

• 综 述 •

黄河流域微塑料污染现状及防治策略

刘赞¹, 孙中亮², 史良^{3*}, 王强²

1 河南省生态环境监测中心 河南省环境监测技术重点实验室, 河南 郑州 450046

2 河南大学 省部共建作物逆境适应与改良国家重点实验室, 河南 开封 475004

3 开封市水产技术推广站, 河南 开封 475000

刘赞, 孙中亮, 史良, 王强. 黄河流域微塑料污染现状及防治策略[J]. 生物工程学报, 2023, 39(2): 488-499.

LIU Zan, SUN Zhongliang, SHI Liang, WANG Qiang. Microplastics pollution in the Yellow River basin: current status and control strategy[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2023, 39(2): 488-499.

摘 要: 微塑料污染(microplastics pollution)在全球范围内受到广泛关注。相比于海洋环境以及其他主要河流、湖泊的微塑料污染情况, 黄河流域的相关数据较为贫乏。通过综述文献分析了黄河流域河道沉积物和表层水的微塑料污染丰度、类型以及空间分布特征, 探讨了黄河流域重要城市和重点保护区的微塑料污染现状, 并提出了相应的防控措施。结果表明: 黄河流域沉积物和表层水中微塑料污染在空间分布上整体呈现自上游向下游增多的趋势, 尤其在黄河三角洲湿地该趋势更加明显; 黄河流域沉积物和表层水中微塑料类型存在明显差异, 主要与微塑料的材质有关; 与全国同类区域相比, 黄河流域国家重点城市市域和国家湿地公园的微塑料污染水平处于中高程度, 应引起重视; 塑料通过多种暴露途径会对黄河滩区养殖业和人类健康造成严重影响。控制黄河流域水体微塑料污染, 需要完善相关生产标准和法律法规, 提高可降解微塑料产能和塑料废弃物的工程化降解能力。

关键词: 黄河流域; 微塑料污染; 丰度; 国家中心城市; 黄河口三角洲湿地

资助项目: 国家重点研发计划(2021YFA0909600); 河南省高校科技创新团队(22IRTSTHN024)

This work was supported by the National Key Research and Development Program of China (2021YFA0909600) and the Program for Innovative Research Team (in Science and Technology) in University of Henan Province (22IRTSTHN024).

*Corresponding author. E-mail: kfscz@126.com

Received: 2022-06-27; Accepted: 2022-09-16; Published online: 2022-09-23

Microplastics pollution in the Yellow River basin: current status and control strategy

LIU Zan¹, SUN Zhongliang², SHI Liang^{3*}, WANG Qiang²

1 Henan Key Laboratory of Environmental Monitoring Technology, Henan Ecological Environment Monitoring Center, Zhengzhou 450046, Henan, China

2 State Key Laboratory of Crop Stress Adaptation and Improvement, Henan University, Kaifeng 475004, Henan, China

3 Kaifeng Aquatic Technology Promotion Station, Kaifeng 475000, Henan, China

Abstract: Microplastics pollution has attracted worldwide attention. Compared with the status quo of microplastics pollution in marine environment and other major rivers and lakes, the relevant data of the Yellow River basin is relatively inadequate. The abundance, types, and spatial distribution characteristics of microplastic pollution in the sediments and surface water of the Yellow River basin were reviewed. Meanwhile, the status of microplastic pollution in the national central city and Yellow River Delta wetland was discussed, and the corresponding prevention and control measures were put forward. The results showed that the spatial distribution of microplastics pollution in sediments and surface water of the Yellow River basin increased from upstream to downstream, especially in the Yellow River Delta wetland. There are obvious differences between the types of microplastics in sediment and surface water in the Yellow River basin, which is mainly related to the materials of microplastics. Compared with similar regions in China, the microplastics pollution levels in national key cities and national wetland parks in the Yellow River basin are in the medium to high degree, which should be taken seriously. Plastics exposure through various ways will cause serious impact on aquaculture and human health in the Yellow River beach area. To control microplastic pollution in the Yellow River basin, it is necessary to improve the relevant production standards, laws and regulations, and improve the capacity of biodegradable microplastics and the degradation capacity of plastic wastes.

Keywords: Yellow River basin; microplastics pollution; abundance; national central city; Yellow River Delta wetland

黄河发源于我国青藏高原巴颜喀拉山北麓,呈“几”字形流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、山西、陕西、河南、山东9个省(自治区),全长为5 464 km,是我国第二长河。黄河流域西接昆仑、北抵阴山、南倚秦岭、东临渤海,横跨东中西部,是我国重要的生态安全屏障,也是人口活动和经济发展的重要区域,在国家发展大局和社会主义现代化建设全局中具有举足轻重的战略地位^[1]。2021年10月,国务院印

发了《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》,为当前和今后一个时期黄河流域生态保护和高质量发展指明了方向^[2-3]。

塑料是现代人类生活的必需品,充斥着人类活动的每一个环节。根据欧洲统计局2016年公布的数据,全球塑料总产量为3.35亿t,且每年都以4%左右的速度增长^[4]。我国是世界上塑料生产量最大的国家,占全球总量的26%^[5]。由于塑料循环利用的概率很低(6%–26%),因此每年

都有大量的塑料进入自然界,包括土壤、河流、湖泊以及海洋等^[6]。值得注意的是,大多数塑料都是有机合成物,降解难度高、速度慢,且会随着生物链迁移,在不同阶段累积,对生命活动造成危害。南京大学的研究团队调查了来自中国 11 个省市志愿者的粪便样本,发现粪便中微塑料已经常态化,同时证实体内微塑料含量越高,发生肠道炎症的几率越高^[7]。来自荷兰阿姆斯特丹自由大学的研究团队首次在人类志愿者血液中发现了微塑料,这进一步引发了微塑料对人体健康长期影响的担忧^[8]。

相比于较为丰富的海洋微塑料污染数据,淡水环境中微塑料数据收集得还比较少,尤其是主要河流、水库的数据较为欠缺,图 1 是基于中国学术期刊网络出版总库和 Web of Science 数据库,对近 5 年来我国学者在微塑料污染方面的研究统计。结果显示,相对于其他内陆河流和湖泊,黄河流域在此方面的关注度较低。但是,黄河是中华民族的母亲河,流域范围广、生活人口多,已建成的大小水库有 3 100 多座,是流域内 1.2 亿居民的饮用水来源;黄河滩区养殖

