黄毅, 武军旭, 米峰江, 等. 西安城区灞河河段微塑料的分离及其表面形貌特征[J]. 净水技术, 2022, 41(11):137-143.
HUANG Y, WU J X, MI F J, et al. Separation and surface morphological characteristics of microplastics in urban reaches of Bahe River in Xi´an City[J]. Water Purification Technology, 2022, 41(11):137-143.

扫我试试?

西安城区灞河河段微塑料的分离及其表面形貌特征

黄 毅[1],武军旭[1],米峰江[2],高 凡[1,3],赵平歌[1,*],张炜垲[1]

(1. 西安工业大学建筑工程学院,陕西西安 710021;2. 西安市市政设施管理局,陕西西安 710038;3. 中机工程<西安>启源咨询设计有限公司,陕西西安 710021)

摘 要 近年来,随着对微塑料生态毒理效应以及其人体健康影响的研究,淡水环境中的微塑料污染已经愈发受到重视。文中选择 30% H_2O_2 的消解液和饱和溶液 NaCl 的浮选剂对西安城区灞河河段中的微塑料进行分离提取。结果表明:与国内报道的其他地区淡水环境相比,西安城区灞河河段中微塑料污染较为严重,沉积物中的数量(17.12 个/kg)是表层水体的 2~3 倍,且尺寸较大,主要材质均为对苯二甲酸与乙二醇的缩聚物(PET)、聚乙烯(PE)和聚丙烯(PP),形态以纤维状、碎片状为主,多呈现透明、紫、蓝、黑色。结合各取样点周围环境分析各类型微塑料的主要来源,为西安城区灞河河段微塑料的污染风险管控和生态环境治理提供有效的信息指导。

关键词 微塑料 淡水环境 粒径分布 表层水体 沉积物

中图分类号:X522 **文献标识码**:A **文章编号**:1009-0177(2022)11-0137-07

DOI:10.15890/j.cnki.jsjs.2022.11.019

Separation and Surface Morphological Characteristics of Microplastics in Urban Reaches of Bahe River in Xi´an City

HUANG Yi[1], WU Junxu[1], MI Fengjiang[2], GAO Fan[1,3], ZHAO Pingge[1,*], ZHANG Weikai[1]

(1. School of Civil & Architecture Engineering, Xi´an Technological University, Xi´an 710021, China;
2. Xi´an Municipal Facilities Administration, Xi´an 710038, China;
3. China Machinery Engineering <Xi´an> Qiyuan Consulting Design Co., Ltd., Xi´an 710021, China)

Abstract In recent years, with the study of ecotoxicological effect and its influence on human health in microplastics, microplastics pollution in freshwater environment has been paid more and more attention. In this paper, 30% H_2O_2 digestion solution and saturated NaCl flotation agent were selected to separate and extract microplastics in Xi´an City section of Bahe River. The results showed that, compared with the freshwater environment reported in other areas at home, the pollution of microplastics in Xi´an City section of Bahe River was more serious, and the quantity (17.12 ind/kg) in the sediments was 2~3 times that of the upper layer of water body and its size was larger. The main materials were polyethylene terephtholate (PET), polyethylene (PE) and polypropylene (PP), and their shapes were mainly fibrous and fragmented, mostly transparent, purple, blue and black. Combining with the surrounding environment of each sampling point, this paper analyzed the main sources of various types of microplastics, and provided effective information guidance for pollution risk control and ecological environment control of microplastics in Xi´an City urban reaches of Bahe River.

Keywords microplastics freshwater environment particle size distribution upper layer of water body sediment

随着塑料的大量生产与使用,环境中的微塑料浓度不断增加,微塑料污染已成为与臭氧耗竭、海洋酸化、气候变化等并列的全球性环境问题[1-3]。以往的研究主要集中在海洋环境中微塑料污染,最新研究[4]发现,海洋环境中 70% 的微塑料来源于河流,尤其是内陆城市河流。微塑料的大量赋存会对

[收稿日期] 2022-01-27
[基金项目] 省级大学生创新创业训练计划项目(S202210702056)
[作者简介] 黄毅(1987—),女,博士,研究方向为水质生物预警,E-mail:huangyiwater@xatu.edu.cn。
[通信作者] 赵平歌,研究方向为水污染控制和建筑节能,E-mail:xazhpg@sina.cn。

