

# 典型污水处理厂微塑料赋存特征研究

殷伟庆<sup>1,2</sup>, 解清杰<sup>1\*</sup>, 苏洁<sup>1</sup>

(1. 江苏大学, 江苏 镇江 212001; 2. 江苏省镇江环境监测中心, 江苏 镇江 212009)

**摘要:**于2021年对镇江市3家典型污水厂水样开展微塑料调查,采用电子显微镜和拉曼光谱仪对水样进行检测分析。结果表明:样品中检出14种微塑料,其中聚乙烯(PE)占比在40%左右,聚丙烯(PP)、聚苯乙烯(PS)、聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)等的占比在5%~40%,尼龙(PA)、聚碳酸酯(PC)、聚甲醛(POM)、聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)等占比相对较低;A厂、B厂、C厂进水中微塑料丰度分别为2 226, 2 263, 1 950 n/L(个/L),经过污水厂各级处理后,微塑料去除率分别为92.1%, 82.5%, 91.3%;微塑料主要以纤维状为主,占比均在80%左右;颗粒和不规则形状次之;微塑料颜色以彩色、透明居多,无确切规律。

**关键词:**微塑料;污水处理厂;赋存特征;去除效率

中图分类号:X703

文献标志码:B

文章编号:1674-6732(2022)02-0063-07

## Analysis of Microplastic Occurrence in Typical Wastewater Treatment Plants

YIN Wei-Qing<sup>1,2</sup>, XIE Qing-Jie<sup>1\*</sup>, SU Jie<sup>1</sup>

(1. Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212001, China; 2. Zhenjiang Environmental Monitoring Center of Jiangsu Province, Zhenjiang, Jiangsu 212009, China)

**Abstract:** Microplastics investigation was carried out on water samples from three typical wastewater treatment plants in Zhenjiang City in 2021, and the water samples were detected and analyzed by electron microscopy and Raman spectroscopy. The results showed that a total of 14 microplastics were detected in the samples, of which polyethylene (PE) accounted for about 40%, polypropylene (PP), polystyrene (PS), polyethylene terephthalate (PET), etc. accounted for 5%~40%, and nylon (PA), polycarbonate (PC), polyformaldehyde (POM), polymethyl methacrylate (PMMA) and other plastics accounted for a relatively low percentage; the abundance of microplastics in the influent water of plants A, B and C were 2 226, 2 263, 1 950 n/L, and the removal rate of microplastics was 92.1%, 82.5%, 91.3% respectively after treatment at all levels in the wastewater plant; microplastics were mainly fibrous, accounting for about 80%, with granules and irregular shapes second; the color of microplastics was mostly colored and transparent, with no exact rule.

**Key words:** Microplastics; Wastewater Treatment Plant; Occurrence characteristic; Removal rate

塑料制品在人类社会中已经有80年的使用历史,塑料进入自然环境后,将在物理、化学和生物反应的作用下缓慢分解并产生许多尺寸较小的塑料碎片,其中部分尺寸<5 mm的塑料颗粒、纤维或碎片,被称为微塑料,由于微塑料细微且分布范围广,人类一直忽略其存在。目前关于微塑料的来源、污染治理等问题研究仍然处于起步阶段,尚无明确和系统的结论<sup>[1]</sup>。污水处理厂被认为是陆地微塑料进入自然水生系统之前的主要环节,通常情况下

90%左右的微塑料在污水处理过程中被去除。尽管去除率很高,但由于处理后的污水不断排放,尾水中仍含有大量微塑料,最终在自然环境中累积<sup>[2-4]</sup>。因此,摸清污水处理厂微塑料赋存情况,对解决微塑料污染问题具有重要意义。现以镇江市典型污水处理厂作为研究对象,对其中微塑料的赋存特征进行研究,以期微塑料的溯源及进一步研究提供数据支撑。

收稿日期:2021-11-18;修订日期:2022-01-14

基金项目:江苏省环境监测基金资助项目(2114)

作者简介:殷伟庆(1981-),男,高级工程师,硕士,主要从事环境监测工作。

\* 通讯作者:解清杰 E-mail: xieqingjie73@163.com

## 1 研究方法

### 1.1 采样时间

2021 年 1—6 月,每月中旬对镇江市 3 个典型污水处理厂 A、B、C 进行 1 次采样。

### 1.2 采样点位

对 A、B、C 污水处理厂污水处理工艺单元的污

水及污泥进行采样,并对微塑料进行鉴定,A 厂采用开普敦大学 (UCT) 工艺,B 厂采用百乐克 (BIOLAK) 工艺,C 厂采用厌氧-缺氧-好氧 (A<sup>2</sup>/O) 工艺。