是内陆水产养殖的重要组成部分,养殖品种多样,为流域内居民的营养健康提供了保障。可见,了解黄河流域的污染状况,尤其是不可降解的微塑料污染状况,对于居民身体健康和养殖水产品的质量都至关重要,对提升流域生态保护和高质量发展也具有重要意义。因此,本论文通过调研文献,综述了黄河上中下游河道沉积物和表层水的微塑料污染状况,结合流域中心城市、重点区域的微塑料污染特征,讨论人类生产活动与微塑料污染的相互关系,以期微塑料污染的防控思路提供科学依据。

1 黄河沉积物和水体微塑料污染现状

河流中微塑料的调查位点一般包括河床沉积物和表层水^[9-10]。其中沉积物中微塑料的丰度常以干重计,单位以“items/kg”表示,具体方法是采用抓泥斗采集河道表层沉积物,烘干后过筛,通过肉眼及光学显微镜检查和统计。表层水中微塑料的调查方法主要有拖网法和瓶采法,单位以“items/L”表示。由于黄河河道泥沙较多,沉积物一般以河流两岸随机位点的表层土代替。

1.1 微塑料污染的丰度特征

图 2 对比分析了不同阶段黄河沉积物中微塑料的丰度,侧面反映出流域内微塑料污染的空间变化。具体地,黄河中下游地区河道沉积物微塑料丰度较高,超过 300 items/kg,是上中游地区的 4-7 倍。河道沉积物中微塑料的丰度主要与河流流经市域的人口、经济发展水平等因素相关^[11-13]。图 3 梳理了 2020 年黄河流域上中下游地级市的经济生产总值和服务业生产总值的数据。结果显示,中游和下游城市的经济总量占据整个黄河流域的 80%左右,同样地,以物流、餐饮等塑料使用量较多的行业为代表的第三

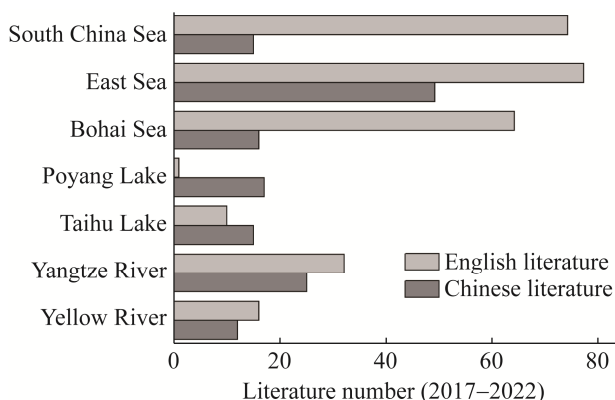


图 1 近 5 年国内学者针对不同区域发表的与微塑料污染相关的文章数量

Figure 1 Number of articles on microplastics pollution in different regions published by Chinese researchers in the past five years.

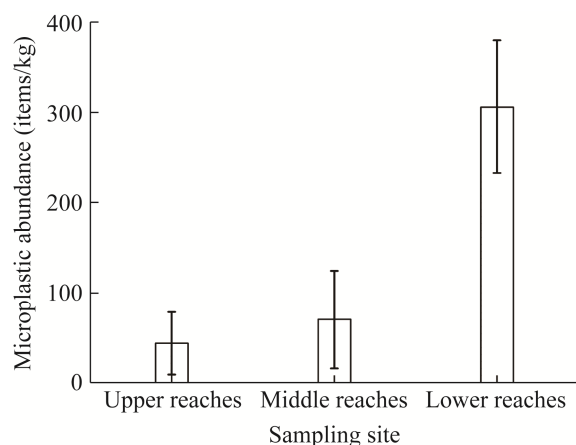


图2 不同阶段黄河沉积物中微塑料丰度

Figure 2 Abundance of microplastics in the sediments of different reaches of Yellow River ($n>3$, data = $\bar{x} \pm s$).

产业在中游和下游地区也较为发达,分别占据区域总量的 38.27%和 40.68%。综合对比微塑料污染的数据,可以得出经济越发达地区塑料使用量越多,临近黄河河道沉积物中微塑料污染越严重。但是,从图 3 可以看出黄河流经的中游和下

游地区经济发展水平接近,但是微塑料污染情况差别较大,这主要是由于黄河在中游段的总落差较大,约 890 m,而在下游段的总落差仅为 93.6 m,落差小的区域水流速度慢,微塑料等固体废弃物更容易沉积。

与我国长江流域相比,黄河沉积物中微塑料含量明显较低(表 1)。在之前的多个模型研究中,长江被认为是全球微塑料输海通量最高的河流,这些模型不仅涵盖了区域人口、经济、水文及农工服三产结构等因素,并且对整个长江流域微塑料污染的来源、归趋和生态效应进行了详细地分析研究。相反,黄河流域在此方面的数据严重不足,值得进一步梳理总结。

通过分析近 20 年来黄河流域城市群、省域和市域这 3 个维度的经济时空分布特征发现,山东半岛地区内部城市出现各产业聚集分布的特征,说明该地区城市群经济发展具有带动性^[17],2016 年起该趋势扩展到中原城市群,这和郑州