生物产生毒性效应,造成严重的生态风险[5-6],甚至可通过食物链传递[7-8],威胁人体健康。相较于海洋环境,内陆淡水环境与人类接触更为频繁,因此,开展淡水环境中微塑料水体污染调查与生态风险评价的研究已刻不容缓。

近年来我国学者对淡水环境中的微塑料污染已经愈发重视。根据目前的调查结果,微塑料污染在我国淡水环境中已普遍存在,并显现出一些本土化特征:丰度高、种类多、粒径小[9]。从污染水平上看,我国淡水环境中的微塑料赋存丰度高于其他国家和地区[10-12]。另外,我国淡水环境中检出的微塑料种类繁多,主要包括4类:聚丙烯(PP)、聚乙烯(PE)、聚苯乙烯(PS)和对苯二甲酸与乙二醇的缩聚物(PET)。但需要指出的是,现阶段我国淡水环境的微塑料污染调查还不够全面,相关研究主要集中在长江中下游地区[10,12-16],该地区人口密集,工业较发达,微塑料的污染可能较为严重;而除了珠江流域出现了一次微塑料检出的报道外[12],在我国其他主要水系,如黄河、淮河和松花江流域,有关微塑料污染的调查研究较少。因此,应尽快调查这些地区的微塑料赋存特征,明晰我国淡水环境中微塑料污染的分布规律。

研究通过比较3种消解剂(H_2O_2、芬顿试剂和HNO_3)[17-19]和浮选剂(NaCl和$ZnCl_2$饱和溶液)[18,20-21]对淡水环境的微塑料回收效果,确定预处理方法,并依据此方法对西安城区灞河河段的微塑料进行分离提取,进而分析出西安城区灞河河段微塑料的特征以及相对污染程度。

1　试验材料与方法

1.1　试验设计

1.1.1　预处理方法

该试验选择的消解液主要有质量分数为30%的H_2O_2、芬顿试剂[0.05 mol/L Fe(Ⅱ)+30%H_2O_2]和质量分数为65%的HNO_3,浮选剂有NaCl和$ZnCl_2$饱和溶液,具体分离条件如表1所示。样品经消解液30%H_2O_2、芬顿试剂[0.05 mol/L Fe(Ⅱ)+30%H_2O_2]和65% HNO_3在恒温水浴槽中消解30 min后,在浮选剂(NaCl和$ZnCl_2$饱和溶液)中轻轻搅拌后静置15 min,连续浮选3次,收集溢出液,将微塑料过滤到孔径为0.45 μm的醋酸纤维素滤膜(Whatman)上。最后将滤膜置于培养皿中,室温下晾干,置显微镜下观察和计数。

表1　微塑料分离条件汇总
Tab. 1　Summary of Microplastics Separation Conditions

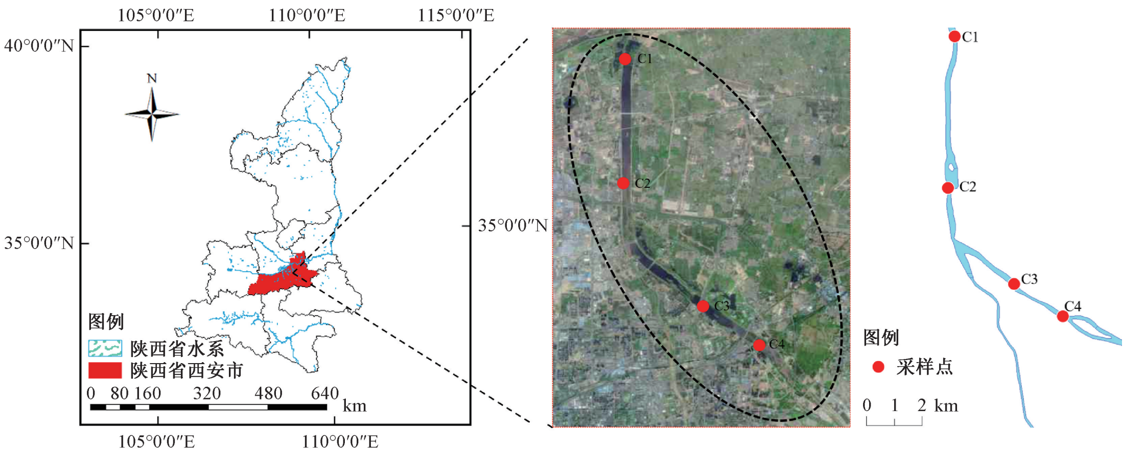
试验组别	消解液	浮选液	pH值	温度/℃
1	30%H_2O_2	饱和NaCl溶液	3	70
2	30%H_2O_2	饱和$ZnCl_2$溶液	3	70
3	30%H_2O_2+0.05 mol/L Fe(Ⅱ)	饱和NaCl溶液	3	70
4	30%H_2O_2+0.05 mol/L Fe(Ⅱ)	饱和$ZnCl_2$溶液	3	70
5	65%HNO_3	饱和NaCl溶液	<1	25
6	65%HNO_3	饱和$ZnCl_2$溶液	<1	25

