

杭州市两污水处理厂进水中微塑料污染水平及特征

叶李嘉, 吴南翔, 高明, 郭晓晨, 范宏亮, 沈宏, 杨叶, 刘克澄, 姚春冀, 彭雪云

杭州医学院公共卫生学院, 浙江 杭州 310053

DOI 10.13213/j.cnki.jeom.2021.21048

摘要:

[背景] 污水是微塑料进入水生环境的途径之一, 研究其中微塑料污染物特征有助于了解人类活动对微塑料产生的影响。

[目的] 本研究以杭州市两污水处理厂为例, 对其进水中微塑料污染水平及特征进行研究。

[方法] 于2020年四个季度, 在杭州两污水厂采集进水水样各一次。使用过氧化氢溶液在60℃恒温条件消化样品中杂质, 待消化完成后使用不锈钢筛从样品中筛分出微塑料。将微塑料置于显微镜下, 利用体视显微镜和傅立叶红外光谱显微镜对微塑料进行识别, 并通过体视显微镜对样品进行计数和分类。

[结果] 两污水处理厂进水中微塑料数量浓度分别为 (8.20 ± 0.28) 、 (11.01 ± 0.59) 个 $\cdot L^{-1}$, 两厂内4个季度之间的差异均无统计学意义($P > 0.05$)。微塑料尺寸分类结果显示: $>0.5 \sim 1$ mm占比最大, 其在A、B两厂中占比分别为57.5%和54.0%; >1 mm次之, 在两厂占比分别为25.0%和28.0%; 而0.098~0.2 mm尺寸的微塑料比例最少, 占比分别为4.5%和6.0%。形态均以纤维为主, 碎片次之; 纤维在A、B两厂中占比分别为47.5%和49.0%, 碎片分别为30.5%和29.0%。颜色以黑色为主, 在A、B两厂中占比平均分别为57.0%和54.0%。研究中所采取的消化、分级提取方法具有较好的量效关系, 其散点图拟合曲线为 $\hat{y} = 211x + 3.4083$, $R^2 = 0.9952$ ($P < 0.001$)。

[结论] 该市污水处理厂污水中以日常生活产生的纤维形态微塑料为主, 尚未发现季节因素与污水中微塑料特征组成有关联。研究中所采取的消化、分级提取方法切实可行。

关键词: 城市污水; 微塑料; 污水处理厂; 提取方法; 检测方法

Pollution levels and characteristics of microplastics in influent of two wastewater treatment plants in Hangzhou YE Lijia, WU Nanxiang, GAO Ming, GUO Xiaochen, FAN Hongliang, SHEN Hong, YANG Ye, LIU Kecheng, YAO Chunji, PENG Xueyun (School of Public Health, Hangzhou Medical College, Hangzhou, Zhejiang 310053, China)

Abstract:

[Background] Urban sewage may operate as a route for microplastics entering the water environment. Studying the characteristics of microplastic pollutants can help to understand the possibility of human activities affecting the production of microplastics.

[Objective] This study investigates the levels and characteristics of microplastic pollutants in the influent water of two wastewater treatment plants (WWTPs) in Hangzhou.

[Methods] In four quarters of 2020, water samples were collected from the influent of selected two WWTPs once each quarter. Microplastics were extracted using hydrogen peroxide to digest impurities in the samples at a constant temperature of 60℃, and then stainless-steel sieves to remove large particles. The extracted microplastics were identified under a stereo microscope and a Fourier transform infrared spectroscopy microscope, and the samples were counted and classified under a stereo microscope.

[Results] The average number concentrations of microplastics in the influent of the two WWTPs were (8.20 ± 0.28) and (11.01 ± 0.59) particles $\cdot L^{-1}$ respectively. No difference was found among the four quarters in the two WWTPs ($P > 0.05$). The results of size fractionation of microplastics showed that 0.5-1 mm particles accounted for the largest proportion, and the proportions were 57.5% and 54.0% respectively in WWTP A and B; the second place was >1 mm, and the

基金项目

浙江省科技厅院所专项 (1921D)

作者简介

叶李嘉 (1995—), 男, 硕士生;
E-mail: hsmbyx2x@163.com

通信作者

吴南翔, E-mail: zamewu@163.com

伦理审批 不需要

利益冲突 无申报

收稿日期 2021-01-31

录用日期 2021-04-14

文章编号 2095-9982(2021)08-0883-06

中图分类号 R12

文献标志码 A

引用

叶李嘉, 吴南翔, 高明, 等. 杭州市两污水处理厂进水中微塑料污染水平及特征 [J]. 环境与职业医学, 2021, 38 (8): 883-887, 909.