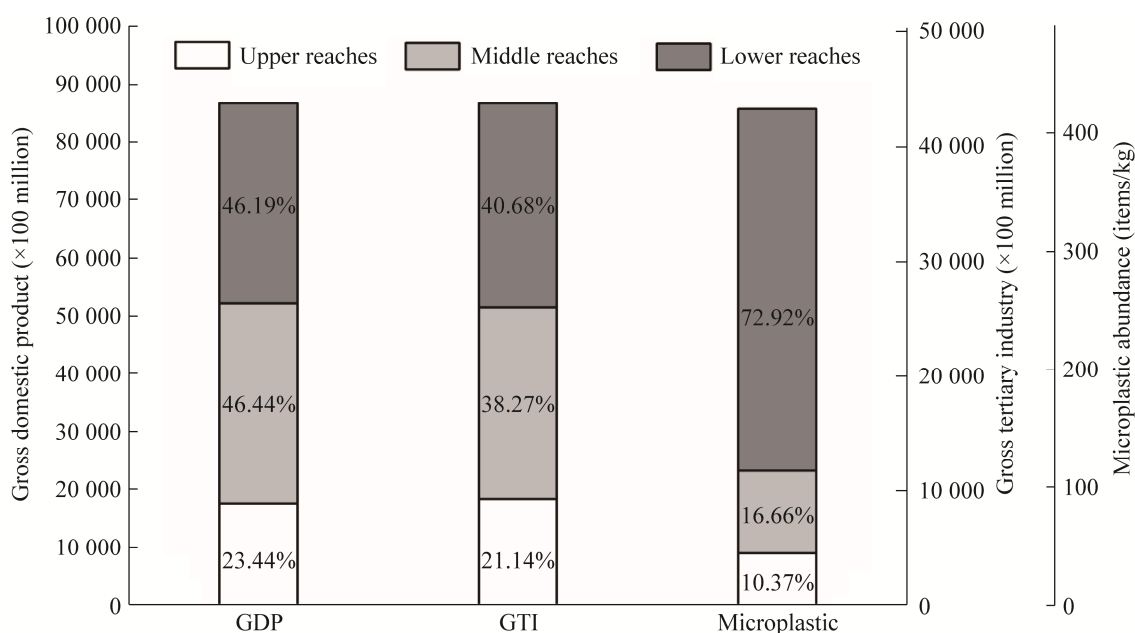


图3 黄河流域内城市经济发展水平与微塑料污染的相关性(数据来源于 <https://m.huaon.com/>)

Figure 3 Correlation between urban economic development level and microplastics pollution of the Yellow River basin (data from <https://m.huaon.com/>).

国家中心城市地位的确立有一定关系^[18]。经济发展与塑料生产量、塑料使用量以及微塑料污染程度都有密切相关性。因此,重点分析黄河流域中原城市群段和山东半岛城市群段的微塑料污染分布情况,更具有现实意义。图4以黄河入海口为坐标,分析了黄河表层水的微塑料污染丰度。图4A的采样位点从黄河济南段开始,依次经过滨州、东营等地,最终延伸至黄河口三角洲湿地,长度约350 km。结果显示,各采样点的微塑料丰度变化没有明显规律,平均分布在400 items/L至800 items/L之间^[19]。分析黄河流域山东半岛段的落差发现,相比关中、晋中、中原等地区,黄河河道的垂直落差较小,没有出现类似之前文献报道的微塑料在低水位地区聚集

的现象。相反,在黄河入海口,由于沙土长年累月堆积,形成了现在的黄河口三角洲湿地,黄河经由此地水流速度降低,缓慢入海。相比其他地区,黄河入海口的表层水微塑料丰度较高,最高达到930.2 items/L^[20]。

图4B整理了黄河口三角洲湿地周围60 km范围内的表层水中微塑料的丰度,结果显示,地表水的微塑料丰度随着距离的增加而线性下降,并且有相当高的相关系数^[20-21]。推测是因为河道的坡度变缓,且流速变慢,一些停留在沉积物中的微塑料也会逐渐上浮至表层水中。可见,黄河流域不同河段微塑料的空间分布具有不同的特征,收集整理黄河流域微塑料污染的大数据对于生态保护非常有必要。与国内外其他河流表层水

表1 长江和黄河的不同区域沉积物中微塑料丰度比较

Table 1 Comparisons of microplastics abundance in the sediments of Yellow River and Yangtze River

Regions	Size of microplastic particle (mm)	Abundance of microplastics (items/kg)	References
Yangtze River basin (Chongqing section)	0.005–5.000	84–544	[14]
Yangtze River basin (Poyang Lake, Jiangxi Province)	0.070–4.000	356–1 452	[15]
Yangtze River basin (Estuary)	0.020–5.000	81–480	[16]
Middle and lower reaches of the Yellow River	<5.000	15–375	[13]

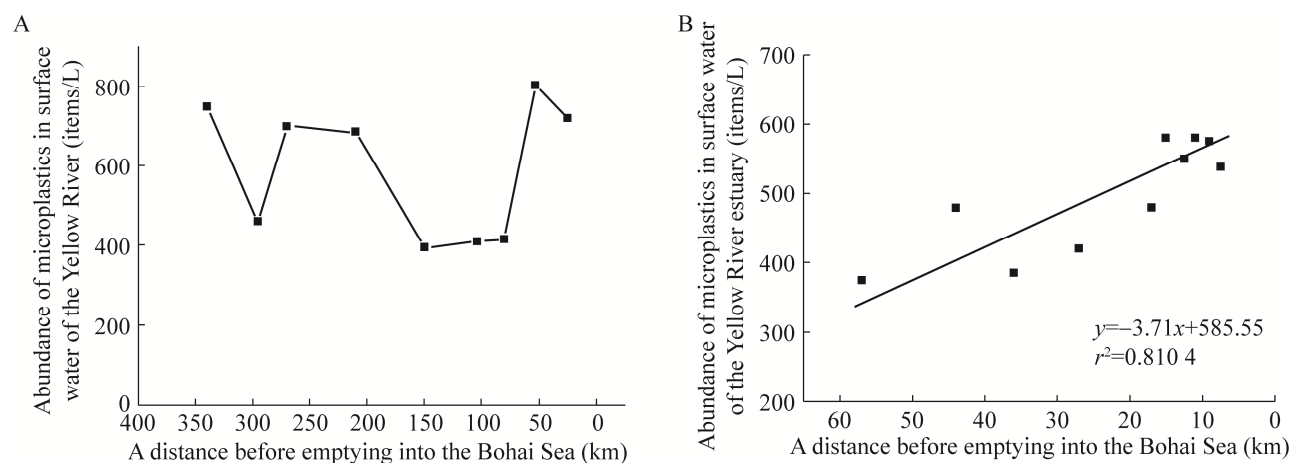


图4 距黄河口不同距离的采样点微塑料丰度分布 A: 黄河山东半岛段; B: 黄河口三角洲湿地

Figure 4 The profiles of microplastics abundances of sampling sites located at different distances from the estuary of Yellow River Shandong peninsula (A) and Yellow River Delta (B).