1.1.2　西安城区灞河河段概况介绍及样品的采集

灞河发源于陕西省西安市蓝田县灞源镇麻家坡,全长为109 km,流经西安市灞桥区、未央区。西安城区灞河河段采样点设计考虑了受人为活动影响较大的河流区域,以及受人为活动影响较少的河流区域进行布点。本研究涉及的4个取样点分别为灞河湿地公园上游C1处(109°0′43.86″E,34°25′9.71″N)、G3002号公路灞河大桥C2处(109°0′36.99″E,34°22′4.60″N)、世博园下游灞河东路与东三环路西南角C3处(109°2′55.28″E,34°19′23.5″N)和灞桥生态湿地公园下游C4处(109°6′0.36″E,34°23′5.04″N),如图1所示。表层水体采用浓缩样本法,用铝制水桶随机采集3组20 L水样,经过5 mm不锈钢筛简单过滤,转入玻璃采样瓶内,密封带回实验室进行下一步研究。沉积物所需待采样品体积小,并不适合直接挑选法,故随机选择采样点附近5个点,采集河底表面沉积物,经不锈钢铲子随机采集一定质量(各1 kg)的沉积物样本,装至玻璃容器中,并用玻璃棒式温度计测量河水温度后,标记并密封保存,带回实验室研究。

1.1.3　表层水体和沉积物中微塑料的提取方法

将20 L的表层水体样品分设3个平行(各5 L),利用浊度仪检测表层水体样品浑浊度,若浑浊度>10 NTU,则需要利用30% H_2O_2加热(50 ℃,30 min)消解,直至浑浊度≤10 NTU才进行后续的二次消解(30%H_2O_2)、过滤[标准不锈钢筛网为2.000、1.000、0.500、0.125 mm(最低回收孔径)]、浮选(3次)、醋酸纤维膜过滤(Whatman, 0.45 μm),再经50 ℃恒温干燥至恒重。



(a) 陕西省水系图　(b) 灞河河段卫星图　(c) 灞河水系图

图 1　西安城区灞河河段采样点分布图

Fig. 1　Distribution Map of Sampling Points in Urban Section of Bahe River in Xi′an City

沉积物中微塑料的提取采用消解浮选法。将每个采样点采集的 5 个平行沉积物样品解冻后混合均匀，于烘箱里内 50 ℃干燥至恒重；每次称取 100 g 样品分别经过 18 目和 4 目的标准不锈钢筛网将一定量的沉积物样品进行筛分，收集尺寸在 1～5 mm 的微塑料用肉眼进行检查和统计，筛下沉积物样品（<1 mm）进行微塑料消解浮选法分离；取一定量的过筛后沉积物置于锥形瓶中，先用 30% H_2O_2 消解，消解温度为 50 ℃，消解时间为 30 min；接着对收集了微塑料的容量瓶中加入饱和 NaCl 溶液，在恒温水浴槽中进行浮选收集溢出液，将经过消解和浮选之后的溢出液，过 500 目不锈钢筛，用超纯水将筛上物质转移到容量瓶中；将微塑料过滤到孔径为 0.45 μm 醋酸纤维素滤膜（Whatman）上。最后将滤膜置于培养皿中，室温下晾干。利用目检法确定微塑料赋存情况（数量、颜色）；使用傅里叶红外光谱仪及扫描电镜-能谱仪（SEM-EDS）来判定微塑料化学成分及表面形貌。