► 本文链接

www.jeom.org/article/cn/10.13213/j.cnki.jeom.2021.21048

Funding

This study was funded.

Correspondence to

WU Nanxiang, E-mail: zamewu@163.com

Ethics approval Not required

Competing interests None declared

Received 2021-01-31

Accepted 2021-04-14

► To cite

YE Lijia, WU Nanxiang, GAO Ming, et al. Pollution levels and characteristics of microplastics in influent of two wastewater treatment plants in Hangzhou[J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2021, 38(8): 883-887, 909.

► Link to this article

www.jeom.org/article/en/10.13213/j.cnki.jeom.2021.21048

proportions were 25.0% and 28.0% respectively; and microplastics with a size of 0.098-0.2 mm accounted for the least proportion, which were 4.5% and 6.0% respectively. Fibers were the main form in the collected samples, followed by fragments. The average proportions of fibers in the two WWTPs were 47.5% and 49.0%, and the average proportions of fragments in the two WWTPs were 30.5% and 29.0%, respectively. Black was the dominant color. Black microplastics accounted for 57.0% and 54.0% of total microplastics, respectively. The digestion and fractional extraction methods adopted in the study showed a good dose-effect relationship, and the scatter fitting curve was $\hat{y}=211x+3.4083$, $R^2=0.9952$ ($P<0.001$).

[Conclusion] Fibers produced in daily life activities are the main form of microplastics in the sewage from WWTPs. Seasons are not found to have an association with the characteristics of microplastics in sewage. The digestion and fractional extraction methods adopted in the study are feasible.

Keywords: urban sewage; microplastics; wastewater treatment plant; extraction method; detection method

在 2004 年 Thompson 等^[1]首次提出微塑料 (microplastics) 一词, 之后人们普遍接受将微塑料定义为尺寸小于 5 mm 的塑料碎片, 但也有学者将微塑料定义为尺寸小于 1 mm 的塑料颗粒^[2]。微塑料根据来源可以分为两种——原生微塑料和次生微塑料^[3], 前者可以从个人护理品及工业废物等当中发现, 后者可由体积较大的塑料经过日光照射、水流冲蚀等因素降解、磨损所形成^[4]。微塑料在环境中易被生物摄取, 可以影响生物的消化和生长发育。由于生物放大作用, 微塑料可以随食物链传递至更高营养级甚至影响人类^[5]。我国是世界上十大塑料制品生产和消费国之一, 大量的塑料垃圾给水环境生态系统造成了严重的危害。有证据表明污水是微塑料进入水生环境的途径之一^[6], 污水处理厂中微塑料已引起研究人员的高度重视。厘清污水处理厂中微塑料的来源和归宿, 能够了解人类活动对微塑料污染的影响提供科学数据。

从水样中提取微塑料的方法有多种, 不同方法可能会产生偏差。标准化微塑料提取方法仍缺乏, 现有方法多是通过消化处理污水中的有机物质, 再进行微塑料提取。Hurley 等^[7]采用消化提取法, 由过氧化氢溶液等试剂处理样品后提取微塑料。除过氧化氢以外, 硝酸、氢氧化钠等酸碱也是常用的消解试剂, 但后者可能会在提取过程中破坏微塑料, 同时与其他方法相比其现场安全性较差, 但采取该方法的研究较多^[7-8], 参考性强。Wagner 等^[9]运用脉冲超声波提取微塑料, 缩短了处理时间, 减少了化学试剂对微塑料的溶解和现场安全性问题, 但该方法多适用于消解动物组织或者其他团块状样品。Nuelle 等^[10]采用密度提取法, 利用饱和碘化钠使微塑料颗粒浮在上清液中, 由此达到分离微塑料的目的, 但碘化钠会与过氧化氢反应, 在实际消化提取中也要注意其他辅助消化试剂的选择。经消解后的污水过滤提取法则是根据所需获得的微塑料尺寸, 选择孔径合适的滤膜或过滤筛, 并