污染程度相比,黄河流域水体微塑料污染处于中等偏低的水平。表 2 对比了国内外知名河流的微塑料污染现状。由于样品采集方法和采集年代的差异性,数据与现阶段实际污染情况可能存在偏差。表中可以看出,与国内其他河流相比,黄河中下游水体表层水污染情况处于中等偏下水平。在国外知名河中,加拿大渥太华河道微塑料污染较少,这可能与当地人口数量少有关,其他知名河流的微塑料污染水平较黄河流域而言更高,如奥地利多瑙河微塑料丰度是黄河中下游的 17~44 倍,说明一定时期内经济发达国家的塑料使用量较多,也说明微塑料降解难度高。

1.2 微塑料污染的形貌和组成特征

微塑料的来源比较多,与人类生产生活密切相关,例如农田铺设的地膜、快递的泡沫包装、纤维衣物以及常用的购物袋等。由于塑料的回收率低(以地膜为例,回收率不足 10%)^[31],塑料经风吹日晒逐渐风化,并随径流进入河道,经水流冲击,逐渐形成微小碎片。由此形成的微塑料形貌与原材料有关,主要包括碎片类、发泡类、薄膜类和纤维类^[32]。综合文献数据,黄河沉积物和表层水中微塑料类型如图 5 所示^[13,19,21]。

可以看出,沉积物中微塑料的类型与表层水

中完全不同。在沉积物中,微塑料主要以碎片类和发泡类存在(分别占比 46%和 35%),而表层水中绝大多数的微塑料都是纤维状(占比 89%)。上述分布特征除了与不同区域的塑料输入类型有关外,还与塑料的材质有关。不同溶解性和密度的微塑料在沉积物和表层水中积累的趋势不一样,受多种物理和生物作用的影响。例如,在黄河沉积物中发现的微塑料成分聚氯乙烯、聚对苯二甲酸乙二醇酯等塑料的密度大于 1.0 g/cm³,自然会沉积到水底^[11];而低密度的聚丙烯、聚苯乙烯在表层水中的丰度较高。除此之外,微塑料受到雨水冲刷、碰撞等因素影响,表层凹凸不平,水体中微生物和藻类会贴附在其表面,从而增大了微塑料的下沉概率;细小的塑料也会被水生动物摄食,进而伴随其尸体沉积在河道底部^[33]。

近年来,生物可降解塑料聚乳酸、聚乙醇酸、聚羟基脂肪酸酯、聚己内酯等逐渐推广,产能不断上升,将在未来的人类活动中替代部分不可降解塑料^[34-36]。同时,一些新的降解技术,如国内外多家研究人员对生物酶进行改造,使得它可以高效地断开聚对苯二甲酸乙二醇酯的构成单元即对苯二甲酸与乙二醇之间的化学键,从而减少环境塑料,甚至有望降低微塑料的产生和侵害^[37-39]。

表 2 世界各国知名河流表层水中微塑料污染情况

Table 2 Abundances of microplastics in surface water in typical rivers of the world

Name	Location	Microplastic abundance	References
Yangtze River	Lake north section of Yangtze River	180~2 400 items/m ³	[22-23]
Yellow River	Shandong peninsula	380~952 items/m ³	[19]
Weihe River	Wei River basin	360~10 700 items/m ³	[24]
Pearl River	Pearl River basin	8 902 items/m ³	[25]
Haihe River	Haihe basin	690~74 950 items/m ³	[26]
Danube	Austria	17 000 items/m ³	[27]
Rhine	Germany	3 900 items/km ²	[28]
Chicago River	American	3.929×10 ⁹ items/km ²	[29]
Ottawa River channel	Canada	200 items/m ³	[30]

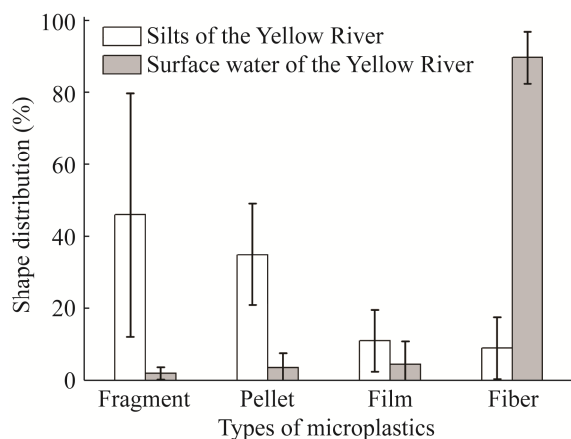


图5 黄河沉积物和表层水中微塑料的类型

Figure 5 Types of microplastics in the sediments or surface water of the Yellow River ($n>3$, data= $\bar{x} \pm s$).

2 中心城市和湿地微塑料污染现状

2.1 郑州市主城区段河道微塑料的污染情况

郑州是黄河沿线超大型城市，也是国家中心城市，人口密度高、经济发达，是区域微塑料产生的重要源头。2021年宋丹丹等调查了郑州市内7条主要河流沉积物中微塑料的污染状况^[40]。从表3可以看出，郑州市域微塑料污染水平在全国所有中心城市中处于中高污染程度，与西安市、广州市、上海市、武汉市相比微塑料

丰度较低，而与重庆市、天津市、北京市某些河道相比，微塑料污染严重。黄河在郑州段为地上河，此处距黄河入海口630 km，河段的平均海拔为4–6 m，因此，理论上基本无外源微塑料输入到黄河下游。但是由于郑州市域内周期性进行河道清淤，例如2016年实施了对郑东新区金水河、东风渠、十八里河等部分河段的清淤工作，2018年和2020年也分别对索须河、熊儿河等河段进行了清淤工作。部分河道淤泥被运往黄河南岸用于市政绿化，因此在一定程度上也间接导致黄河两岸表层土壤微塑料丰度增加。

2.2 黄河三角洲湿地微塑料的污染特征

山东黄河三角洲国家自然保护区是地球暖温带地区最为广阔、最完整、最年轻的湿地生态系统，是以保护新生湿地生态系统和珍稀濒危鸟类为主的湿地类型自然保护区。其微塑料污染状况将潜移默化地改变当地生境、生态系统结构和功能等，进而影响到其为人类所能提供的基础性服务。赵爽于2020年完成了对黄河三角洲湿地中微塑料的初步调查，以表层土壤的干重计，发现当地土壤中微塑料的丰度为80–4 640 items/kg，平均丰度为1 142 items/kg，颗粒大小范围为5.78 μm –3 mm，在土壤中的比重约为182 mg/kg^[21]。存在纤维、碎片、泡沫、

表3 全国中心城市典型河道沉积物中微塑料丰度比较

Table 3 Comparison of microplastics abundances in the sediments among the investigated urban rivers of the national central cities