每个污水处理厂选取 7 处采样点,A、B、C 污水处理厂工艺流程图及采样点位示意图 1。

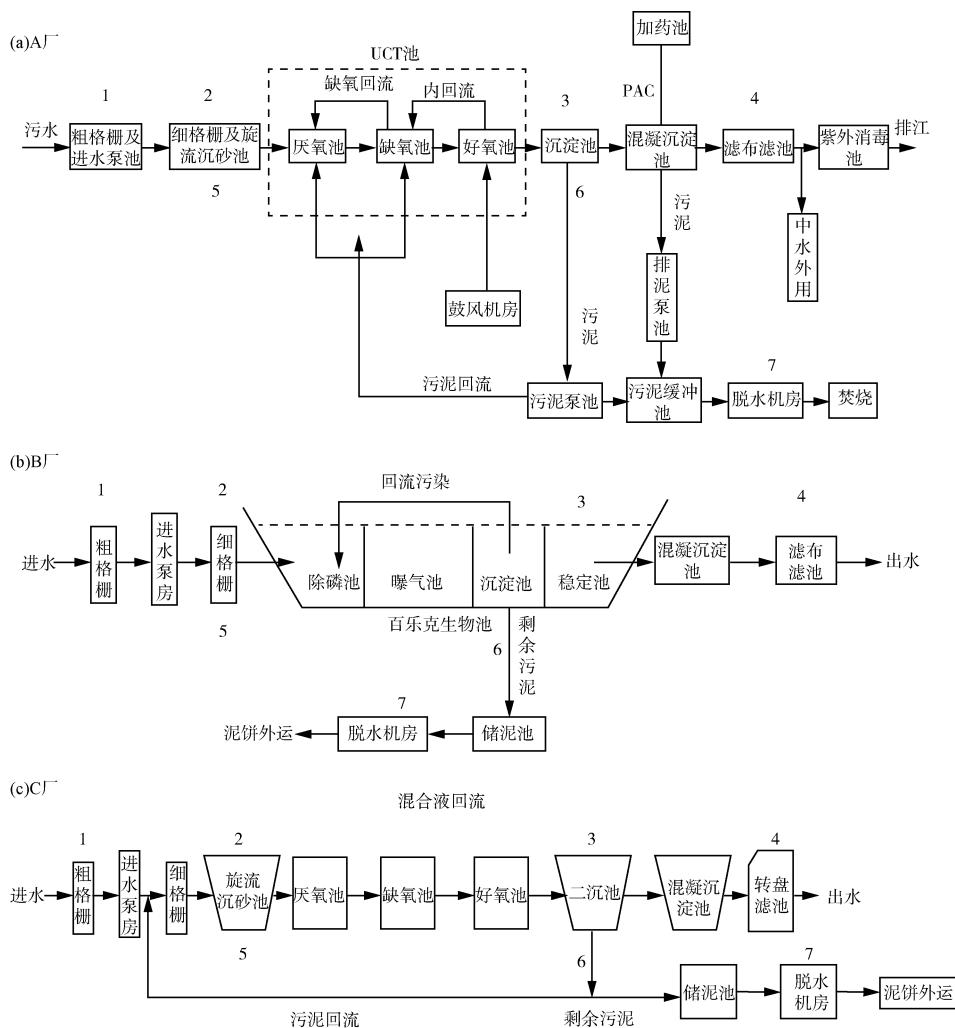


图 1 A、B、C 污水处理厂工艺流程图及采样点位设置

水样采样工艺单元设置为粗格栅、沉砂池、二沉池以及滤布滤池,采集位置均为出水口,各采样点分别对应污水处理厂进水、一级处理、二级处理和三级处理水质情况。其中,沉砂池、生化池、污泥干化间,分别代表一级处理污泥、二级处理活性污泥、干污泥。

### 1.3 仪器与试剂

仪器:金相显微镜(CX40MRT,舜宇光学科技

有限公司);台式放大镜(ZQ-86CY,致旗数码有限公司);超声波清洗器(KQ-250DE,昆山市超声仪器有限公司);电子天平[BS124S,赛多利斯科学仪器(北京)有限公司];激光显微拉曼光谱仪(DXR,美国赛默飞世尔科技公司)。