且所选用的滤膜材质要有利于后续微塑料的检测^[11]。目前国际上大多数研究针对生物样本, 研究生物体内微塑料数量, 但对于城市污水的研究较少。

本研究以某市两家污水处理厂水样为例, 采用消化提取法及分级过滤提取法, 利用体视显微镜和傅立叶红外光谱显微镜确定微塑料的分类, 分析样品中微塑料的含量, 并对进水中微塑料污染物分布特征进行研究。本研究拟对所使用的方法进行实验室质控, 为今后微塑料污染及消化、提取方法的研究提供数据积累和理论依据。

1 材料与方法

1.1 采样

A 污水处理厂日处理污水规模 30 万 t, 污水处理采用同步脱氮除磷工艺深床滤池, 出水排放达到国家一级 A 标准。B 污水处理厂投入运行以来, 污水处理设备先进且运转良好, 日平均处理污水量为 2.87 万 t, 厂区主体工艺采用氧化沟处理工艺。采集两厂进水样, 2020 年每季度采集一次, 共采集 4 次, 每次采集 40 L, 所采集的污水用玻璃容器密封保存, 后立即转移至实验室检测。经过氧化氢预处理后备用。

1.2 主要设备和耗材

Vertex 70 傅立叶变换红外吸收光谱仪 (Bruker, 德国), Hyperion 2000 Optical Beampath 显微镜 (Bruker, 德国), HP550-S 加热板 (DLAB, 中国), SHZ-D (III) 循环水式真空泵 (子华, 中国), DMSZ7 显微镜 (SDPTOP, 中国), 玻璃瓶、烧杯、直径 150 mm 玻璃培养皿、玻璃棒、镊子、40 目 (孔径 0.2 mm) 和 160 目 (孔径 0.098 mm) 不锈钢筛、布氏漏斗、0.2 mm 和 1 mm 聚苯乙烯塑料微球 (倍思乐, 中国)、孔径 0.45 μm /直径 150 mm 玻璃纤维滤膜、30% 过氧化氢溶液、纯水。

1.3 样品处理和微塑料提取

将采集到的水样取 20 L 于玻璃烧杯中, 后将水样

经过 40 目 (孔径 0.2 mm) 和 160 目 (孔径 0.098 mm) 筛过滤。将玻璃漏斗置于定制的不锈钢架上, 标准筛从上至下按照孔径大小固定于玻璃漏斗上。将筛分好的样品用纯水冲洗至洁净烧杯中保存备用。再将分离好的样品按照等体积加入过氧化氢溶液, 并用锡箔纸遮挡玻璃瓶瓶口防止空气中杂质进入, 于 60℃ 条件下消化, 去除样品中的有机物^[12], 其间向烧杯中加入足量过氧化氢溶液至样品颜色恒定不变。

准备好抽滤泵和布氏漏斗, 将 0.45 μm 玻璃纤维滤膜铺于布氏漏斗中, 用纯水将玻璃纤维滤膜润湿后开启抽滤泵。将消化后的样品经 160 目 (孔径 0.098 mm) 不锈钢筛过滤, 再将筛分后样品转移至烧杯, 从烧杯中倒入布氏漏斗进行抽滤。将抽滤后截留有样品的玻璃纤维滤膜转移至提前经超声清洗、纯水冲洗过的直径 150 mm 玻璃培养皿中, 用锡箔纸包裹玻璃培养皿放于 4℃ 冰箱中保存备用。

1.4 样品鉴定和计数

微塑料材料鉴定使用显微镜结合傅立叶红外光谱分析。将载有样品的滤膜置于显微镜下观察, 按照四分法将滤膜分为 4 份, 对其中对角线两份滤膜上样品进行计数, 同样方法计数 3 次, 以此统计整个滤膜上微塑料的数量。对被检测物质按照其尺寸分类 (0.098~0.2、>0.2~0.5、>0.5~1、>1 mm, 纤维的长度按照其长轴长度为准), 在滤膜上随机观察数个视野并选取 50 个微塑料进行尺寸分类。