Regions under study	Abundance of microplastics (items/kg)	References
Municipal river channels in Zhengzhou	2 412–7 683	[40]
Ba River in Xi'an	9 520–25 060	[41]
Pearl River in Guangzhou	80–9 597	[42]
Municipal rivers channels in Shanghai	1 462–9 086	[43]
Beitang Sewage River in Tianjin	183–238	[44]
Daliao River in Beijing	120–268	[45]
Municipal river channels in Chongqing	84–544	[14]
Suburban river channels in Wuhan	320–12 560	[46]

薄膜这 4 种类型,分析其材质后发现,原材料为聚苯乙烯(polystyrene, PS)的微塑料偏高,占比约 58.8%。近年来,由于湿地的生态功能不可逆地弱化,关于各种因素引起的湿地污染调查得到了国家和相关省市的重点支持,表 4 梳理了国内主要河口、滨海口湿地微塑料的污染情况。

3 微塑料污染对流域内生产活动的影响

3.1 微塑料对渔业生产的影响

在沿黄河流域,水产养殖是各地的支柱产业,在黄河滩区养殖的经济鱼类有 60 余种,其中黄河鲤鱼为四大淡水名鱼之一,淇河鲫鱼古为贡品。然而微塑料的污染对水产品品质造成不良影响,尽管各种水产品加工标准和养殖投入品相关标准中尚未对微塑料污染进行规定,但是微塑料经过鱼类摄食后进一步在生态链中上位,最终将影响人体健康。除此之外,微塑料加剧了鱼类病害发生,使得鱼药投入量增加,亩产减少。已有文献证实,聚氯乙烯(polyvinyl chloride, PVC)微塑料抑制了黄河鲤幼鱼的正常生长,通过暴露风险评估,显示微塑料能够扰乱性腺发育相关基因的表达和组织机构的正常形成^[51]。Limonta 等研究了高密度聚乙烯和聚苯乙烯微塑料对模式生物斑马鱼的影响,结果表明,在养殖水体中暴露 20 d 后,实验组斑马鱼的免疫系统基因表达

发生变化,且与脂类代谢相关的基因表达也下调^[52]。同样,也有文献报道了微塑料会降低水产养殖品种的机体抗病力,干扰脂肪和能量的代谢过程并影响生育功能^[53-54]。

有趣的是,开放式池塘中微塑料的丰度与氮磷浓度水平呈现同步变化的趋势,即氮磷污染水平高的水域,微塑料丰度也相对较高^[55-56]。该现象在一定程度上说明污染源在自然界的排放具有相似性特征,能够为微塑料污染的防治提供思路借鉴。

3.2 微塑料在生物链中的迁徙

调查、监测和防治微塑料污染的主要目的是避免微塑料在生物链中迁移,从而造成对人体健康的威胁。我国学者的研究报告指出成年人粪便中大多存在微塑料,说明成年人体内存在微塑料已经常态化^[7];甚至有学者在人类血液发现了微塑料。从科学上讲,微塑料可以通过人类循环系统到达全身的各个器官,此前已有研究证实,人类胎盘对 50、80、240 nm 的聚苯乙烯和聚丙烯微塑料具有渗透性,这进一步引发了微塑料对人类生存影响的担忧^[8]。

微塑料在生物链中的迁移从下而上,首先在动植物的裹挟下进入人类食物链,其次在人类消化道中积累并随循环系统到达各个器官。此外微塑料暴露的途径还有皮肤接触、呼吸道作用等。

表 4 国内典型湿地环境中微塑料丰度比较

Table 4 Comparison of microplastics abundance in typical wetland environments in China

Regions under study	Abundance of microplastics (items/kg)	References
Yellow River delta	80-4 640	[21]
Wetland in mangrove in Jiujiangkou	640-1 140	[47]
Wetland in Chongxi	2-7	[48]
Wetland in Poyang lake	1 146	[15]
Mangrove Forest Natural Reserve in Zhanjiang	108-486	[49]
Lake Dianchi farmland	13 020-28 100	[50]

4 结论与建议

通过综述文献分析了黄河流域河道沉积物和表层水中微塑料污染的现状,发现微塑料丰度不仅受河道海拔的影响,也与流经地区的发达程度尤其是使用塑料较多的第三产业的发达程度密切相关。不同微塑料的材质和化学组成决定了各自在沉积物和表层水中的丰度。微塑料体积小、难降解,可以通过多种暴露途径会对水产养殖业和人类健康造成威胁。与其他地区相比,黄河流域重点城市和入海口湿地的微塑料污染水平处于中高程度,应引起足够重视。

微塑料污染最早发现于海洋中,相对海洋较多的污染数据,内陆河流和湖泊等这些直接影响人类生活的淡水环境中微塑料污染数据较为贫乏。因此,黄河流域水体微塑料污染应引起高度重视,并在黄河流域生态保护和高质量发展战略实施过程中出台相关政策,加强对微塑料污染的防控。建议从以下几个方面开展:(1) 全面补充采集黄河流域微塑料污染数据,摸清微塑料在黄河流域土壤、大气、水体中的污染现状;(2) 加强微塑料污染溯源工作,将微塑料污染纳入各行业水体污染物排放标准中去;(3) 推广可循环利用、易回收的替代方案,如塑料包装的循环利用、农用地膜的回收利用等;(4) 支持绿色环保、减塑包装材料替代方案,加强研发推广低成本可降解塑料,助力可降解塑料产业的发展;(5) 多渠道拓展塑料降解技术,例如工程化 PET 解聚酶分解回收塑料的技术。