试剂:30%过氧化氢(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>),氯化钠(NaCl),均为分析纯,国药集团化学试剂有限公司生产。选用 100 μm 的聚苯乙烯(polystyrene,PS)微球作为

加标回收实验微塑料。

### 1.4 定量分析

水体中微塑料的丰度单位以每升微塑料个数表示,其计算公式如下:

$$A = (N/V) \times 1\ 000 \quad (1)$$

式中:  $A$ ——水体中微塑料的丰度,  $n/L$  (个/ $L$ );  $N$ ——微塑料目标物的个数, ind;  $V$ ——过滤水的总体积,  $mL$ 。

去除率的计算公式如下:

$$\text{去除率} = (A_1 - A_2)/A_1 \times 100 \quad (2)$$

式中:  $A_1$ ——原水体中微塑料的丰度,  $n/L$ ;  $A_2$ ——处理后水体中微塑料的丰度,  $n/L$ 。

### 1.5 微塑料计数

开始计数前,将滤膜上抽滤时形成的圆斑四等分,每次选择 1/4 圆斑进行计数,最后对圆斑内的疑似微塑料数量进行求和,得到水样中疑似微塑料的总数。对于疑似微塑料的检测,每个样品设置 3~4 组平行样,当计数差异偏差较大时舍去 1 组差异较大的测样数值。

计数同时展开分类记录工作,镜检过程中微塑料的主要形貌特征见图 2。由图 2 可见,从颜色、形状和尺寸 3 个维度进行分类,其中,颜色又分为彩色、黑色和透明;形状分为颗粒、纤维和不规则碎片;尺寸分为 20~100  $\mu m$ , 100~500  $\mu m$ , >500  $\mu m$ ,记录符合研究特性的疑似微塑料物质。

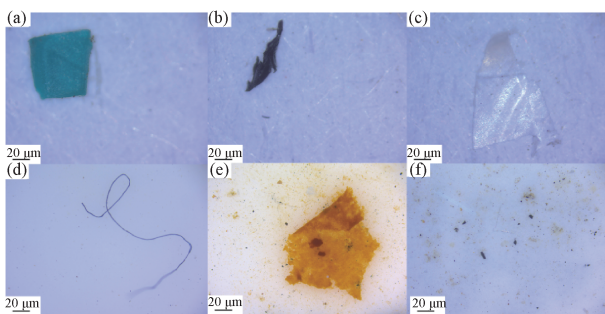


图 2 镜检计数中微塑料主要形貌特征

## 2 结果与讨论

### 2.1 拉曼光谱检测分析

采取随机抽样,对 3 家污水处理厂各采样单元水样及泥样中的疑似微塑料,各随机抽取 50 个,共计 350 个样品,光谱检测分析结果见表 1。由表 1 可见,3 家污水处理厂各样品中微塑料的平均占比分别为 24.3%,27.7%,25.7%。对 150 个疑似微塑料进行光谱分析,其中微塑料成分的占比为 25.9%,说明在显微镜镜检计数的疑似微塑料中,微塑料约占 1/4,其他物质占据大多数。

表 1 光谱分析结果统计

| 单元       | 总数/个 | 微塑料数占比/% |      |      |
|----------|------|----------|------|------|
|          |      | A        | B    | C    |
| 进水       | 50   | 26.0     | 28.0 | 25.0 |
| 沉砂池      | 50   | 22.0     | 26.0 | 18.0 |
| 二沉池      | 50   | 18.0     | 26.0 | 26.0 |
| 滤池出水     | 50   | 20.0     | 18.0 | 20.0 |
| 一级处理污泥   | 50   | 30.0     | 28.0 | 26.0 |
| 二级处理活性污泥 | 50   | 32.0     | 30.0 | 34.0 |
| 干污泥      | 50   | 28.0     | 38.0 | 32.0 |
| 平均占比/%   |      | 24.3     | 27.7 | 25.7 |