根据显微镜观察, 形态以纤维、薄膜、颗粒、碎片进行分类。纤维, 定义为外观细长的微塑料; 薄膜, 定义为非常薄的一小层或一块面积相对厚度较大的塑料碎片; 颗粒, 定义为目镜下近似球形或圆形的微塑料; 当微塑料不能被分类为纤维、颗粒或薄膜时则归类为碎片^[13]。在滤膜上随机观察数个视野并选取 50 个, 根据显微镜观察按照黑色、白色、红色、黄色、绿色、蓝色进行分类和统计。

由于滤膜上的待确定样品较多, 抽样选定部分样品 (滤膜上颗粒) 进行傅立叶红外光谱鉴定。先将待测样品放置于显微镜载物台上, 通过红外吸收光谱仪得到样品的图谱, 通过工作站系统中材料的红外图谱数据库比对确定样品材质, 得到光镜下微塑料占待测样品比例, 根据比例对微塑料进行统计计数。被选取用于特征研究的微塑料在光镜下观察分类后, 置于光学显微镜结合傅立叶红外条件下进行检测, 并以光镜下计数为最终计数数值。

1.5 实验室质控

为了验证本实验方法的有效性, 分别取采集到的水样 20、10、5、2.5 L 稀释成终体积 20 L (即污水质量分数分别为 100%、50%、25%、12.5%), 按照 “1.3” 和 “1.4” 操作, 将所得数据与原液 20 L 和同体积纯水的计数结果绘制成散点图, 计算并检验拟合曲线。

同时本研究对直径为 200 μm、1 mm 的聚苯乙烯微球在显微镜下进行回收率测试。经过消解、浮选、过膜后通过显微镜进行鉴定, 重复 3 次实验。向超纯水中分别加入 600、500、400、300、200、100 个 200 μm 聚苯乙烯微球, 200、150、100 个 1 mm 聚苯乙烯微球, 每个加标量做 3 个平行的样品测试。在相同的试验条件下进行检测。回收率 = [(加标测定值 - 试样测定值) / 标准加入量] × 100%。

为了避免在采样和实验过程中环境对样品的污染, 实验所用的器皿均为玻璃器皿, 用超纯水冲洗并烘干备用, 敞口容器及时用锡箔纸盖住。以上操作过程均于洁净室中进行。

1.6 统计学分析

计量资料结果用均数 ± 标准差表示, 使用 SPSS 16.0 软件对数据进行统计学分析。本研究中微塑料含量、微塑料特征分析资料的组间均数差异性比较采用单因素方差分析, 进水中微塑料含量季度数据的组间两两比较均采用方差齐 LSD-*t* 检验。对微塑料特征分布情况进行卡方检验, 线性拟合回归采用 *F* 检验。检验水准 $\alpha=0.05$ 。因微塑料颜色、形态数据不满足卡方检验要求, 且不易进行组间合并, 因此本研究不进行颜色、形态分布在季节间差异的比较。

2 结果

2.1 微塑料分布特征

2.1.1 计数及粒径分布 A、B 两厂 4 个季度微塑料平均计数分别为 (164.03±5.67)、(220.26±11.77) 个·张⁻¹, 即分别为 (8.20±0.28)、(11.01±0.59) 个·L⁻¹。B 厂微塑料计数大于 A 厂 ($P<0.05$), 但在两厂内 4 个季度之间的差异均无统计学意义 ($P>0.05$)。见表 1。