REFERENCES

- [1] 牟雪洁, 张箫, 王夏晖, 王金南, 饶胜, 黄金, 柴慧霞. 黄河流域生态系统变化评估与保护修复策略研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(1): 113-121.
MOU XJ, ZHANG X, WANG XH, WANG JN, RAO S, HUANG J, CHAI HX. Ecological change assessment and protection strategy in the Yellow River basin[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(1): 113-121 (in Chinese).
- [2] 迟妍妍, 王夏晖, 宝明涛, 张丽苹, 刘斯洋, 付乐, 许开鹏, 王晶晶. 重大工程引领的黄河流域生态环境一体化治理战略研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(1): 104-112.
CHI YY, WANG XH, BAO MT, ZHANG LP, LIU SY, FU L, XU KP, WANG JJ. Integrated governance of ecological environment in Yellow River Basin led by major projects[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(1): 104-112 (in Chinese).
- [3] 王家耀, 李贺颖. 黄河流域经济时空分异特征及其影响因素分析[J]. 人民黄河, 2022, 44(2): 1-6, 31.
WANG JY, LI HY. Temporal and spatial differentiation characteristics of economy in the Yellow River basin and its influencing factors[J]. Yellow River, 2022, 44(2): 1-6, 31 (in Chinese).
- [4] LAVENDER LAW K. Plastics in the marine environment[J]. Annual Review of Marine Science, 2017, 9: 205-229.
- [5] 刘国伟. 中国塑料制品产量全球第一, 塑料污染治理呼唤全流程管理[J]. 环境与生活, 2020(7): 26-33.
LIU GW. China's output of plastic products ranks first in the world, and plastic pollution control calls for full-process management[J]. Green Living, 2020(7): 26-33 (in Chinese).
- [6] 黄璐, 郑楠. 我国废弃塑料再生循环利用产业发展现状分析[J]. 橡塑资源利用, 2015(6): 27-33.
HUANG L, ZHENG N. Analysis on the development status of waste plastics recycling industry in China[J]. Rubber & Plastics Resources Utilization, 2015(6): 27-33 (in Chinese).
- [7] LIU SQ, WANG JW, ZHU JH, WANG J, WANG HQ, ZHAN XH. The joint toxicity of polyethylene microplastic and phenanthrene to wheat seedlings[J]. Chemosphere, 2021, 282: 130967.
- [8] LESLIE HA, van VELZEN MJM, BRANDSMA SH, VETHAAK AD, GARCIA-VALLEJO JJ, LAMOREE MH. Discovery and quantification of plastic particle pollution in human blood[J]. Environment International, 2022, 163: 107199.
- [9] 刘凯, 冯志华, 方涛, 徐军田, 叶浩达. 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.
LIU K, FENG ZH, FANG T, XU JT, YE HD. Evaluation of three extraction methods for microplastics in intertidal sediments[J]. Journal of Hydroecology, 2017, 38(4): 36-42 (in Chinese).
- [10] 何建武, 安立会, 齐红莉. 淡水环境微塑料研究进展[J]. 天津农学院学报, 2021, 28(1): 67-72, 101.
HE JW, AN LH, QI HL. Research progress of

- microplastics in freshwater environment[J]. Journal of Tianjin Agricultural University, 2021, 28(1): 67-72, 101 (in Chinese).
- [11] SU L, XUE YG, LI LY, YANG DQ, KOLANDHASAMY P, LI DJ, SHI HH. Microplastics in Taihu Lake, China[J]. Environmental Pollution, 2016, 216: 711-719.
- [12] ZHANG K, SU J, XIONG X, WU X, WU CX, LIU JT. Microplastic pollution of lakeshore sediments from remote lakes in Tibet plateau, China[J]. Environmental Pollution, 2016, 219: 450-455.
- [13] 龚喜龙, 张道勇, 潘响亮. 黄河沉积物微塑料污染和表征[J]. 干旱区研究, 2020, 37(3): 790-798.
GONG XL, ZHANG DY, PAN XL. Pollution and characterization of microplastics in the sediments of the Yellow River[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(3): 790-798 (in Chinese).
- [14] 赵国良, 樊建新. 重庆市主城区段长江沿岸土壤中微塑料的分布特征[C]. 2019 年中国土壤学会土壤环境专业委员会、土壤化学专业委员会联合学术研讨会论文摘要集. 重庆, 2019: 197.
ZHAO GL, FAN JX. Distribution characteristics of microplastics in soils along the Yangtze River in the main urban section of Chongqing[C]. Abstracts of the 2019 Joint Symposium of Soil Environment Committee and Soil Chemistry Committee of Chinese Soil Society. Chongqing, 2019: 197 (in Chinese).
- [15] 周隆胤. 鄱阳湖典型湿地沉积物中微塑料的赋存特征[D]. 南昌: 江西师范大学硕士学位论文, 2019.
ZHOU LY. Occurrence characteristics of microplastics in the sediments of typical wetlands of Poyang Lake[D]. Nanchang: Master's Thesis of Jiangxi Normal University, 2019 (in Chinese).
- [16] 徐沛. 长江口邻近海域微塑料时空分布特征及生态风险评估初步研究[D]. 上海: 华东师范大学硕士学位论文, 2019.
XU P. Spatial and temporal distribution of microplastics and a preliminary study on ecological risk assessment of microplastics in the Changjiang Estuary and east China Sea[D]. Shanghai: Master's Thesis of East China Normal University, 2019 (in Chinese).
- [17] 任保平, 杜宇翔. 黄河流域经济增长-产业发展-生态环境的耦合协同关系[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(2): 119-129.
REN BP, DU YX. Coupling coordination of economic growth, industrial development and ecology in the Yellow River basin[J]. China Population, Resources and Environment, 2021, 31(2): 119-129 (in Chinese).
- [18] 徐辉, 师诺, 武玲玲, 张大伟. 黄河流域高质量发展水平测度及其时空演变[J]. 资源科学, 2020, 42(1): 115-126.
- XU H, SHI N, WU LL, ZHANG DW. High-quality development level and its spatiotemporal changes in the Yellow River basin[J]. Resources Science, 2020, 42(1): 115-126 (in Chinese).
- [19] 牛学锐. 黄河口表层水微塑料赋存特征研究[D]. 济南: 山东师范大学硕士学位论文, 2020.
NIU XR. Study on the occurrence characteristics of microplastics in the surface water of the Yellow River Estuary[D]. Jinan: Master's Thesis of Shandong Normal University, 2020 (in Chinese).
- [20] 岳俊杰, 赵爽, 程昊东, 段鑫越, 石洪华, 汪磊, 端正花. 不同植物覆盖下黄河三角洲湿地土壤中微塑料的分布[J]. 环境科学, 2021, 42(1): 204-210.
YUE JJ, ZHAO S, CHENG HD, DUAN XY, SHI HH, WANG L, DUAN ZH. Distribution of microplastics in the soil covered by different vegetation in Yellow River Delta wetland[J]. Environmental Science, 2021, 42(1): 204-210 (in Chinese).
- [21] 赵爽. 黄河三角洲湿地微塑料调查及健康风险评估[D]. 天津: 天津理工大学硕士学位论文, 2020.
ZHAO S. Microplastic survey and health risk assessment of wetlands in the Yellow River Delta[D]. Tianjin: Master's Thesis of Tianjin University of Technology, 2020 (in Chinese).
- [22] XIONG X, WU CX, ELSER JJ, MEI ZG, HAO YJ. Occurrence and fate of microplastic debris in middle and lower reaches of the Yangtze River-from inland to the sea[J]. The Science of the Total Environment, 2019, 659: 66-73.
- [23] NIU SP, WANG X, RAO Z, ZHAN N. Microplastics present in sediments of Yushan River: a case study for urban tributary of the Yangtze River[J]. Soil and Sediment Contamination: an International Journal, 2021, 30(3): 314-330.
- [24] DING L, MAO RF, GUO XT, YANG XM, ZHANG Q, YANG C. Microplastics in surface waters and sediments of the Wei River, in the northwest of China[J]. Science of the Total Environment, 2019, 667: 427-434.
- [25] YAN MT, NIE HY, XU KH, HE YH, HU YT, HUANG YM, WANG J. Microplastic abundance, distribution and composition in the Pearl River along Guangzhou city and Pearl River Estuary, China[J]. Chemosphere, 2019, 217: 879-886.
- [26] LIU Y, ZHANG JD, CAI CY, HE Y, CHEN LY, XIONG X, HUANG HJ, TAO S, LIU WX. Occurrence and characteristics of microplastics in the Haihe River: an investigation of a seagoing river flowing through a megacity in northern China[J]. Environmental

