

## 净水技术前沿与热点综述

周智勇<sup>1</sup>, 卢帅良<sup>1</sup>, 马涛<sup>2</sup>, 等. 水环境微塑料污染现状及处置技术研究进展[J]. 净水技术, 2024, 43(7): 10-21, 156.

ZHOU Z Y, LU S L, MA T, et al. Research progress of pollution status and disposal technology for microplastics in water environment[J]. Water Purification Technology, 2024, 43(7): 10-21, 156.

## 水环境微塑料污染现状及处置技术研究进展

周智勇<sup>1</sup>, 卢帅良<sup>1</sup>, 马涛<sup>2</sup>, 刘贵彩<sup>1</sup>, 孙绍芳<sup>1</sup>, 谢康<sup>1,\*</sup>

(1. 济南大学土木建筑学院, 山东济南 250022; 2. 山东省环境保护科学研究设计院有限公司, 山东济南 250022)

**摘要** 微塑料具有粒径小、比表面积大和疏水性强等特点, 在水体环境中分布广泛、难以被降解, 并且能够作为其他有毒污染物的载体, 进一步增强了微塑料的危害性。深入研究微塑料的危害及其分析、处理途径是有效控制微塑料污染的关键。针对水环境微塑料污染这一热点问题, 文章介绍了水环境中微塑料的污染现状和生物效应, 阐述了微塑料的分析鉴定方法, 分析了水体微塑料常规和新兴去除技术的优势及潜在问题。并进一步探讨了未来水环境中微塑料研究的前景, 为水环境中微塑料的去除与污染控制研究提供参考与指导。

**关键词** 微塑料 污染现状 生物效应 分析方法 常规技术 新兴技术

**中图分类号**: X52 **文献标识码**: A **文章编号**: 1009-0177(2024)07-0010-13

**DOI**: 10.15890/j.cnki.jsjs.2024.07.002

## Research Progress of Pollution Status and Disposal Technology for Microplastics in Water Environment

ZHOU Zhiyong<sup>1</sup>, LU Shuailiang<sup>1</sup>, MA Tao<sup>2</sup>, LIU Guicai<sup>1</sup>, SUN Shaofang<sup>1</sup>, XIE Kang<sup>1,\*</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, University of Jinan, Jinan 250022, China;

2. Shandong Academy of Environmental Science Co., Ltd., Jinan 250022, China)

**Abstract** Microplastics, characterized by their small particle size, large surface area, and strong hydrophobic properties, are widely distributed in aquatic environments and are challenging to degrade. Additionally, they can act as carriers for other toxic pollutants, further enhancing the hazardous nature of microplastics. It is essential to conduct a thorough investigation into the hazards of microplastics and the methods for analyzing and disposing of them in order to effectively control microplastic pollution. Focusing on the hot issue of microplastic pollution in water environment, this paper introduces the current pollution status and biological effects of microplastics in the aquatic environment, elaborates the analysis and identification methods of microplastics, and analyzes the advantages and potential problems of conventional and emerging removal technologies for microplastics in water bodies. The prospects of future microplastic research in water environments are further discussed in order to provide reference and guidance for the removal and pollution control of microplastics in water environments.

**Keywords** microplastics pollution status biological effect analysis method conventional technology emerging technology

塑料已经成为人类的必需品和易耗品。然而, 大量的塑料废弃物难以被有效回收, 并在自然环境

[收稿日期] 2023-10-09

[基金项目] 山东省重点研发计划项目(2021SFGC0204); 山东省自然科学基金面上项目(ZR2020ME227); 国家自然科学基金项目(51808257); 国家自然科学基金项目(52100088)