1.2　试验材料与仪器

试验材料均购自西安瑞丽洁实验仪器有限公司，主要包括 NaCl、$ZnCl_2$、30% H_2O_2、$FeSO_4 \cdot 7H_2O$ 和 65% HNO_3，均为分析纯；8 种常用塑料［PE、聚氯乙烯（PVC）、PP、聚氨酯（PU）、热塑性聚氨酯弹性体（TPU）、丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物（ABS）、乙烯-醋酸乙烯共聚物（EVA）和聚对苯二甲酸四次甲基酯（PBT）］均购自上海丰泰塑化有限公司。利用人工剪裁、球磨机和标准不锈钢筛网将微塑料制作成 2.0、1.0、0.5 mm 这 3 种粒径，取干燥（先经过温度为 105～110 ℃恒温下烘干且烘干时间不得少于 8 h，再放入干燥器内冷却 0.5～1.0 h 即可）过筛（0.125 mm）后土样（粗砂为 15 g、粉砂为 10 g 和泥质为 50 g）与试验塑料（25 g）掺杂，模拟环境中杂质干扰。每组设 3 个平行。

1.3　数据处理与分析

微塑料回收率计算如式（1）。

$$\bar{R} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} r_i \tag{1}$$

其中：r_i——回收率，经目检法得到的微塑料质量在样品微塑料总数中的占比；

$\bar{R}$——回收率均值；

n——试验重复次数。

目检微塑料存在一定辨认误差，试验中发现红外鉴定确定是塑料成分的数量为实际目检数量的 70%，故在固定监测人员的基础上，对目检数据进行修正，修正系数为 0.7。

2　结果与讨论

2.1　消解液对微塑料回收效果的影响

如图 2 所示，试验组中组 1 和组 2 回收效果最好，回收率分别为 91.6%±8.0% 和 78.3%±21.1%，高于其他组别 1.6～1.8 倍，这表明消解液对微塑料检出效果的影响较大而浮选剂差异并不明显。即 30% H_2O_2 的处理效果明显高于 30% H_2O_2 + 0.05 mol/L Fe（Ⅱ）和 65% HNO_3。此外，不同消解液的消解对象和微塑料后续的材质鉴别也有很大的影响，

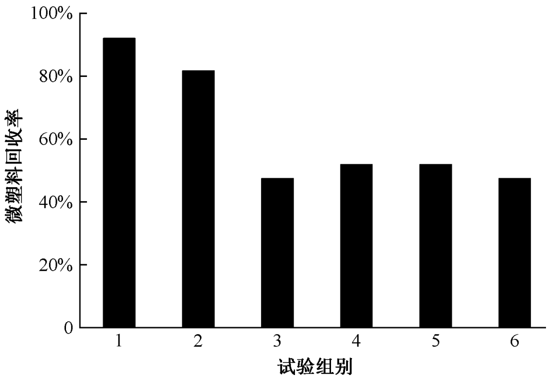


图 2　不同预处理条件下微塑料的回收效果

Fig. 2　Recovery Effect of Microplastics under Different Pretreatment Conditions

30%H_2O_2 可去除有机质效果好,在适当清洗后可有效减少红外杂峰,更利于微塑料材质的鉴别[20];30%H_2O_2+0.05 mol/L Fe(Ⅱ)去除有机质效果好,但配制过程较复杂,对微塑料表面残有的纤维素无法消解[17-18];65%HNO_3 可有效消解生物样品,但也会消解部分微塑料,对回收结果有影响[22]。故选择 30%H_2O_2 作为预处理的消解液。

2.2　浮选剂对微塑料回收效果的影响

由图 3 可知,饱和 $ZnCl_2$ 溶液和饱和 NaCl 溶液 2 种浮选剂对不同种类的微塑料回收差异不大。当微塑料粒径为 2 mm 时,$ZnCl_2$ 溶液对 6 种微塑料的回收率优于 NaCl 溶液;在粒径为 1 mm 时,$ZnCl_2$ 溶液的回收率略高于 NaCl 溶液。当微塑料粒径为 0.5 mm 时,PP 和 TPU 两种微塑料的回收率最高,分别为 100% 和 97%;PE 最差,回收率低于 30%,EVA 次之,平均值在 40%左右。当粒径为 0.5 mm 时,PU、PBT 回收率为 0。微塑料粒径越大,回收率越高,但对不同材质的微塑料回收略有不同。