- Pollution, 2020, 262: 114261.
- [27] LECHNER A, KECKEIS H, LUMESBERGER-LOISL F, ZENS B, KRUSCH R, TRITTHART M, GLAS M, SCHLUDERMANN E. The Danube so colourful: a potpourri of plastic litter outnumbers fish larvae in Europe's second largest river[J]. *Environmental Pollution*, 2014, 188: 177-181.
- [28] MANI T, HAUKE A, WALTER U, BURKHARDT-HOLM P. Microplastics profile along the Rhine River[J]. *Scientific Reports*, 2016, 5: 17988.
- [29] MCCORMICK A, HOELLEIN TJ, MASON SA, SCHLUEP J, KELLY JJ. Microplastic is an abundant and distinct microbial habitat in an urban river[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(20): 11863-11871.
- [30] VERMAIRE JC, POMEROY C, HERCZEGH SM, HAGGART O, MURPHY M. Microplastic abundance and distribution in the open water and sediment of the Ottawa River, Canada, and its tributaries[J]. *FACETS*, 2017, 2(1): 301-314.
- [31] 丁豪杰, 苏奇倩, 李林, 李晓锋, 徐其静, Rensing Christopher, 刘雪. 土壤农用地膜微生物降解研究进展[J]. *中国环境科学*, 2021, 41(9): 4231-4244.
- DING HJ, SU QQ, LI L, LI XF, XU QJ, CHRISTOPHER R, LIU X. Progresses in microbial degradation of agricultural soil mulches[J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(9): 4231-4244 (in Chinese).
- [32] 骆永明, 施华宏, 涂晨, 周倩, 季荣, 潘响亮, 徐向荣, 吴辰熙, 安立会, 孙晓霞, 何德富, 李艳芳, 马旖旎, 李连祯. 环境中微塑料研究进展与展望[J]. *科学通报*, 2021, 66(13): 1547-1562.
- LUO YM, SHI HH, TU C, ZHOU Q, JI R, PAN XL, XU XR, WU CX, AN LH, SUN XX, HE DF, LI YF, MA YN, LI LZ. Research progresses and prospects of microplastics in the environment[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2021, 66(13): 1547-1562 (in Chinese).
- [33] 李爱峰, 李方晓, 邱江兵, 闫晨, 柳超, 孟范平, 李正炎, 李瑾, 郎印海, 胡泓. 水环境中微塑料的污染现状、生物毒性及控制对策[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2019, 49(10): 88-100.
- LI AF, LI FX, QIU JB, YAN C, LIU C, MENG FP, LI ZY, LI J, LANG YH, HU H. Pollution status, biological toxicity and control strategy of microplastics in water environments: a review[J]. *Periodical of Ocean University of China (Natural Science)*, 2019, 49(10): 88-100 (in Chinese).
- [34] 钮金芬, 姚秉华, 付焱. 生物降解塑料聚乳酸研究进展[J]. *工程塑料应用*, 2010, 38(4): 89-92.
- NIU JF, YAO BH, YAN Y. The research progress of biodegradable plastics polyactic acid[J]. *Engineering Plastics Application*, 2010, 38(4): 89-92 (in Chinese).
- [35] 刁晓倩, 翁云宣, 付焱, 周迎鑫. 生物降解塑料应用及性能评价方法综述[J]. *中国塑料*, 2021, 35(8): 152-161.
- DIAO XQ, WENG YX, FU Y, ZHOU YX. Review of applications and performance evaluation methods of biodegradable plastics[J]. *China Plastics*, 2021, 35(8): 152-161 (in Chinese).
- [36] RUJNIC-SOKELE M, PILIPOVIC A. Challenges and opportunities of biodegradable plastics: a mini review[J]. *Waste Management & Research: the Journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA*, 2017, 35(2): 132-140.
- [37] ROOHI, BANO K, KUDDUS M, ZAHEER MR, ZIA Q, KHAN MF, ASHRAF GM, GUPTA A, ALIEV G. Microbial enzymatic degradation of biodegradable plastics[J]. *Current Pharmaceutical Biotechnology*, 2017, 18(5): 429-440.
- [38] YOSHIDA S, HIRAGA K, TAKEHANA T, TANIGUCHI I, YAMAJI H, MAEDA Y, TOYOHARA K, MIYAMOTO K, KIMURA Y, ODA K. A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate)[J]. *Science*, 2016, 351(6278): 1196-1199.
- [39] CUI YL, CHEN YC, LIU XY, DONG SJ, TIAN YE, QIAO YX, MITRA R, HAN J, LI CL, HAN X, LIU WD, CHEN Q, WEI WQ, WANG X, DU WB, TANG SY, XIANG H, LIU HY, LIANG Y, HOUKN, WU B. Computational redesign of a PETase for plastic biodegradation under ambient condition by the GRAPE strategy[J]. *ACS Catalysis*, 2021, 11(3): 1340-1350.
- [40] 宋丹丹, 王秀莉, 尚玉俊, 庞海岩, 宋晓宇, 庄玉伟, 郭辉, 张倩, 张金玉. 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.
- SONG DD, WANG XL, SHANG YJ, PANG HY, SONG XY, ZHUANG YW, GUO H, ZHANG Q, ZHANG JY. Characteristics of microplastic pollution in sediments of Zhengzhou urban rivers[J]. *Periodical of Ocean University of China (Natural Science)*, 2022, 52(3): 99-105 (in Chinese).
- [41] 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: 西安工业大学硕士学位论文, 2020.
- GAO F. Occurrence of microplastics in rivers and sewage plants in inland cities[D]. Xi'an: Master's Thesis of Xi'an Technological University, 2020 (in Chinese).
- [42] LIN L, ZUO LZ, PENG JP, CAI LQ, FOK L, YAN Y, LI HX, XU XR. Occurrence and distribution of microplastics in an urban river: a case study in the

