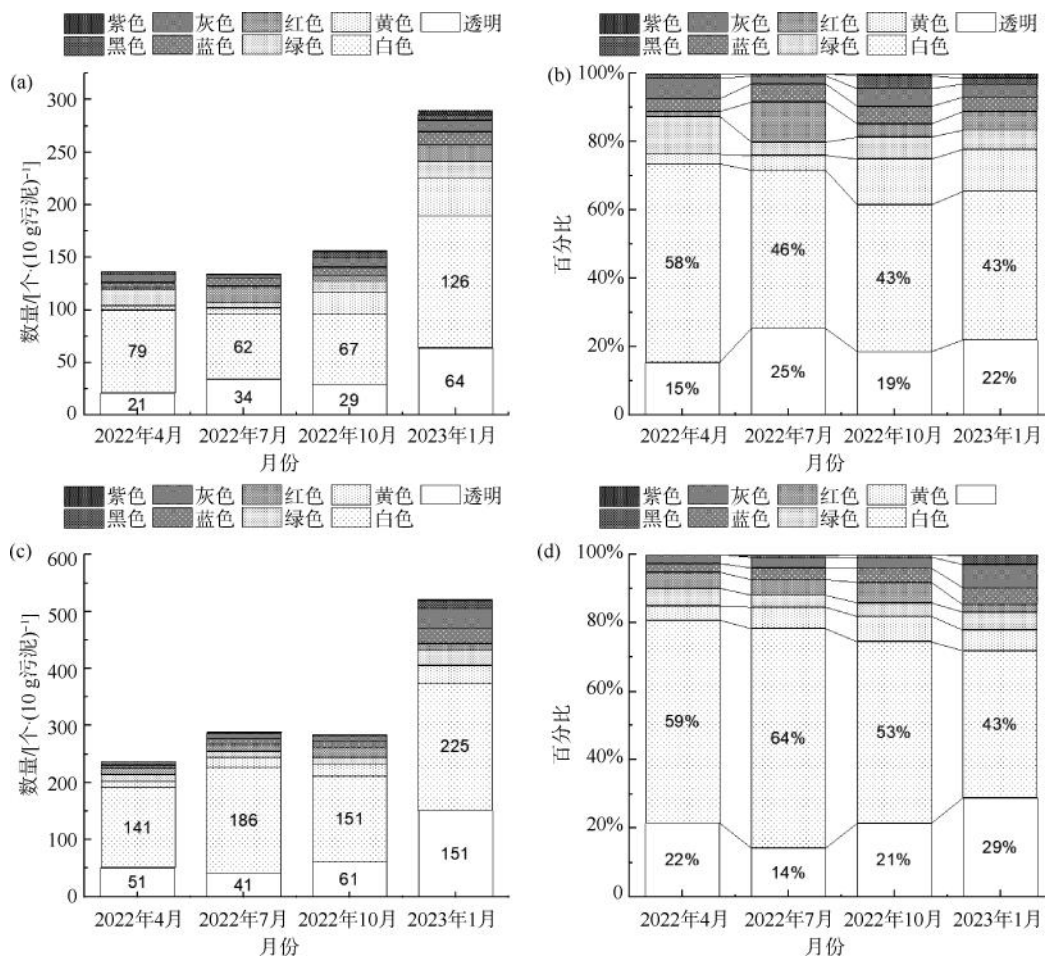
2.4 颜色

3座污水处理厂污泥中微塑料的颜色分布如图7所示。其中透明和白色的微塑料占绝对优势。例如,1号污水处理厂的样品中,透明微塑料占比为15%~25%,白色微塑料占比为43%~58%。其他2座污水处理厂也具有类似的情况。各领域所采用的塑料制品都是以透明和白色为主,即使是各种颜色的塑料,也是由透明和白色的塑料添加色素和金属所合成。而自然环境或者使用过程中,塑料的老化

和降解会导致其中的显色化学成分逐渐降解并从塑料中释放,从而发生褪色现象。因此,这些塑料制品所形成的微塑料会呈现白色或无色。其他颜色的微塑料,如红色、黄色、绿色等也具有一定的比例。这些都说明,污水处理厂污泥中微塑料的主要来源以生产生活过程中所形成的微塑料污染物为主。