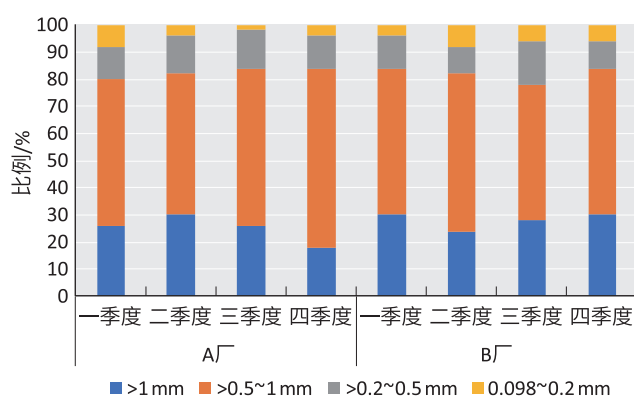
A 厂 4 个季度中粒径在 >0.5~1 mm 的微塑料占比最大 (57.5%), >1 mm 次之 (25.0%), 0.098~0.2 mm 最少 (4.5%)。B 厂 4 个季度中粒径在 >0.5~1 mm 的微塑料占比最大 (54.0%), >1 mm 次之 (28.0%), 0.098~0.2 mm 最少 (6.0%)。分析两污水厂内 4 个季度之间尺寸分布差异, 考虑到经卡方检验发现 0.098~0.2 mm 组内

表1 杭州市两污水处理厂进水微塑料水平

Table 1 Microplastic concentrations in influent of two wastewater treatment plants in Hangzhou

指标	处理厂	一季度	二季度	三季度	四季度	统计量	P	合计	F	P
计数/(个·张 ⁻¹)	A	167.17±6.97	160.26±4.63	163.34±3.46	165.39±7.41	0.771	0.542	164.03±5.67	5.74	0.026
	B	214.88±5.12	226.67±10.15	217.70±18.88	221.80±12.53	0.491	0.698	220.26±11.77		
数量浓度/(个·L ⁻¹)	A	8.35±0.30	8.01±0.23	8.16±0.17	8.26±0.37	0.771	0.542	8.20±0.28	5.74	0.026
	B	10.74±0.25	11.33±0.50	10.88±0.94	11.08±0.62	0.491	0.698	11.01±0.59		

超过20%的期望值低于5, 因此将>0.2~0.5 mm和0.098~0.2 mm两组合并, 统计结果显示两个污水厂内4个季度之间微塑料尺寸分布差异均无统计学意义($P>0.05$)。见图1。



[注] 两污水厂内4个季度之间尺寸分布差异均无统计学意义, $P>0.05$ 。

图1 杭州市两污水处理厂进水微塑料尺寸分布

Figure 1 Size distribution of microplastics in influent of two wastewater treatment plants in Hangzhou

2.1.2 形态及颜色分布 由图2可以看出, A厂和B厂4个季度进水中微塑料形态均以纤维为主, 纤维平均比例分别为47.5%和49.0%, 碎片平均比例分别为30.5%和29.0%; 薄膜形态比例均为最低, 分别为7.5%和13.5%。

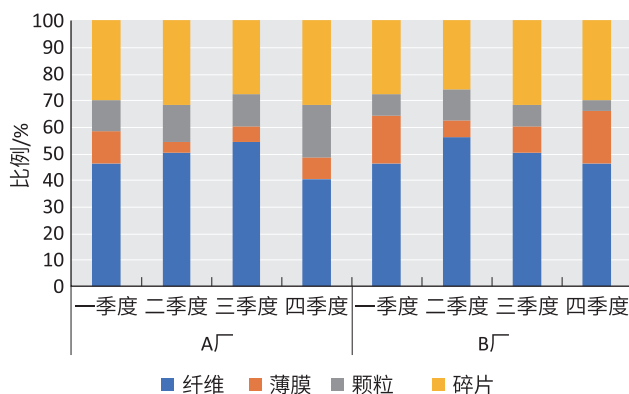


图2 杭州市两污水处理厂进水微塑料形态分布

Figure 2 Form distribution of microplastics in influent of two wastewater treatment plants in Hangzhou