- Pearl River along Guangzhou city, China[J]. The Science of the Total Environment, 2018, 644: 375-381.
- [43] 赵昕, 陈浩, 贾其隆, 沈忱思, 朱弈, 李磊, 聂云汉, 叶建锋. 城市河道表层水及沉积物中微塑料的污染现状与污染行为[J]. 环境科学, 2020, 41(8): 3612-3620.
ZHAO X, CHEN H, JIA QL, SHEN CS, ZHU Y, LI L, NIE YH, YE JF. Pollution status and pollution behavior of microplastic in surface water and sediment of urban rivers[J]. Environmental Science, 2020, 41(8): 3612-3620 (in Chinese).
- [44] 赵艳民, 马迎群, 温泉, 时瑶, 迟明慧, 杨晨晨, 秦延文. 基于不确定性的天津市北塘排污河表层沉积物微塑料污染评价[J]. 环境工程技术学报, 2021, 11(3): 554-561.
ZHAO YM, MA YQ, WEN Q, SHI Y, CHI MH, YANG CC, QIN YW. Evaluation of microplastics pollution in surface sediments of Beitang Drainage River in Tianjin city based on uncertainty[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2021, 11(3): 554-561 (in Chinese).
- [45] 韩丽花, 李巧玲, 徐笠, 陆安祥, 巩文雯, 蔚青. 大辽河沉积物中微塑料的污染特征[J]. 中国环境科学, 2020, 40(4): 1649-1658.
HAN LH, LI QL, XU L, LU AX, GONG WW, YU Q. The pollution characteristics of microplastics in Daliao River sediments[J]. China Environmental Science, 2020, 40(4): 1649-1658 (in Chinese).
- [46] 陈玉玲. 微塑料在武汉城郊菜地土壤中的污染现状及其对赤子爱胜蚓的生态毒理研究[D]. 武汉: 中国科学院大学(中国科学院武汉植物园)硕士学位论文, 2020.
CHEN YL. A study on microplastics pollution in the vegetable farmlands of suburban Wuhan and the ecotoxicology response of microplastics on earthworms (*Eisenia fetida*)[D]. Wuhan: Master's Thesis of Wuhan Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, 2020 (in Chinese).
- [47] 刘全, 伊同歆, 李秋雨, 蒋培宇, 赵雨朦, 霍玉洁, 魏海峰, 何洁. 翅碱蓬对盐碱湿地重金属污染消减作用[J]. 环境化学, 2022, 41(3): 1097-1100.
LIU Q, YI TX, LI QY, JIANG PY, ZHAO YM, HUO YJ, WEI HF, HE J. Abatement of heavy metal pollution in saline-alkali wetland by *Suaeda heteroptera*[J]. Environmental Chemistry, 2022, 41(3): 1097-1100 (in Chinese).
- [48] 朱晓桐. 微塑料在潮滩湿地的分布沉降及生物富集研究[D]. 上海: 华东师范大学硕士学位论文, 2018.
ZHU XT. Distribution, settlement and bioaccumulation of microplastic in the estuary[D]. Shanghai: Master's Thesis of East China Normal University, 2018 (in Chinese).
- [49] 张起源. 湛江红树林湿地沉积物微塑料和三种有机污染物污染状况研究[D]. 广州: 暨南大学硕士学位论文, 2020.
ZHANG QY. The research of pollution status and ecological risk about microplastics and three POPs in Zhanjiang mangroves, China[D]. Guangzhou: Master's Thesis of Jinan University, 2020 (in Chinese).
- [50] 刘亚菲. 滇池湖滨农田土壤中微塑料数量及分布研究[D]. 昆明: 云南大学硕士学位论文, 2018.
LIU YF. Quantity and distribution of microplastics in farmland soil of lake shore in Dianchi lake[D]. Kunming: Master's Thesis of Yunnan University, 2018 (in Chinese).
- [51] 王林林. PVC 微塑料对黄河鲤幼鱼的毒理效应研究[D]. 新乡: 河南师范大学硕士学位论文, 2019.
WANG LL. Study on toxicological effects of PVC microplastics on juvenile Yellow River carp[D]. Xinxiang: Master's Thesis of Henan Normal University, 2019 (in Chinese).
- [52] LIMONTA G, MANCIA A, BENKHALQUI A, BERTOLUCCI C, ABELLI L, FOSSI MC, PANTI C. Microplastics induce transcriptional changes, immune response and behavioral alterations in adult zebrafish[J]. Scientific Reports, 2019, 9: 15775.
- [53] WAN ZQ, WANG CY, ZHOU JJ, SHEN ML, WANG XY, FU ZW, JIN YX. Effects of polystyrene microplastics on the composition of the microbiome and metabolism in larval zebrafish[J]. Chemosphere, 2019, 217: 646-658.
- [54] MAK CW, CHING-FONG YEUNG K, CHAN KM. Acute toxic effects of polyethylene microplastic on adult zebrafish[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, 182: 109442.
- [55] 白濛雨, 赵世焯, 彭谷雨, 高磊, 李道季. 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 MY, ZHAO SY, PENG GY, GAO L, LI DJ. Occurrence, characteristics of microplastic during urban sewage treatment process[J]. China Environmental Science, 2018, 38(5): 1734-1743 (in Chinese).
- [56] 郝晓地, 翟学棚, 吴远远, 刘然彬. 微塑料在污水处理过程中的演变与归宿[J]. 中国给水排水, 2019, 35(8): 20-26.
HAO XD, ZHAI XP, WU YY, LIU RB. Evolution and fate of microplastics in sewage treatment[J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(8): 20-26 (in Chinese).

(本文责编 陈宏宇)