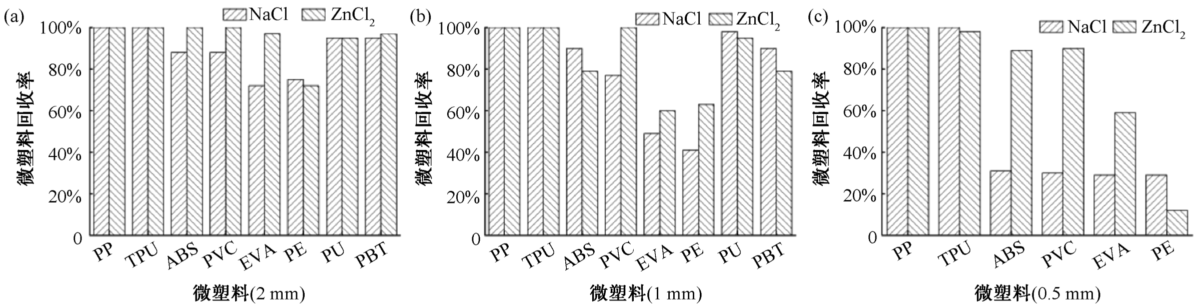


图 3　不同浮选剂处理下微塑料回收结果

Fig. 3　Recovery Effect of Microplastics Treated by Different Flotation Agents

综上,2 种浮选剂对淡水环境中微塑料颗粒分离效果显著,但差异并不明显(p<0.05),饱和 $ZnCl_2$ 溶液平均回收率为 86.6%±20.0%,饱和 NaCl 溶液平均回收率为 76.8%±26.0%。但饱和 $ZnCl_2$ 溶液配置要求较高,循环利用费时,而饱和 NaCl 溶液价廉易得,有明显的经济优势。故本文选择饱和 NaCl 溶液作为预处理的消解液。

2.3　西安城区灞河河段微塑料调查

2.3.1　表层水体中微塑料的调查

西安城区灞河河段地表水普遍受到微塑料污染,各个取样点均有检出。河段表层水体中取样点各处微塑料的数量相差不大,均值为 8.28 个/L,如表 2 所示,微塑料的主要尺寸为 0.125~0.355 mm,材质主要为 PET、PE、PP,形态主要为纤维状和碎片状,多呈现透明、紫、蓝、黑色。其中,C2 处的微塑料数量较多,为(10.10±2.32)个/L,这可能是 C2 地区处在 G3002 号公路灞河大桥,上游酒店和居民住宅较多,生活污水中含有较多的洗涤物脱落,且尺寸较小,不易沉降,进而导致在表层水体中检出较多。C3 地区位于世博园下游,临近个工

表 2　各采样点表层水体的微塑料调查汇总

Tab. 2　Summary of Microplastic Surveys in Upper Layer of Water Body of Each Sampling Point

采样点	数量/(个·L^{-1})	尺寸/mm	颜色	主要材质类型	主要形态
C1	8.77±1.64	0.125~0.355	透明、紫、蓝、黑、黄	PET、PE、PP	纤维状、碎片状
C2	10.10±2.32	0.125~0.355	透明、紫、蓝、黑、其他	PET、PE、PP	纤维状、碎片状
C3	6.53±2.36	1.000~5.000	透明、粉、蓝、黑、红	PET、PE、PP	纤维状、碎片状
C4	7.70±1.97	0.125~0.355	透明、紫、蓝、黑、黄	PET、PE、PP	纤维状、碎片状

业区,建筑装修垃圾较多,塑料制品裂解后出现大块的纤维状、碎片状,导致C3区域表层水体检出的尺寸较大。

2.3.2 沉积物中微塑料的调查

西安城区灞河河段沉积物中均回收到微塑料,其均值为17.12个/kg,是表层水体的2~3倍,且尺寸更大,除了C3区外,其余均集中在0.355~1.000 mm,尺寸相差较大可能是沉积物与表层水体中的微塑料的密度不同导致的。沉积物中的主要形态为纤维状和碎片状,多呈现透明、紫、蓝、黑色,主要材质为PET、PE、PP。各采样点相差较大,如表3所示,C4处沉积物中微塑料数量较多,为2.506×10^4个/kg,这可能是C4处在灞桥生态湿地公园下游,人类活动产生的大多数次生微塑料随底层泥沙裹挟汇聚于此,进而导致此处沉积物中微塑料检出较多。此外,在C3、C4的沉积物中除了回收出纤维状的微塑料,还回收出球状、颗粒状和薄膜状的微塑料,球状多为泡沫类的包装材料,薄膜状主要来自一次性餐具和包装袋,颗粒状主要与橡胶和塑料包装有关,黑色颗粒可能是汽车轮胎的磨损颗粒。