由图3可以看出, A厂和B厂4个季度进水中微塑料颜色均以黑色为主, 平均比例分别为57.0%和

54.0%; 其次为蓝色和红色, 蓝色平均比例分别为14.5%和17.5%, 红色平均比例分别为11.0%和9.5%。

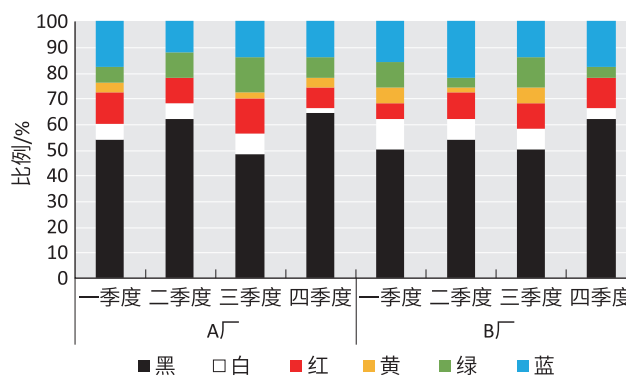


图3 杭州市两污水处理厂进水微塑料颜色分布

Figure 3 Color distribution of microplastics in influent of two wastewater treatment plants in Hangzhou

2.2 实验室质控结果

图4为微塑料计数散点图, 横坐标为污水质量分数, 纵坐标为所得微塑料数量, 其拟合曲线为 $\hat{y}=211x+3.4083$, $R^2=0.9952$ ($P<0.001$)。

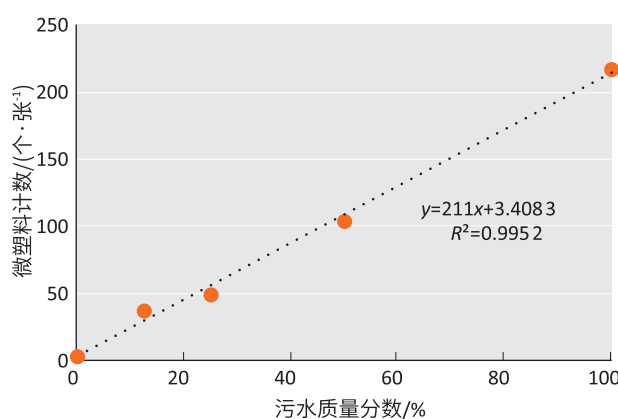


图4 杭州市两污水处理厂不同浓度下水样微塑料计数散点图

Figure 4 Scatter plot of counts of microplastics in samples at different concentrations in two wastewater treatment plants in Hangzhou

向超纯水中分别加入600、500、400、300、200、100个200 μm 聚苯乙烯微球, 微球实际平均计数分别为442.3、386.7、285.3、222.3、142.7、71.3个, 加标回收率在71.0%~81.2%范围内, 平均回收率为74.3%。向超纯水中分别加入200、150、100个1 mm聚苯乙烯微

球,微球实际平均数目分别为173.7、126.7、81.7个,加标回收率在78.0%~92.0%范围内,平均回收率为84.9%。

3 讨论

本研究采集杭州两污水厂的进水,对其中微塑料水平及其特征进行了描述分析。两污水处理厂进水中微塑料数量浓度分别为 (8.20 ± 0.28) 、 (11.01 ± 0.59) 个 $\cdot\text{L}^{-1}$ 。两污水厂污水中微塑料尺寸中 $>0.5\sim1\text{mm}$ 占比最大, $>1\text{mm}$ 次之,而 $0.098\sim0.2\text{mm}$ 的微塑料比例最少。形态均以纤维为主,碎片次之。颜色以黑色为主。实验室质控部分,200 μm 聚苯乙烯微球加标回收率在71.0%~81.2%范围内,平均回收率为74.3%;1mm聚苯乙烯微球加标回收率在78.0%~92.0%范围内,平均回收率为84.9%。

Ren等^[14]的研究表明,在郑州某污水厂的进水中,微塑料数量浓度为16.0个 $\cdot\text{L}^{-1}$;Lares等^[15]在芬兰米凯利市的某污水处理厂进水中检测到平均57.6个 $\cdot\text{L}^{-1}$ 的微塑料;Carr等^[16]在洛杉矶卫生局进水中检测到微塑料结果为1个 $\cdot\text{L}^{-1}$ 。本研究中两污水处理厂进水的微塑料数量浓度相比上述城市属中等水平,且B厂进水中微塑料数量浓度较A厂高。