[作者简介] 周智勇(1998—), 男, 硕士, 研究方向为水处理理论与技术, E-mail: 1741182435@qq.com。

[通信作者] 谢康, 男, 副教授, E-mail: cea\_xiek@ujn.edu.cn。

中持续累积。到 2050 年,全球预计将产生高达 12 亿 t 的塑料垃圾进入自然环境<sup>[1]</sup>。这些积聚在自然生态环境中的塑料垃圾受到光照、氧化、风化等自然力量的影响,会逐渐分解成细小的塑料污染物<sup>[2]</sup>。2004 年,Thompson 等<sup>[3]</sup>首次提出了微塑料的概念,并将这种直径小于 5 mm 的细小塑料污染物定义为微塑料<sup>[4]</sup>。微塑料的来源主要分为初生微塑料和次生微塑料,初生微塑料指的是在工业生产过程中最初就被制备成微米级的小粒径塑料颗粒;次生微塑料则是由大型塑料在物理、化学及生物降解作用下逐渐碎裂形成<sup>[2]</sup>。研究人员通过对微塑料的分析鉴定,在内陆水域、河口、沿海乃至在少有人类活动的极地均有发现不同程度的微塑料污染<sup>[5-6]</sup>,证实了微塑料颗粒已成功侵入水生环境。微塑料具有粒径小、比表面积较大的性质,易被水生生物摄入而增加生态风险,且易与水环境中其他化学物质相互作用,通过吸附、释放和运输等方式引发生态系统中更为复杂的环境效应。微塑料污染情况严峻,如何有效去除水体中的微塑料已成为当前新的环境热点问题。目前,微塑料的去除主要依赖于水厂和污水厂中的常规技术<sup>[7]</sup>。然而,随着科学技术的进步,新兴微塑料去除技术也在不断涌现。面对微塑料这一全球性污染问题,文章系统地介绍了水环境中微塑料的污染现状、生物效应,总结了微塑料的分析鉴

定方法,归纳阐述了水体微塑料的常规和新兴去除技术,并对各去除技术的优势及潜在问题进行了分析,着眼于当前微塑料研究现状,对该领域未来的研究方向进行了展望。

1 微塑料污染现状

塑料制品因其轻质耐用的性能被广泛应用于化妆品和个人护理产品、纺织品和服装、包装材料、农业、建筑和建材等领域。据估计,在过去的 20 多年中,塑料产量增长了 50 倍<sup>[8]</sup>。其中,大多数消费塑料都是一次性使用的,并且可回收性有限。截至 2015 年,已产生约 6 300 t 塑料废物,其中仅约 9% 得到了回收利用<sup>[9]</sup>。与此同时,这些难以回收的塑料很大一部分在人类的陆地生产和生活过程中被排放至水环境中,并受水力作用的影响,不断迁移扩散至世界各地<sup>[10]</sup>。迄今为止,科研人员已在世界部分地区的水环境中检测出微塑料的存在,并分析了微塑料的类型、形态以及浓度,相关数据如表 1 所示。此外,微塑料在水环境中的分布很大程度上受人类活动的影响,在经济发达、人口密度高的地区微塑料的污染程度往往更加严重,但是目前针对水环境中微塑料的分析方法尚未建立统一化标准,研究数据之间可比性较差,现有的关于水环境微塑料浓度的调查结果仅可作为认识世界部分地区水环境中微塑料污染情况的参考。

表 1 我国及其他部分地区水环境微塑料的分布特征  
Tab. 1 Distribution Characteristics of Microplastics in Water Environment at Home and Rest Regions Abroad

| 地点              | 分离方法               | 主要类型    | 形态    | 浓度                                                 | 参考文献 |
|-----------------|--------------------|---------|-------|----------------------------------------------------|------|
| 中国东海            | neuston 拖网(333 μm) | /       | 纤维、颗粒 | (0.167±0.138)个/m <sup>3</sup>                      | [11] |
| 中国南海            | neuston 拖网(160 μm) | PET     | 纤维    | (0.469±0.219)个/m <sup>3</sup>                      | [12] |
| 中国渤海            | manta 拖网(300 μm)   | PP、PE   | 碎片、纤维 | (0.33±0.340)个/m <sup>3</sup>                       | [13] |
| 中国黄海            | bongo 拖网(500 μm)   | PP、PE   | 碎片、薄膜 | (0.13±0.2)个/m <sup>3</sup>                         | [14] |
| 中国钱塘江           | manta 拖网(200 μm)   | PET、PVC | 碎片、纤维 | 3.93 个/L                                           | [15] |
| 中国太湖            | 浮游生物拖网(333 μm)     | CP、PE   | 纤维    | 3 400~25 800 个/m <sup>3</sup>                      | [16] |
| 中国鄱阳湖           | 不锈钢筛(50 μm)        | PP、PE   | 纤维、薄膜 | 5.0~34 个/L                                         | [7]  |
| 中国长江口           | 钢筛(32 μm)          | /       | 纤维、颗粒 | (4 137±2 462)个/m <sup>3</sup>                      | [11] |
| 北大西洋东部          | 不锈钢筛(250 μm)       | /       | 纤维    | (2.46±2.43)个/m <sup>3</sup>                        | [17] |
| 南极洲 Ross 海      | 玻璃纤维过滤器(1 μm)      | PVA、PP  | 碎片、纤维 | (0.17±0.34)个/m <sup>3</sup>                        | [18] |
| 意大利 Subalpine 湖 | manta 拖网(300 μm)   | PE、PS   | 碎片    | (4 000±2 700)~<br>(57 000±36 000)个/km <sup>2</sup> | [19] |
| 美国 Snake 河      | 浮游生物拖网(100 μm)     | PP、PE   | 纤维    | (2.57±2.95)个/m <sup>3</sup>                        | [20] |
| 韩国 Nakdong 河    | 网状网(20 μm)         | PP、PE   | 碎片、纤维 | (293±83)~(4 760±5 242)个/m <sup>3</sup>             | [21] |