表3 各采样点沉积物中微塑料调查汇总

Tab. 3 Summary of Microplastic Surveys in Sediments of Each Sampling Point

采样点	数量/(个·kg^{-1})	尺寸/mm	颜色	主要材质类型	主要形态
C1	1.302×10^4	0.355~1.000	透明、紫、蓝、黑、黄	PET、PE、PP	纤维状、碎片状
C2	2.086×10^4	0.355~1.000	透明、紫、蓝、黑、其他	PET、PE、PP	纤维状、碎片状
C3	9.52×10^3	1.000~5.000	透明、粉、蓝、黑、红	PET、PE、PP	纤维状、碎片状、球状
C4	2.506×10^4	0.355~1.000	透明、紫、蓝、黑、黄	PET、PE、PS	纤维状、颗粒、薄膜

2.4 与其他内陆淡水水体中微塑料含量比较

微塑料污染可能在全世界淡水环境中普遍存在,其在淡水水体、沉积物和淡水生物中均有赋存,从现有报道来看,我国内陆淡水水体的微塑料污染可能十分严重。表4为部分内陆淡水水体表层水体或底层沉积物中微塑料含量,武汉的城市湖泊和河流普遍受到了微塑料污染,其中,北湖的微塑料丰度最高,为(8 925±1 591)个/m^3。三峡大坝附近的长江干流微塑料丰度高达3.41×10^6~1.36×10^7个/km^2,而香溪河回水区则为5.5×10^4~3.42×10^7个/km^2,均比其他内陆淡水水体中的微塑料丰度高出1~3个数量级,表明三峡库区存在着严重的微塑料污染。除了这些人类活动影响较大的区域外,在我国西藏色林措流域的沉积物中,已经发现了微塑料的赋存,其丰度为8~563个/m^2,表明青藏高原等偏远地区的微塑料污染同样不容忽视[23]。Su等[11]首次在我国太湖的蚌类体内检出了微塑料的赋存,其体内微塑料累积量是底泥中的38~3 810倍,表明底栖无脊椎动物同样可能会赋存较多的微塑料。

表4 部分内陆淡水水体中微塑料的含量

Tab. 4 Content of Microplastics in Some Inland Freshwater Bodies

地区或河流	采样点	微塑料材质类型	微塑料含量	参考文献
南京市	农田土壤	邻苯二甲酸盐(PAEs)	0.15~9.68 mg/(kg·m^2)	[24]
三峡库区香湖湾	地表水	PE、PP、PS	5.5×10^4~3.42×10^7个/km^2	[25]
	沉积物	PE、PP、PET	80~864个/m^2	
	鱼类	PE、PA	有检出	
武汉市	城市各湖表层水	PET、PP	(1 660.0±639.1)~(8 925±1 591)个/m^3	[26]
	汉江表层水		(2 933±305.5)个/m^3	
内陆湖泊-青海湖	表层水	PE、PP	3×10^3~3.1×10^4个/km^2	[20]
	沉积物		50~1 292个/m^2	
	鱼类		2~15个/m^2	

(续表4)

地区或河流	采样点	微塑料材质类型	微塑料含量	参考文献
上海某污水厂	进水	人造丝(RN)、PU、PET	117 个/L	[18]
	调配水		90 个/L	
	出水		52 个/L	
	污泥		180 个/(50 g)(湿重)	
西藏北部四陵坳陷盆地	湖岸沉积物	PE、PP、PS、PET、PVC	(8±14)~(563±1 219)个/m^2	[27]
珠江清远市	北江沿岸带表层沉积物	PE、PP	(178±69)~(544±107)个/kg(沉积物)	[28]
太湖	表层水	PT	3. 4~25. 8 个/L	[11]
	沉积物		11. 0~234. 6 个/kg(干重)	
	浮游生物净样品		1×10^4~6.8×10^6个/km^2	
	亚洲蛤		0. 2~12. 5 个/g(湿重)	
色林措	沉积物	/	(8±14)~(563±1 219) 个/m^2	[23]
乐安河-鄱阳湖段	沉积物	PE、PP、PS	1 800 个/kg	
	上游		1 121 个/kg	
乐安河	支流大坞河区	PE、PP、PS	2 871 个/kg	[29]
	下游区		1 366 个/kg	