两个污水厂内4个季度之间微塑料尺寸分布差异均无统计学意义,提示微塑料尺寸分布与季节因素无关。两污水厂污水中微塑料尺寸分类结果显示 $>0.5\sim1\text{mm}$ 占比最大,而 $0.098\sim0.2\text{mm}$ 尺寸的微塑料比例均最少,这可能是因为该粒径范围微塑料尺寸太小,比较容易被遗漏,同时 $<0.098\text{mm}$ 的微塑料未进行统计。今后将进一步增加次一级尺寸的分级,以提高检出限。考虑到两污水厂每日处理量巨大,今后需要重视污水厂对微塑料处理能力和处理效果的评价。

从形态分布来看,纤维形态比例最高,这可能是日常衣物洗涤过程中产生的次生微塑料,而碎片较多是由于多数微塑料形状不规则,难以归类至除碎片以外的其他分类所致。

水样消化处理时,须视水样不同而改变所用过氧化氢体积,其中化学需氧量和悬浮物均可能对结果产生影响。本研究采用的傅立叶红外显微联用仪检测成本高,但此方法较用化学方法鉴定微塑料性质更为安全、便捷。实验室质控两种尺寸的加标回收率均在70%以上,且散点图结果显示本研究微塑料消化、提取方法具有较好的量效关系,水样微塑料提取方法简

单、安全,成本低,适用于一般实验室进行各种水体的现场采样和检测,可为微塑料污染检测及危害控制提供技术参考。影响微塑料产生的因素很多,其在污水水中的残留以及形态特征可以提示污染来源以及未处理污水的排放对水生态的潜在影响。后续研究可以对污水厂初级处理水、污泥、出水等环节进行采样检测,为评估污水处理厂对微塑料的处理能力提供参考。

综上所述,杭州市两污水处理厂进水中微塑料数量浓度平均分别为 (8.20 ± 0.28) 、 (11.01 ± 0.59) 个 $\cdot\text{L}^{-1}$,并以日常生活产生的纤维形态微塑料为主,尚未发现季节因素与污水中微塑料特征组成有关联。本研究中所采取的消化和分级提取方法切实可行。

参考文献

- [1] THOMPSON RC, OLSEN Y, MITCHELL RP, et al. Lost at sea : where is all the plastic? [J] . Science, 2004, 304 (5672) : 838.
 - [2] COSTA MF, DO SUL JA, SILVA-CAVALCANTI JS, et al. On the importance of size of plastic fragments and pellets on the strandline : a snapshot of a Brazilian beach [J] . Environ Monit Assess, 2010, 168 (1/2/3/4) : 299-304.
 - [3] WANG MH, HE Y, SEN B. Research and management of plastic pollution in coastal environments of China [J] . Environ Pollut 2019, 248 : 898-905.
 - [4] AUTA HS, EMENIKE CU, FAUZIAH SH. Distribution and importance of microplastics in the marine environment : a review of the sources, fate, effects, and potential solutions [J] . Environ Int, 2017, 102 : 165-176.
 - [5] IVLEVA NP, WIESHEU AC, NIESSNER R. Microplastic in aquatic ecosystems [J] . Angew Chem Int Ed, 2017, 56 (7) : 1720-1739.
 - [6] TALVITIE J, HEINONEN M, PÄÄKKÖNEN JP, et al. Do wastewater treatment plants act as a potential point source of microplastics? Preliminary study in in the coastal Gulf of Finland Baltic Sea [J] . Water Sci Technol, 2015, 72 (9) : 1495-1504.
 - [7] HURLEY RR, LUSHER AL, OLSEN M, et al. Validation of a method for extracting microplastics from complex, organic-rich, environmental matrices [J] . Environ Sci Technol, 2018, 52 (13) : 7409-7417.
 - [8] GHOSAL S, CHEN M, WAGNER J, et al. Molecular
- (下转第909页)