对进水中 150 个微塑料进行拉曼光谱检测分析,通过与微塑料标准谱图库对比,共计检测出 14 种微塑料,不同聚合物类型的分布情况见图 3。由图 3 可见,含量最为丰富的微塑料聚合物是聚乙烯(PE),约占 40% 左右;丙烯(PP)、聚苯乙烯(PS)、聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)等的占比在 5%~40% 不等。PE、PP、PS 主要用于制造食品包装袋、塑料餐具及塑料瓶等,PET 是涤纶、纤维、塑料瓶等制品的加工原材料,来源于家用纺织品、衣物、饮料瓶、矿泉水瓶等。这些聚合物均为生活中常见塑料制品的加工原材料,这也解释了其在污水中占比较高的原因。此外,尼龙(PA)、聚碳酸酯(PC)、聚-丙烯腈-丁二烯-苯乙烯(ABS)、聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)等聚合物也有少量检出,但占比相对较

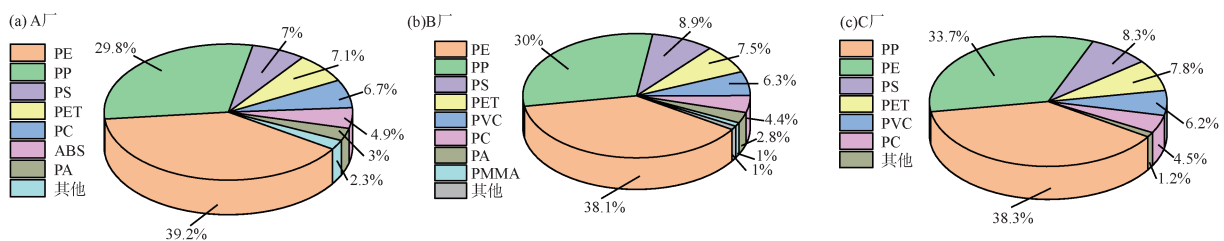


图 3 3 家污水处理厂不同聚合物类型微塑料分布情况

低,均在 10% 以下,这些微塑料常见于电子电气、汽车工业、仪器仪表制品等。

## 2.2 丰度及去除率分析

3 家污水处理厂微塑料丰度及去除率见图 4 (a)(b)(c)。

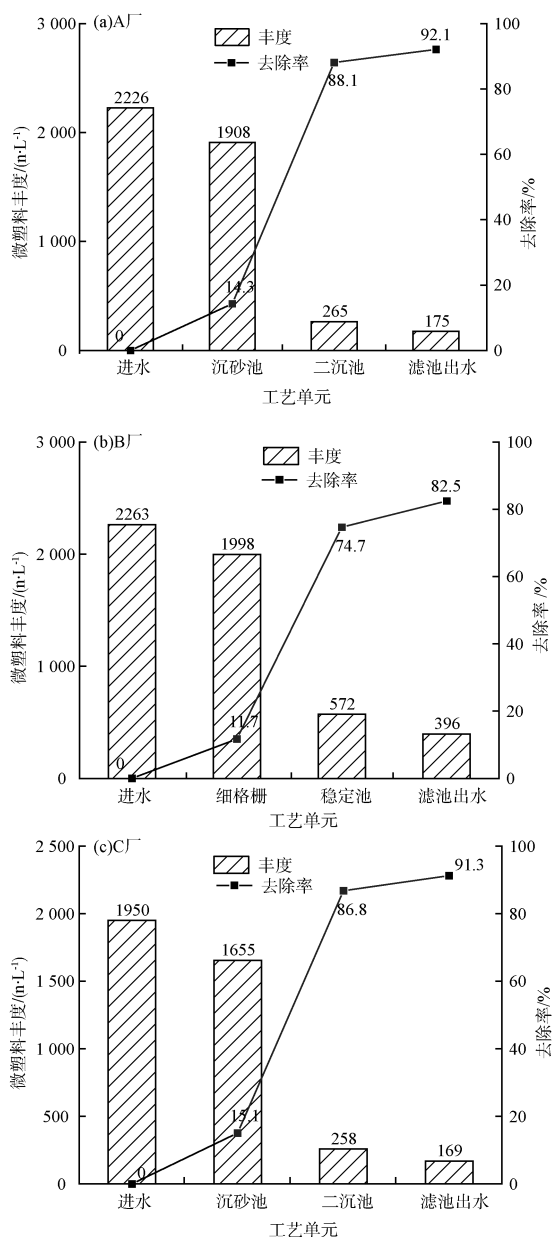


图 4 3 家污水处理厂中微塑料丰度及去除率

由图 4(a) 可见, A 厂进水中微塑料的丰度为 2 226 n/L, 一级处理包括粗格栅、细格栅机械拦截, 以及旋流沉砂池物理沉降分离, 对沉砂池出水进行检测, 微塑料丰度降低为 1 908 n/L, 去除率达 14.3%; 二级处理包括 UCT 生化池和二沉池, 利用