在微塑料材质类型上,三峡库区香湖湾、内陆湖泊-青海湖、西藏北部四陵坳陷盆地、珠江清远市、乐安河-鄱阳湖段和乐安河的地表水和沉积物微塑料种类主要以 PE 和 PP 为主,这两种材料广泛应用于人类的生产生活,例如薄膜、管道管材、汽车的零部件、日用品、电线电缆、包装材料等。这与西安城区灞河河段采样的调查结果类似。在数量上,三峡库区香湖湾、内陆湖泊-青海湖、上海市某污水厂和珠江清远市都呈现沉积物大于表层水体,这也与西安城区灞河河段的调查结果一致;其次,对比发现西安城区灞河河段表层水体微塑料含量接近太湖的污染水平,而西安城区灞河河段沉积物中微塑料的含量明显高于上海某污水厂(污泥)、珠江清远市(北江沿岸带表层沉积物)和乐安河-鄱阳湖段(沉积物),这表明西安城区灞河河段微塑料的污染程度较为严重。

3　结论

本文通过建立使用 30%H_2O_2 的消解液和饱和溶液 NaCl 的浮选剂对淡水环境中微塑料分离的方法,对西安城区灞河河段中 4 个采样点的采样分析可知,西安灞河城市河段表层水体和沉积物中微塑料,均值分别为 8. 28 个/L 和 17. 12 个/kg, 主要尺寸分别为 0. 125~0. 355 mm 和 0. 355~1. 000 mm,材质类型主要有 PET、PE、PP。结合其周围环境分析可知,纤维状 PET 的污染源多为衣物加工纤维、橡胶颗粒等,透明色和黑色居多,PE 和 PP 多为碎片状,污染来源主要为日用品的包装容器等,紫色和蓝色较多。对比我国部分内陆淡水水体的微塑料含量,发现沉积物中微塑料含量高于珠江清远市(北江沿岸带表层沉积物)和乐安河-鄱阳湖段(沉积物),这表明西安城区灞河河段微塑料污染较为严重,应予以重视。

参考文献

[1] DEKIFF J H, REMY D, KLASMEIER J, et al. Occurrence and spatial distribution of microplastics in sediments from Norderney [J]. Environmental Pollution, 2014, 186: 248-256. DOI: 10. 1016/j. envpol. 2013. 11. 019.

[2] CÓZAR A, ECHEVARRIÁ F, GONZALEZ-GORDILLO J I, et al. Plastic debris in the open ocean[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2014, 111(28): 10239-10244. DOI: 10. 1073/pnas. 1314705111.

[3] THOMPSON R C, MOORE C J, VOM SAAL F S, et al. Plastics, the environment and human health: Current consensus and future trends[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 2009, 364: 2153-2166. DOI: 10. 1098/rstb. 2009. 0053.

[4] YANG L, ZHANG Y L, KANG S C, et al. Microplastics in freshwater sediment: A review on methods, occurrence, and

sources[J]. Science of the Total Environment, 2021, 754: 141948. DOI: 10. 1016/j. scitotenv. 2020. 141948.

[5] 周倩, 章海波, 李远, 等. 海岸环境中微塑料污染及其生态效应研究进展[J]. 科学通报, 2015, 60(33): 3210-3220.

[6] 王赛, 张岚, 陈永艳, 等. 饮用水处理技术去除微塑料的效果及进展[J]. 净水技术, 2021,40(10): 20-25, 61.

[7] 许龙, 王志峰. 某水厂中微塑料的赋存及去除特性[J]. 净水技术, 2020,39(7): 109-113, 120.

[8] SETÄLÄ O, FLEMING-LEHTINEN V, LEHTINIEMI M. Ingestion and transfer of microplastics in the planktonic food web [J]. Environmental Pollution, 2014, 185: 77-83. DOI: 10. 1016/j. envpol. 2013. 10. 013.

[9] 丁剑楠, 张闪闪, 邹华, 等. 淡水环境中微塑料的赋存、来源和生态毒理效应研究进展[J]. 生态环境学报, 2017(9): 1619-1626.