2.5 材质

污水中常见的微塑料材质有PE、PP、PET、聚氯乙烯(PVC)等。因此,污水处理厂污泥中的微塑料也以这些材质的微塑料为主(图8)。由图9可知,各个污水厂排名前2的微塑料为PE和PP,而其他材质的微塑料则占小部分。例如,1号污水处理厂的PE材质微塑料占比为37%~56%,PP微塑料占比为21%~33%,这2类材质的微塑料占比可达70%~80%。其他2个污水处理厂也有类似的分布情况。Wei等^[18]调查了成都的污水处理厂,发现PE、PP和PS为污泥中主要的微塑料材质。而其他一些研究^[17,23]也发现污水处理厂的微塑料以PE、PP、PET等为主。这些材质分布和污水处理厂微塑



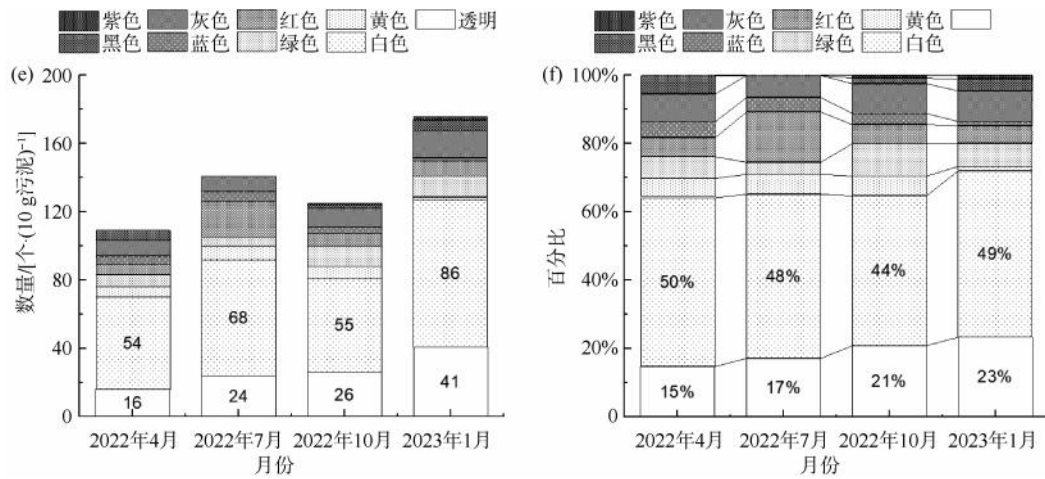


图7 微塑料颜色分布

Fig. 7 Color Distribution of Microplastics

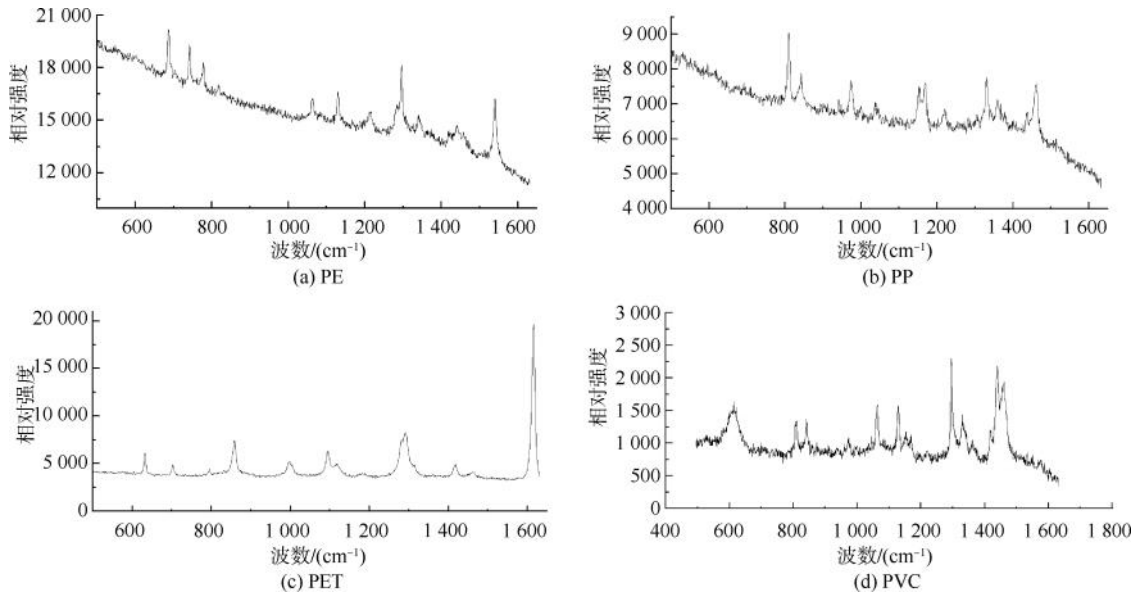


图8 3座污水处理厂微塑料部分材质的拉曼光谱

Fig. 8 Raman Spectroscopy of Some Microplastics Materials in Three WWTPs

料的来源有密切关联。污水处理厂的微塑料主要来源有衣物洗涤过程所释放的碎片、日常护理用品所含的塑料微球等,这些微塑料的主要材质为PE、PP、PS、PET等。因此,污水处理厂污泥的微塑料与污水中的微塑料材质构成相一致,具有显著的同源性。

各个污水处理厂不同季节的样品中,微塑料材质分布具有显著差异。例如1号污水处理厂中PE微塑料比例在春、夏、秋、冬四季的占比分别为50%、56%、37%、37%,而PP的占比为27%、21%、33%、30%。而2号污水处理厂的变化具有更独特

的模式,春、夏、秋、冬四季样品中PE的比例为68%、70%、60%、41%,而PP的占比从11%增加到39%。这些结果说明,污水处理厂中微塑料的材质随着不同季节会发生改变,这和接纳污水的来源变化密切相关。居民在不同季节时使用日常用品习惯存在差异,从而改变排放进入污水中的微塑料材质;不同季节的降雨所带来的部分雨水也可能进入污水处理厂,其所含微塑料可能影响污水中微塑料的材质分布。其他的各种因素也可能造成影响。