活性污泥法对微塑料进行吸附, 二沉池重力沉淀分离, 出水微塑料含量降为 265 n/L, 去除率达 88.1%; 三级处理设置混凝沉淀池和滤布滤池, 经絮凝、沉淀和过滤后, 微塑料最终出水含量为 175 n/L, 去除率达 92.1%; 由图 4(b) 可见, B 厂进水中微塑料的丰度为 2 263 n/L, 出水微塑料含量降为 572 n/L, 去除率达 74.7%; 出水单元采用加药混凝沉淀池和滤布滤池, 对经絮凝沉淀、过滤后的水样进行检测, 微塑料最终出水含量为 396 n/L, 去除率达 82.5%; 由图 4(c) 可见, C 厂进水中微塑料的丰度为 1 950 n/L, 对沉砂池出水进行检测, 微塑料丰度降低为 1 655 n/L, 去除率达 15.1%; 二级处理出水微塑料含量降为 258 n/L, 去除率达 86.8%; 三级处理设置混凝沉淀池和转盘滤布滤池, 经净化处理后, 微塑料最终出水含量为 169 n/L, 去除率达 91.3%。

## 2.3 微塑料赋存特征分析

### 2.3.1 微塑料形状特征分析

各污水厂微塑料形状特征统计结果见图 5 (a)(b)(c)。

由图 5 可见, 对污水中的微塑料按照形态特征进行分类, 其中纤维占比最多 (31.5% ~ 65%), 颗粒 (4.2% ~ 46.9%) 和不规则微塑料 (16.1% ~ 32.8%) 次之, 这与国内外一些污水厂的研究结果一致。Xu 等<sup>[5]</sup> 研究表明, 常州市 11 个污水处理厂废水中微塑料的形态以纤维为主, 其次是碎片、薄片和颗粒。Mason 等<sup>[6]</sup> 对美国 17 个污水处理厂废水进行取样分析, 纤维的平均占比高达 59%。不同污水厂中微塑料的形态占比不同, A、C 厂以纤维和颗粒状微塑料为主, 且颗粒状占比均明显高于 B 厂, 这可能与 A、C 厂的进水中生活污水比例较高有关。1 件衣服在 1 次洗涤中可以释放多达 1 900 根纤维<sup>[7]</sup>, 平均 1 台 6 kg 的普通家用洗衣机在洗涤过程中可以向污水系统排放 700 000 根纤维<sup>[8]</sup>, 而每次用洗面奶、香皂等清洁产品时, 将会释放产生 4 594 ~ 94 500 个塑料颗粒, 且牙膏中所含的蓝色聚乙烯颗粒也被发现存在于污水处理厂废水中<sup>[9]</sup>。B 厂所在的服务区域除了居民区外还包含工业区, 接收部分机电制造、材料装饰等企业产生的工业废水, 而工业生产所用的塑料一般都具有稳定性好、耐腐蚀、阻燃、韧性强等特征, 在自然流过程中不易进一步破碎、磨损, 主要以碎片形式存在, 可能是 B 厂中不规则碎片状微塑料含量