- [17] PARK HM, HAN SS, LEE EC, et al. Randomized clinical trial of preoperative skin antisepsis with chlorhexidine gluconate or povidone-iodine [J]. *Br J Surg*, 2017, 104 (2) : e145-e150.
- [18] BREIVIK T, GUNDERSEN Y, GJERMO P, et al. Oral treatment with complement factor C5a receptor (CD88) antagonists inhibits experimental periodontitis in rats [J]. *J Periodontal Res*, 2011, 46 (6) : 643-647.
- [19] BENSAID S, FABRE C, FOURNEAU J, et al. Impact of different methods of induction of cellular hypoxia : focus on protein homeostasis signaling pathways and morphology of C2C12 skeletal muscle cells differentiated into myotubes [J]. *J Physiol Biochem*, 2019, 75 (3) : 367-377.
- [20] BRAND J P, CHEN L, CUI X, et al. An adaptive alpha spending algorithm improves the power of statistical inference in microarray data analysis [J]. *Bioinformatics*, 2007, 1 (10) : 384-389.
- [21] MARTIN NR, AGUILAR-AGON K, ROBINSON G P, et al. Hypoxia impairs muscle function and reduces myotube size in tissue engineered skeletal muscle [J]. *J Cell Biochem*, 2017, 118 (9) : 2599-2605.
- [22] AKIMA H, KUBO K, IMAI M, et al. Inactivity and muscle : effect of resistance training during bed rest on muscle size in the lower limb [J]. *Acta Physiol Scand*, 2001, 172 (4) : 269-278.
- [23] GORGEY AS, SHEPHERD C. Skeletal muscle hypertrophy and decreased intramuscular fat after unilateral resistance training in spinal cord injury : case report [J]. *J Spinal Cord Med*, 2010, 33 (1) : 90-95.
- [24] ABBOTT RD, PETROVITCH H, WHITE LR, et al. Frequency of bowel movements and the future risk of Parkinson's disease [J]. *Neurology*, 2001, 57 (3) : 456-462.
- [25] BAGCHI M, KIM LA, BOUCHER J, et al. Vascular endothelial growth factor is important for brown adipose tissue development and maintenance [J]. *FASEB J*, 2013, 27 (8) : 3257-3271.
- [26] KIM J, KUNDU M, VIOLLET B, et al. AMPK and mTOR regulate autophagy through direct phosphorylation of Ulk1 [J]. *Nat Cell Biol*, 2011, 13 (2) : 132-141.
- [27] SILVA BSA, RAMOS D, BERTOLINI GN, et al. Resistance exercise training improves mucociliary clearance in subjects with COPD : A randomized clinical trial [J]. *Pulmonology*, 2019, 25 (6) : 340-347.

(英文编辑：汪源；责任编辑：汪源)

(上接第 887 页)

- identification of polymers and anthropogenic particles extracted from oceanic water and fish stomach—A Raman micro-spectroscopy study [J]. *Environ Pollut*, 2018, 233 : 1113-1124.
- [9] WAGNER J, WANG ZM, GHOSAL S, et al. Novel method for the extraction and identification of microplastics in ocean trawl and fish gut matrices [J]. *Anal Methods*, 2017, 9 (9) : 1479-1490.
- [10] NUELLE MT, DEKIFF JH, REMY D, et al. A new analytical approach for monitoring microplastics in marine sediments [J]. *Environ Pollut*, 2014, 184 : 161-169.
- [11] HIDALGO-RUZ V, GUTOW L, THOMPSON RC, et al. Microplastics in the marine environment : a review of the methods used for identification and quantification [J]. *Environ Sci Technol*, 2012, 46 (6) : 3060-3075.
- [12] TAGG AS, SAPP M, HARRISON JP, et al. Identification and quantification of microplastics in wastewater using focal plane array-based reflectance micro-FT-IR imaging [J]. *Anal Chem*, 2015, 87 (12) : 6032-6040.
- [13] SU L, XUE Y, LI L, et al. Microplastics in Taihu Lake, China [J]. *Environ Pollut*, 2016, 216 : 711-719.
- [14] REN P, DOU M, WANG C, et al. Abundance and removal characteristics of microplastics at a wastewater treatment plant in Zhengzhou [J]. *Environ Sci Pollut Res Int*, 2020, 27 (29) : 36295-36305.
- [15] LARES M, NCIBI MC, 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.
- [16] CARR SA, LIU J, TESORO AG. Transport and fate of microplastic particles in wastewater treatment plants [J]. *Water Res*, 2016, 91 : 174-182.

(英文编辑：汪源；责任编辑：王晓宇)