[10] ZHANG K, XIONG X, HU H, et al. Occurrence and characteristics of microplastic pollution in Xiangxi Bay of Three Gorges Reservoir, China [J]. Environmental Science & Technology, 2017, 51(7): 3794-3801. DOI: 10. 1021/acs. est. 7b00369.

[11] SU L, XUE Y, LI L, et al. Microplastics in Taihu Lake, China [J]. Environmental Pollution, 2016, 216: 711-719. DOI: 10. 1016/j. envpol. 2016. 06. 036.

[12] WANG J, PENG J, TAN Z, et al. Microplastics in the surface sediments from the Beijiang River littoral zone: Composition, abundance, surface textures and interaction with heavy metals [J]. Chemosphere, 2017, 171(3): 248-258. DOI: 10. 1016/ j. chemosphere. 2016. 12. 074.

[13] JABEEN K, SU L, LI J, et al. Microplastics and mesoplastics in fish from coastal and fresh waters of China[J]. Environmental Pollution, 2017, 221: 141-149. DOI: 10. 1016/j. envpol. 2016. 11. 055.

[14] PENG G, ZHU B, YANG D, et al. Microplastics in sediments of the Changjiang Estuary, China[J]. Environmental Pollution, 2017, 225: 283-290. DOI: 10. 1016/j. envpol. 2016. 12. 064.

[15] ZHAO S, ZHU L, WANG T, et al. Suspended microplastics in the surface water of the Yangtze Estuary System, China: First observations on occurrence, distribution[J]. Marine Pollution Bulletin, 2014, 86(1/2): 562-568. DOI: 10. 1016/j. marpolbul. 2014. 06. 032.

[16] 宋丹丹, 王秀莉, 尚玉俊, 等. 郑州市河道沉积物中微塑料的污染特征[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2022, 52(3): 99-105.

[17] LIU X, YUAN W, DI M, et al. Transfer and fate of microplastics during the conventional activated sludge process in one wastewater treatment plant of China [J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 362: 176-182. DOI: 10. 1016/j. cej. 2019. 01. 033.

[18] 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.

[19] IMHOF H K, SCHMID J, NIESSNER R, et al. A novel, highly efficient method for the separation and quantification of plastic particles in sediments of aquatic environments[J]. Limnology and Oceanography: Methods, 2012, 10(7): 524-537. DOI: 10. 4319/lom. 2012. 10. 524.

[20] XIONG X, ZHANG K, CHEN X C, et al. Sources and distribution of microplastics in China´s largest inland lake-Qinghai Lake[J]. Environmental Pollution, 2018, 235: 899-906. DOI: 10. 1016/j. envpol. 2017. 12. 081.

[21] 刘凯, 冯志华, 方涛, 等. 3 种典型潮滩沉积物微塑料分离方法研究[J]. 水生态学杂志, 2017, 38(4): 36-42.

[22] 高凡. 内陆城市河流和污水厂中微塑料赋存特征研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2020.

[23] ZHANG K, SU J, XIONG X, et al. Microplastic pollution of lakeshore sediments from remote lakes in Tibet Plateau, China [J]. Environmental Pollution, 2016, 219: 450-455. DOI: 10. 1016/j. envpol. 2016. 05. 048.

[24] WANG W, 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]. Science of the Total Environment, 2017, 575: 1369-1374. DOI: 10. 1016/j. scitotenv. 2016. 09. 213.

[25] 吴辰熙, 潘响亮, 施华宏, 等. 我国淡水环境微塑料污染与流域管控策略[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33(10): 1012-1020.

[26] 王文锋. 华中地区湖泊微塑料污染特征及其与菲、芘的吸附行为研究[D]. 武汉: 中国科学院大学(中国科学院武汉植物园), 2018.

[27] JIANG C, YIN L, LI Z, et al. Microplastic pollution in the rivers of the Tibet Plateau[J]. Environmental Pollution, 2019, 249(6): 91-98. DOI: 10. 1016/j. envpol. 2019. 03. 022.

[28] YAN M, NIE H, XU K, 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. DOI: 10. 1016/j. chemosphere. 2018. 11. 093.

[29] 简敏菲, 周隆胤, 余厚平, 等. 鄱阳湖-饶河入湖段湿地底泥中微塑料的分离及其表面形貌特征[J]. 环境科学学报, 2018, 38(2): 579-586.