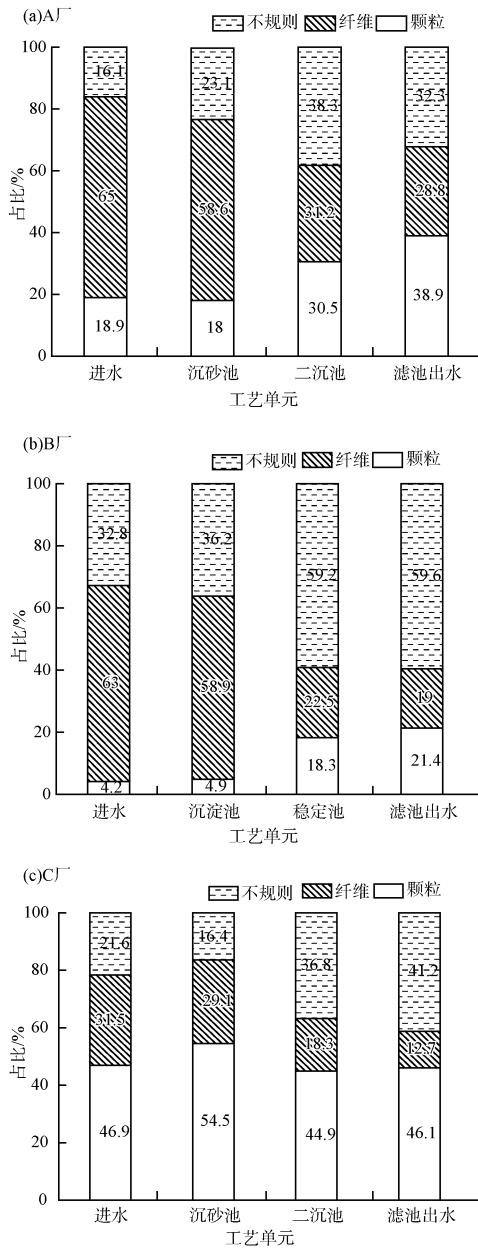


图 5 各污水厂微塑料形状特征分布

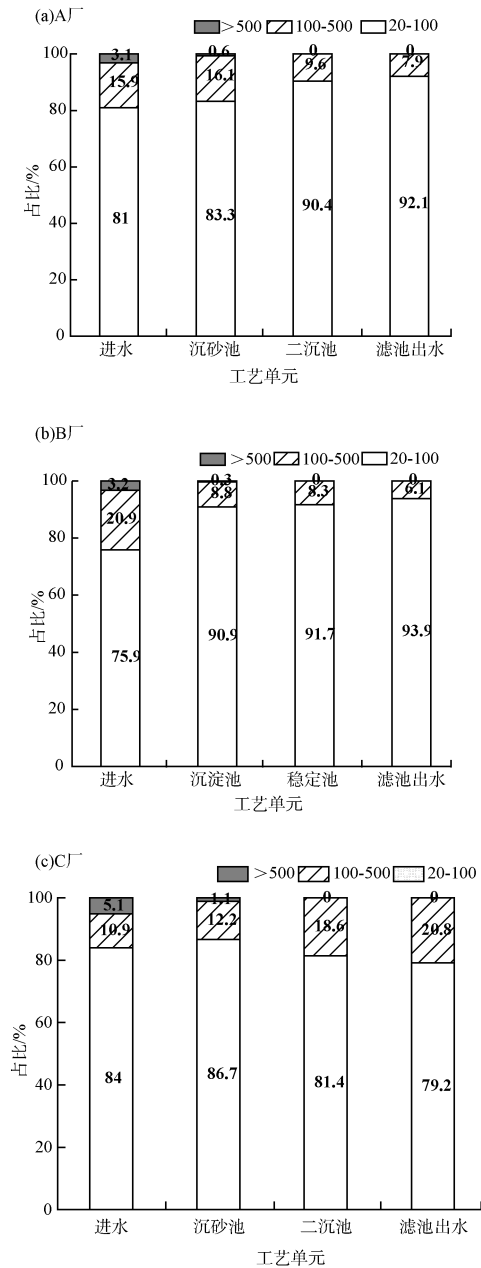


图 6 各污水厂微塑料尺寸特征统计结果

较高的原因。纤维状数量在经过生化池二级处理后均表现出逐级减少,颗粒状和不规则状的占比相对出现了增加,说明纤维状微塑料在污水厂中去除率更高,这可能与纤维状微塑料形态曲折弯曲、易于缠绕截留有关。

### 2.3.2 微塑料尺寸特征统计分析

将所有微塑料样品根据不同粒径分为 3 组,各污水厂不同工艺单元微塑料尺寸特征统计结果见图 6(a)(b)(c)。

由图 6 可见,不同工艺单元中,粒径在 20 ~ 100  $\mu\text{m}$  的微塑料占比最多,在 80% 以上,粒径在

100 ~ 500  $\mu\text{m}$  的微塑料占比在 6% ~ 21%;经过二级处理流程后,粒径 > 500  $\mu\text{m}$  的几乎全部去除。在沉砂池、生化池和二沉池出水中均检测到不同大小的微塑料,处理后丰度有所下降。大粒径微塑料去除较为彻底是由于一级处理流程中格栅和沉砂池截留所致,细格栅可以截留大部分粒径 > 3 mm 的颗粒物。在 Murphy 等<sup>[10]</sup>的研究中,较小粒径的微塑料可能会继续悬浮在污水处理厂池体污水中,而较大粒径的微塑料更容易沉淀在池底。此外,在污水处理过程中,大粒径的微塑料也可能由于磨损