注:PET 为聚对苯二甲酸乙二醇酯;PP 为聚丙烯;PE 为聚乙烯;PVC 为聚氯乙烯;CP 为玻璃纸;PVA 为聚乙烯醇;PS 为聚苯乙烯。

目前,水厂和污水厂被认为是水体环境中微塑料的主要接受源,且两者对微塑料的去除效率能达到较高水平,但水厂和污水厂同时也是微塑料进入水生和陆地系统的重要释放渠道<sup>[22-23]</sup>。微塑料可通过多种途径进入水厂和污水厂,包括家庭和工业废水排放、大气输入、地表径流等方式。尽管经过水

厂和污水厂内一系列的处理设施,微塑料仍然不能被完全去除。甚至在通过不同的处理单元时,不同大小的剪切力会使微塑料破碎,进而导致水环境中纳米塑料的数量升高<sup>[24]</sup>。表 2 汇总了部分地区水厂和污水厂中微塑料去除及排放情况。

表 2 部分地区水厂和污水厂中微塑料去除及排放现状

Tab. 2 Status of Microplastic Removal and Discharge in WTPs and WWTPs in Selected Areas

| 地点          | 水厂类型   | 微塑料主要类型       | 微塑料出流浓度                    | 去除率         | 参考文献 |
|-------------|--------|---------------|----------------------------|-------------|------|
| 中国长三角       | 水厂     | PET、PE、PP、PAM | (930±72)个/L                | 82.1%~88.6% | [25] |
| 捷克          | 水厂(3座) | PP、PE、PET     | (443±10)个/L                | 70%         | [26] |
|             |        |               | (338±76)个/L                | 81%         |      |
|             |        |               | (628±28)个/L                | 83%         |      |
| 印度 Gandhi   | 水厂     | PE、PP、PET、PS  | (2.75±0.92)个/L             | 85.39%      | [27] |
| 中国西安        | 污水厂    | PP、PE、PS      | 22.9个/L                    | 92.1%       | [28] |
| 中国南京        | 污水厂    | PET、PP、PE     | 2.87×10 <sup>8</sup> 个/d   | 96%         | [29] |
| 土耳其 Denizli | 污水厂    | PE、PVAc       | 1.28×10 <sup>10</sup> 个/d  | 95%         | [30] |
| 韩国龟尾        | 污水厂    | PP、PE、PES、PET | (0.26±0.29)~(0.48±0.11)个/L | 99.8%       | [31] |

注:PAM为聚丙烯酰胺;PVAc为聚醋酸乙烯酯;PES为聚醚砜树脂。

研究<sup>[32-33]</sup>显示,尽管水厂和污水厂能高效去除微塑料,但每天仍有数百万微塑料被释放到水环境中,对水环境生态系统和食物链构成严重威胁。因此,为减少微塑料的排放及其对环境和生物的负面影响,对于微塑料污染问题需要予以重视,并采取相应的措施。

## 2 微塑料的生物效应

微塑料的生物效应表现为两个方面:微塑料的生物累积性以及微塑料自身有毒有害添加剂缓释导致的生态毒性;微塑料具有作为载体的作用,能够吸附各类污染物并表现出复合毒性<sup>[34]</sup>。

微塑料尺寸小的特性使它们更容易被水生生物摄取并积累。低营养级水生生物摄入微塑料后,由于体内没有相应的酶将其降解,微塑料会通过食物链传递至其他营养层。研究<sup>[35-37]</sup>显示,在浮游动物、双壳类、甲壳类动物、鱼类和海洋哺乳动物体内甚至在人体胎盘中均有发现微塑料的累积。同时,在对微塑料生物累积影响的调查中发现,生物体内累积的微塑料对水生生物的存活率、生长、首次繁殖年龄、繁殖时间和后代总数造成不同程度的影响<sup>[38]</sup>。Chen等<sup>[39]</sup>研究显示,暴露于微塑料环境中的成年斑马鱼肌层厚度明显减少,且因氧化应激效