在其他材质中,有一些值得注意的塑料材质。例如,衣物常见的尼龙以及工业上常见的环氧树脂、

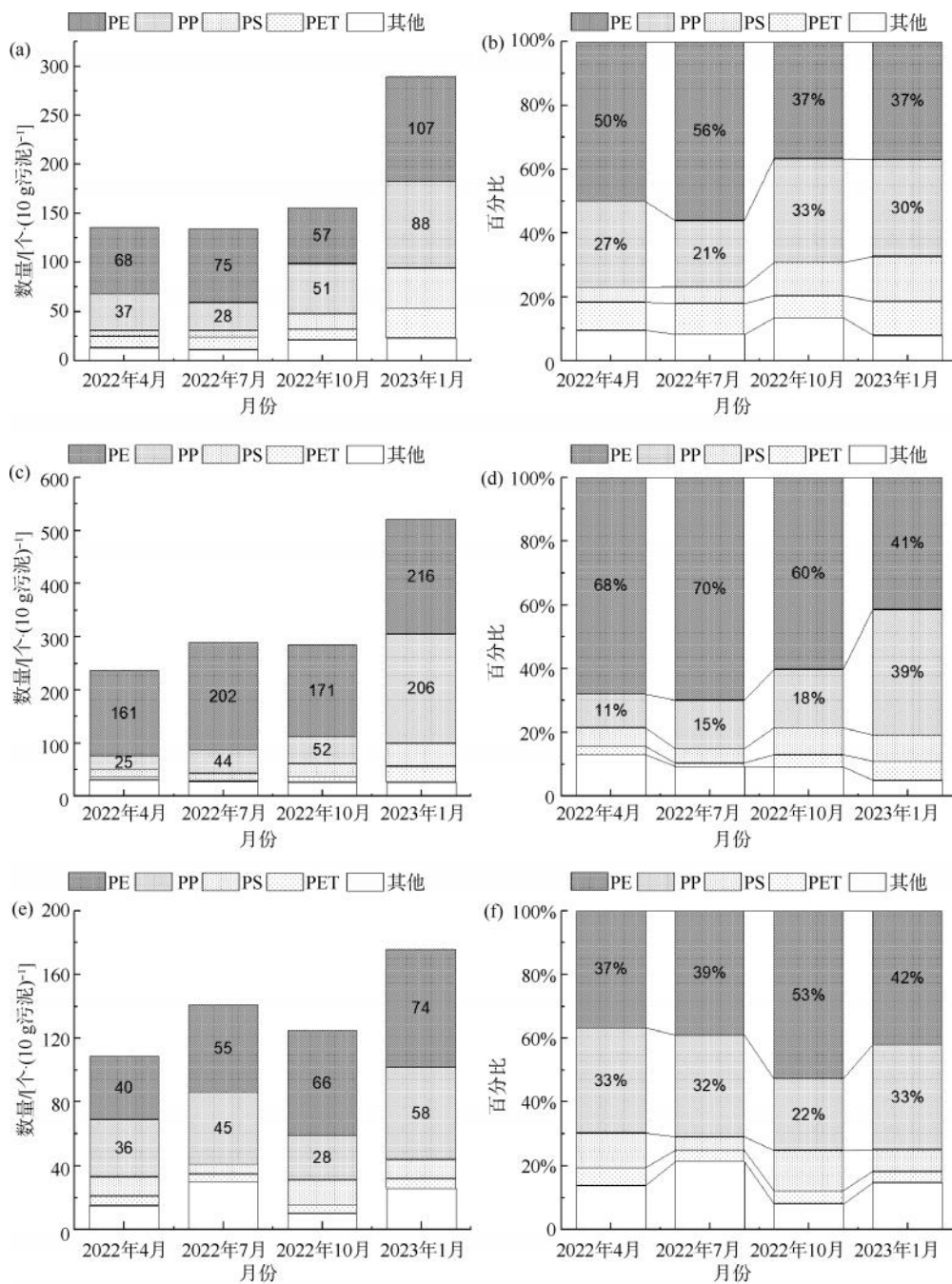


图9 微塑料材质分布

Fig. 9 Material Distribution of Microplastics

聚丙烯酰胺等,甚至还有工程树脂。各种材质的微塑料检出,证明了这几座污水处理厂微塑料的复杂来源,接纳了生活污水、工业废水,甚至是雨水,而这些污水中的微塑料,在经过污水处理厂的各种处理之后,都被分离浓缩到了剩余污泥中。

3 结论

3座不同污水处理厂的微塑料特征,与其污水

来源具有密切关联。1号污水处理厂和2号污水处理厂主要接纳城镇生活污水,其微塑料污染物以球状和纤维状的微塑料为主,而3号污水处理厂则收集部分的工业废水,因此,其微塑料污染物中不规则块状的微塑料比例较高,可能是来自污水厂周边的各种工业产业。污水来源不同,也影响了微塑料污染物的尺寸和颜色分布。但是,3座污水处理厂微

塑料污染的材质分布无显著差异。

污水的来源显著影响了其污水处理过程中所截留的微塑料分布特征。针对污泥的分析结果, 指示出污水处理厂微塑料污染的复杂性。污水中的大部分污泥, 经过各种污水处理工艺后, 都被分离并富集到剩余污泥中。经过一系列的污泥处理之后, 污泥中的微塑料仍未被降解和矿化, 大部分最后都保留在污泥的残渣中。污泥的最终处置包括生物肥料、建筑材料、垃圾焚烧等^[24]。可以预测污泥中的微塑料仍有一部分最终进入到自然环境, 其环境效应和危害仍值得注意。