而变成小颗粒并流向下一处理阶段,因此小粒径微塑料在污水处理厂的污水中占有较高的比例。Mason 等<sup>[6]</sup>发现,污泥中小粒径微塑料( $<0.355\text{ mm}$ )占很大比例,占比约在 57%,而污水中去除的大部分微塑料进入到污泥单元中,与本研究结果一致。

### 2.3.3 微塑料颜色特征分析

将微塑料按照颜色分为彩色、黑色和透明 3 种类型,各污水厂微塑料颜色特征统计结果见图 7(a)(b)(c)。

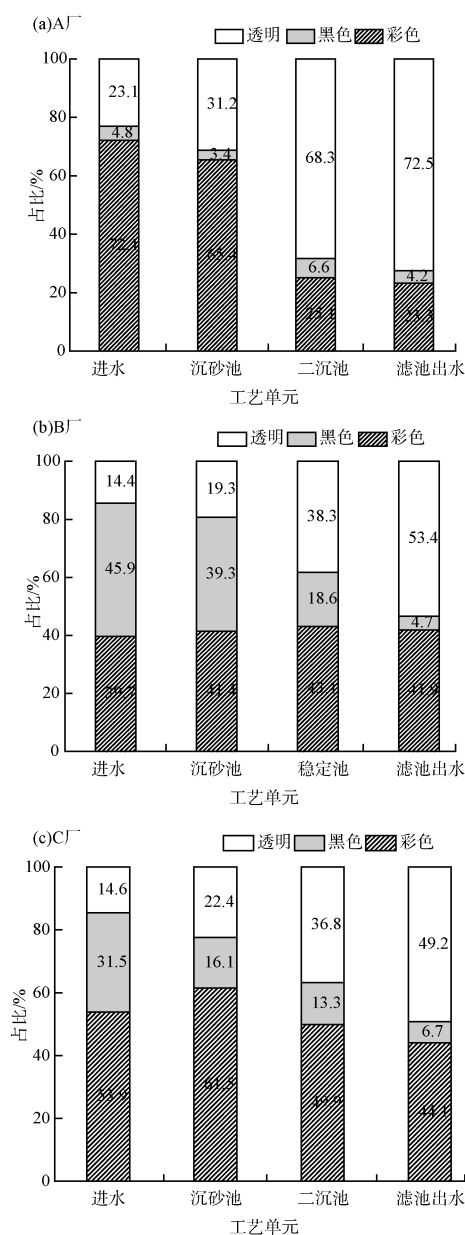


图 7 各污水厂微塑料颜色特征统计结果

由图 7 可见, A 厂微塑料颜色以彩色(72.1%)为主,透明(23.1%)次之,黑色(4.8%)最小。透明占比在处理过程中不断升高,彩色降低,黑色几乎不变。B 厂包含的微塑料中黑色(45.9%)含量较多,与彩色(39.7%)占比相当,透明(14.4%)占比较小。透明占比在处理过程中不断升高,黑色降低,彩色无明显变化。C 厂中微塑料颜色占比以彩色(53.9%)为主,黑色(31.5%)次之,透明(14.6%)含量最少,透明占比在处理过程中不断升高,黑色降低,彩色呈现先升高后下降的趋势。总体来看,污水处理厂中的微塑料颜色以彩色、透明为主。Phillips<sup>[11]</sup>调查了新西兰地区 30 条河流沉积物中微塑料的赋存情况,结果表明这些区域的微塑料粒径在  $100\sim 300\ \mu\text{m}$  之间,其中 PET 占 41%,PP 占 33%,PS 占 29%,以红色(27%)和蓝色(26%)居多,与本研究结果一致。此外,人们日常的衣食住行都会使用到食品包装袋、垃圾袋、保鲜膜、餐厨用品等,这些塑料制品多数没有鲜艳的颜色,排入污水处理厂的洗衣及厨余废水中会含有这些塑料制品的脱落物,可能是污水中透明微塑料含量较多的原因。

### 3 结论

(1) 样品中共计检测出 14 种微塑料,其中 PE 占大多数,占比均在 40% 左右,PP、PS、PET 等的占比在 5%~40% 不等,PA、PC、ABS、PMMA 等聚合物也有少量检出,占比均  $<10\%$ 。