应表现为多动症。与此同时,塑料污染还给水环境带来了新的威胁——微塑料和内分泌干扰物(EDCs)的产生。双酚A、壬基酚和辛基酚等EDCs作为塑料抗氧化剂和塑料包装稳定剂或其反应试剂,被广泛掺入塑料和工业生产的初级微塑料和研磨珠中<sup>[40-41]</sup>。在水环境中,塑料物质的破碎或粉碎通常伴随着EDCs的释放,这些难以降解的EDCs将存留于水环境并对水生生物造成生态风险<sup>[42]</sup>。EDCs具有改变内分泌系统平衡的激素活性,其通过模仿天然激素,以及拮抗天然激素的作用,改变天然激素的合成和代谢模式,或改变特定受体的表达方式,进而对内分泌系统的生长以及响应荷尔蒙信号的器官的正常运作造成负面影响<sup>[43]</sup>。

除了自身的毒性效应外,微塑料还易与水体中的重金属、持久性有机污染物等污染物结合,形成复合毒性<sup>[44]</sup>。Santos等<sup>[45]</sup>研究表明,微塑料与重金属Cu结合形成的复合污染物能够影响水生生物的氧化应激性,或与体内活性物质超氧化物歧化酶、乙酰胆碱酯酶和过氧化氢酶等产生协同毒性作用。当天然有机质和微塑料联合作用时能促进Cu在斑马鱼体内的累积,并加重肝脏和肠胃的铜毒性<sup>[46]</sup>。事实上,微塑料与污染物的相互作用和综合效应受多种

因素影响,包括微塑料的类型、吸附污染物的种类和数量以及不同的暴露时间,在生物群中进行的联合暴露研究可能会得出不同的结果,有时甚至相互矛盾。在成年斑马鱼神经毒性研究报告中,双酚 A 和微塑料共同暴露抑制斑马鱼大脑内的乙酰胆碱酯酶的活性,研究结果与双酚 A 和微塑料单独暴露均会增强乙酰胆碱酯酶的活性的结论相反<sup>[40]</sup>。由此可见,微塑料与污染物联合毒性对生物活性产生的影响并非单纯的增强或削弱。

目前,已经展开了大量关于微塑料与其他污染物联合毒性相互作用的研究,但它们的机制和综合效应尚未完全明确。同时,对于微塑料暴露影响人类健康的了解仍然有限,因此需要进行更多的调查研究来深入探讨微塑料对人类健康可能构成的威胁。

### 3 微塑料的分析方法

#### 3.1 水体样品采集及预处理

在自然水环境中,微塑料的水体样品采集通常包括水表面、不同深度的水层以及沉积物的取样。目前,广泛采用的采集方法主要有样品浓缩法和大样品法<sup>[47]</sup>。选择合适的采样方法需要根据具体的研究目的和采样现场的条件来确定。样品采集后,需要进行预处理将微塑料与其他杂质进行分离,便于后续微塑料的分离和鉴定,以提高结果的准确性。对于混合在污水和污泥这类富含有机物中的微塑料,通常需进行化学消解或酶消解处理,并结合高密度溶液浮选法以有效回收微塑料<sup>[48]</sup>。在微塑料样品的进一步处理过程中,可以利用过滤法,选择合适的筛网或膜过滤器,分级存留目标微塑料颗粒,从而获取水体中微塑料粒径分布特征<sup>[49]</sup>。

#### 3.2 微塑料检测方法

分析技术在检测环境中的微塑料领域起着至关重要的作用<sup>[50]</sup>。微塑料分析技术包括显微镜、傅里叶变换红外光谱(FTIR)、拉曼光谱和热分析等。这些技术的进步使有效分析微塑料成为可能,拓宽了微塑料检测的范围。

##### 3.2.1 定量分析

在微塑料的研究中通常采用 4 种不同的定量方法:计数、称量、吸光度和浑浊度。视觉识别计数是检测微塑料的通用标准方法<sup>[51]</sup>,通常使用显微镜进行统计,包括双目显微镜、扫描电子显微镜、体式显

微镜和荧光显微镜。人工计数法操作简单、成本低,但该方法易受肉眼识别、背景干扰等因素影响,将微塑料与其他有机和无机聚合物区分开来具有较高挑战性<sup>[49]</sup>。另一种方法是称量法,与显微镜计数方法类似,不同之处在于它使用重量天平对干燥后的微塑料液进行称量,而不是进行计数<sup>[52]</sup>。微塑料浓度也可以通过吸光度法来测定,通常使用紫外-可见光谱仪。该方法通过测量空白样品和塑料溶液的吸光度来评估微塑料的浓度。然而,需要注意的是,这种方法可能不适用于低密度微塑料,因为这些塑料颗粒往往会漂浮在溶液表面,从而影响最后的读数<sup>[53]</sup>。最后,浑浊度被认为是混凝过程中反映微塑料(粒径 $>15\ \mu\text{m}$ )去除程度的有效指标,利用浑浊度可以实现对微塑料浓度的快速监测<sup>[54]</sup>。