参考文献

- [1] 韩伟朋, 杨庆, 刘秀红, 等. 污水处理厂中的微塑料来源研究进展[J]. 净水技术, 2023, 42(4): 23-30, 150.
HAN W P, YANG Q, LIU X H, et al. Research progress on the sources of microplastics in WWTPs [J]. Water Purification Technology, 2023, 42(4): 23-30, 150.
- [2] 于颖, 赵奕锦, 董志强, 等. 水厂与污水厂对水体中微塑料的去除处理技术研究进展[J]. 净水技术, 2023, 42(6): 45-56.
YU Y, ZHAO Y J, DONG Z Q, et al. Research progress of treatment technologies for removal of microplastics from water bodies in WTPs and WWTPs [J]. Water Purification Technology, 2023, 42(6): 45-56.
- [3] TURAN N B, ERKAN H S, ENGIN G O. Microplastics in wastewater treatment plants; Occurrence, fate and identification [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2021, 146: 77-84. DOI: 10.1016/j.psep.2020.08.039.
- [4] PETROODY S S A, HASHEMI S H, VAN G C A M. Transport and accumulation of microplastics through wastewater treatment sludge processes[J]. Chemosphere, 2021, 278: 130471. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.130471.
- [5] ZHANG Z Q, CHEN Y G. Effects of microplastics on wastewater and sewage sludge treatment and their removal; A review[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 382: 122955. DOI: 10.1016/j.cej.2019.122955.
- [6] JIANG L, CHEN M L, HUANG Y, et al. Effects of different treatment processes in four municipal wastewater treatment plants on the transport and fate of microplastics[J]. Science of the Total Environment, 2022, 831: 154946. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.154946.
- [7] HARLEY-NYANG D, MEMON F A, BAQUERO A O, et al. Variation in microplastic concentration, characteristics and distribution in sewage sludge & biosolids around the world[J]. Science of the Total Environment, 2023, 891: 164068. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.164068.
- [8] KARBALAEI S, HANACHI P, WALKER T R, et al. Occurrence, sources, human health impacts and mitigation of microplastic pollution[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(36): 36046-36063.
- [9] HU C J, GARCIA M A, NIHART A, et al. Microplastic presence in dog and human testis and its potential association with sperm count and weights of testis and epididymis [J]. Toxicological Sciences, 2024, 200(2): 235-240.
- [10] WEINGRILL R B, LEE M J, BENNY P, et al. Temporal trends in microplastic accumulation in placentas from pregnancies in Hawai'i[J]. Environment International, 2023, 180: 108220. DOI: 10.1016/j.envint.2023.108220.
- [11] LI R, YU L, CHAI M, et al. The distribution, characteristics and ecological risks of microplastics in the mangroves of Southern China[J]. Science of the Total Environment, 2020, 708: 135025. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135025.
- [12] YANG H, XUE Q S, LU F Q, et al. Detection of microplastic samples based on spatial heterodyne microscopic differential Raman spectroscopy[J]. Journal of Raman Spectroscopy, 2023, 54(10): 1090-1098.
- [13] SUN J, DAI X, WANG Q, et al. Microplastics in wastewater treatment plants; Detection, occurrence and removal[J]. Water Research, 2019, 152: 21 - 37. DOI: 10.1016/j.watres.2018.12.050.
- [14] 姚情璐, 杨超, 翟宇辉, 等. 环境水体中微塑料分析方法研究进展[J]. 净水技术, 2022, 41(10): 23-28, 75.
YAO Q L, YANG C, ZHAI Y H, et al. Research progress on analytical methods of microplastics in environmental water body [J]. Water Purification Technology, 2022, 41(10): 23-28, 75.
- [15] DOU P C, MAI L, BAO L J, et al. Microplastics on beaches and mangrove sediments along the coast of South China[J]. Marine Pollution Bulletin, 2021, 172: 112806. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2021.112806.
- [16] YUAN F, ZHAO H, SUN H B, et al. Abundance, morphology, and removal efficiency of microplastics in two wastewater treatment plants in Nanjing, China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(8): 9327-9337.
- [17] ZHANG B R, WU Q X, GAO S L, et al. Distribution and removal mechanism of microplastics in urban wastewater plants systems via different processes [J]. Environmental Pollution, 2023, 320: 121076. DOI: 10.1016/j.envpol.2023.121076.
- [18] WEI F, XU C, CHEN C, et al. Distribution of microplastics in the sludge of wastewater treatment plants in Chengdu, China[J]. Chemosphere, 2022, 287: 132357. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.132357.
- [19] 姜晓旭, 封雪, 周笑白, 等. 土壤中微塑料污染现状与检测技术研究进展[J]. 环境化学, 2023, 42(1): 163-175.
JIANG X X, FENG X, ZHOU X B, et al. Research progress on