(2) A、B、C 厂进水中微塑料丰度分别为 2 226, 2 263, 1 950 n/L, 经过污水厂各级处理后,微塑料去除率分别为 92.1%, 82.5%, 91.3%。

(3) 微塑料形态主要以纤维状微塑料为主,颗粒和不规则形状次之,微塑料颜色以彩色、透明居多,从已有数据显示,微塑料颜色没有一定规律。

### [参考文献]

- [1] 骆永明,施华宏,涂晨,等. 环境中微塑料研究进展与展望[J]. 科学通报,2021, 66(13):1547-1562.
- [2] 韩书宇,付英,张游,等. 城市污水中微塑料特性、检测及去除[J]. 工业用水与废水,2021, 52(5):1-5.
- [3] 江文,刘振中. 微塑料在水处理中去除的研究进展[J]. 应用化工,2021, 50(8):2286-2292.
- [4] 徐建康,张占鳌,闫泽华,等. 污水处理厂中微塑料的分析方法研究进展[J]. 生态毒理学报,2021, 16(2):106-118.

- [5] XU X, JIAN Y, XUE Y, et al. Microplastics in the wastewater treatment plants (WWTPs): Occurrence and removal [J]. *Chemosphere*, 2019, 235(6): 1089–1096.
- [6] 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(10): 1045–1054.
- [7] BROWNE M A, CRUMP P, NIVEN S J, et al. Accumulation of microplastics on shorelines worldwide sources and sinks [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(21): 9175–9179.
- [8] BOUCHER J, FRIOT D. Primary Microplastics in the Oceans: A Global Evaluation of Sources [M]. Switzerland: IUCN Publication, 2017.
- [9] MAGNI S, BINELLI A, PITTURA L, et al. The fate of microplastics in an Italian Wastewater Treatment Plant [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 652(20): 602–610.
- [10] 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.
- [11] PHILLIPS M B, BONNER T H. Occurrence and amount of microplastic ingested by fishes in watersheds of the Gulf of Mexico [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, 100(1): 264–269.

.....

(上接第52页)

- system with multiple linear regression [J]. *Geoderma*, 2017, 298: 27–34.
- [3] 陈桂华, 范芳, 林芷君, 等. 三氯化六氨合钴-浸提分光光度法测定土壤阳离子交换量 [J]. *理化检验-化学分册*, 2019, 55(12): 1448–1451.
- [4] 易田芳, 向勇, 刘杰, 等. 乙酸铵静置交换法测定土壤阳离子交换量的方法优化 [J]. *化学试剂*, 2021, 43(4): 505–509.
- [5] 窦蓓蕾, 张沛, 田渭花, 等. 陕西地区土壤阳离子交换量 (CEC) 测定方法研究 [J]. *安徽农学通报*, 2015, 21(22): 65–66.
- [6] 段小燕, 施玉格. 三氯化六氨合钴浸提-分光光度法测定新疆土壤中阳离子交换量 [J]. *干旱环境监测*, 2019, 33(3): 13–116.
- [7] 杨利利, 李菲, 陈渝, 等. 分光光度法测定土壤中阳离子交换量的优化改进 [J]. *中国农学通报*, 2020, 36(35): 119–122.
- [8] 沈纯怡, 邢伟银. 快速检测土壤阳离子交换量的研究 [J]. *中国土壤与肥料*, 2016, 5(1): 144–147.
- [9] 刘蓉, 邓茂, 李莹莹, 等. 不同酸碱度土壤阳离子交换量的测定研究 [J]. *中国环境监测*, 2019, 35(1): 125–130.
- [10] 胡秀荣, 吕光烈, 杨芸. 六氨合钴离子交换法测定粘土中有效态阳离子交换量 [J]. *分析化学*, 2000, 28(11): 1402–1405.
- [11] 杨黎, 李雯, 乔君喜, 等. 基于超声浸提-分光光度法测定土壤中阳离子交换量 [J]. *山东化工*, 2020, 50(9): 94–95, 104.
- [12] 张艳丽, 宋保军, 孟新丽. 检测土壤中阳离子交换量的方法 [J]. *分析仪器*, 2020, 6(6): 123–126.
- [13] 生态环境部. 土壤阳离子交换量的测定 三氯化六氨合钴浸提-分光光度法: HJ 889—2017 [S]. 北京: 中国环境出版集团, 2017.
- [14] 生态环境部. 环境监测分析方法标准制修订技术导则: HJ 168—2020 [S]. 北京: 中国环境出版集团, 2017.