- pollution status and analysis method for microplastics in soil[J]. *Environmental Chemistry*, 2023, 42(1): 163-175.
- [20] YUAN F, ZHAO H, SUN H B, et al. Investigation of microplastics in sludge from five wastewater treatment plants in Nanjing, China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 301: 113793. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.113793.
- [21] DING N, AN D, YIN X F, et al. Detection and evaluation of microbeads and other microplastics in wastewater treatment plant samples [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(13): 15878-15887.
- [22] PRATA J C, GODOY V, COSTA J P D, et al. Microplastics and fibers from three areas under different anthropogenic pressures in Douro river [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 776: 145999. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.145999.
- [23] YANG F, LI D D, ZHANG Z X, et al. Characteristics and the potential impact factors of microplastics in wastewater originated from different human activity [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2022, 166: 78-85. DOI: 10.1016/j.psep.2022.07.048.
- [24] HARLEY-NYANG D, MEMON F A, JONES N, et al. Investigation and analysis of microplastics in sewage sludge and biosolids; A case study from one wastewater treatment works in the UK [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 823: 153735. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.153735.
-
- (上接第 83 页)
- [8] 龚敏. 70%多孔弹性滤料-活性炭联合工艺应用于饮用水深度处理效果的研究[J]. *环境与发展*, 2018, 30(3): 114-116.
- GONG M. 70% porous elastic filter-activated carbon combined process used in drinking water study on the effect of depth treatment [J]. *Environmental & Development*, 2018, 30(3): 114-116.
- [9] 李劭, 申世峰, 郭兴芳, 等. UV₂₅₄ 在工业集聚区废水中的指示作用[J]. *资源节约与环保*, 2021, 36(10): 87-89.
- LI L, SHEN S F, GUO X F, et al. The indicative function of UV₂₅₄ in wastewater of industrial agglomeration area [J]. *Resource Saving and Environmental Protection*, 2021, 36(10): 87-89.
- [10] 罗海斌. 臭氧/紫外-活性炭去除水中 UV₂₅₄ 的效能研究[J]. *炭素*, 2017(2): 39-42.
- LUO H B. Study on removal efficiency of UV₂₅₄ in water by ozone/UV-activated carbon [J]. *Carbon*, 2017(2): 39-42.
- [11] 李绍全. 滤液浊度对 UV₂₅₄ 和 SUVA₂₅₄ 测定的影响[J]. *工业水处理*, 2006, 26(4): 90-90.
- LI S Q. The effect of filtrate turbidity on the determination of UV₂₅₄ and SUVA₂₅₄ [J]. *Industrial Water Treatment*, 2006, 26(4): 90-90.
- [12] YANG N C, HO W M, CHEN Y H, et al. A convenient one-step extraction of cellular ATP using boiling water for the luciferin-luciferase assay of ATP [J]. *Analytical Biochemistry*, 2002, 306(2): 323-327.
- [13] ZHANG Z Y. Mechanistic studies on protein tyrosine phosphatases [J]. *Progress in Nucleic Acid Research and Molecular Biology*, 2003, 73: 171-220. DOI: 10.1016/s0079-6603(03)01006-7.
- [14] 冯敏, 高岳, 吕海燕, 等. ATP 发光技术测定辐照前脱水蔬菜和调味品的含菌量[J]. *核农学报*, 2005, 19(4): 282-285.
- FENG M, GAO Y, LÜ H Y, et al. The rapid bioluminescence assay method for content of bacteria in dehydrated vegetable and condiment before radiation [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2005, 19(4): 282-285.
- [15] WANG Q, GARRITY G M, TIEDJE J M, et al. Naive Bayesian classifier for rapid assignment of rRNA sequences into the new bacterial taxonomy [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2007, 73(16): 5261-5267.