##### 3.2.2 定性分析

目前广泛采用光谱、质谱等表征手段对微塑料进行定性分析。FTIR 产生独特的光谱,将塑料与其他有机和无机颗粒区分开来,并提供有关化学键和聚合物成分的具体信息,从而确定其分子结构,但该方法仅适用于具有红外活性和粒径大于  $20\ \mu\text{m}$  的微塑料<sup>[18,55]</sup>。拉曼光谱可以克服这一缺点,其适用于粒径低至  $1\ \mu\text{m}$  的颗粒。拉曼光谱是一种通过散射光确定塑料存在和类型的方法。其具有高度的选择性和可重复性,需要的样品量少,样品制备和数据采集时间短。并且与其他分析方法相比,它对非极性塑性官能团的反应更好,但污染物和色素的存在会严重影响检测结果<sup>[55-56]</sup>。被视为光谱分析替代方案的热分析技术是通过分析样品热稳定性或热降解来确定聚合物成分信息的<sup>[57]</sup>。目前,国内外用于检测微塑料的热分析方法包括差示扫描量热法、热重量分析结合差示扫描量热法以及热分解气相色谱质谱等,大多是不同仪器装置的联合使用。

除上述常见的检测方法外,传感器作为一种新兴技术由于其便携性、特异性、高灵敏度和易于检测的特性在微塑料检测领域表现出巨大潜力和前景<sup>[58]</sup>。Asamoah 等<sup>[59]</sup>设计了一种便携式原型光学传感器,该检测基于同时记录镜面光反射信号和水体中光-微塑料相互作用的前向干涉图,可以在一定体积的淡水中筛选透明 PET 和半透明低密度 PE 的类型、尺寸和非平面性。此外,Behera 等<sup>[60]</sup>使用金纳米颗粒连接合成肽开发出一种生物传感器,用于检测不同范围样本的 PET。传感器可以高速和特

异性地将微塑料检测到最低水平,但仍需要进行大量研究,以便于更好地控制微塑料污染。

## 4 微塑料的去除技术

微塑料作为一种新污染物在各类水环境中广泛存在,对人类健康和生态环境构成严重的威胁。因此,迫切需要简单、高效的去除技术应对水环境中微塑料污染问题。目前,常规净水技术能一定程度地实现微塑料的去除,但仍有很大的改进空间。因此,开发新兴技术对于微塑料去除具有重要的意义和价值。以下重点归纳阐述了现阶段水体中的微塑料去除的常规和新兴技术,并分析了各去除技术的优势及潜在问题。

### 4.1 常规技术

#### 4.1.1 过滤

过滤和分离是被广泛应用于去除水环境中微塑料的简单高效方法之一。其通过过滤器物理截留塑料颗粒,同时允许清洁的水体通过,实现微塑料的去除。过滤去除微塑料的效果受到微塑料特性(形状、尺寸)、过滤器特性(孔径、网格尺寸)和过滤表面面积的影响。根据过滤器的类型,可以分为颗粒过滤和膜过滤。颗粒过滤借助石英砂、玻璃珠和活性炭等介质通过运输和附着截留固体颗粒。在对芬兰的某污水处理厂的调查显示,快速砂滤器从二级处理阶段的废水中去除微塑料的效率高达 97%<sup>[61]</sup>。膜过滤是利用膜的选择透过性实现混合物不同组分分离、纯化和浓缩的一门新兴技术。影响膜分离技术对微塑料去除效率的主要因素包括膜的特性以及塑料的粒径和形状等<sup>[62]</sup>。迄今为止,有部分研究报告膜工艺在去除微塑料方面的应用。Li 等<sup>[63]</sup>利用重力驱动动态膜技术处理含微塑料废水,过滤 1 min 后,浑浊度从 195 NTU 降至 20 NTU 以下,验证了动态膜对微塑料的有效去除。在澳大利亚悉尼的某污水厂中,经超滤和反渗透工艺处理后的微塑料浓度分别降至 0.28 个/L 和 0.21 个/L<sup>[64]</sup>。这些研究证实了膜分离技术去除水环境中微塑料的有效性。然而,目前很少有人关注膜过滤系统本身是否会释放出纳米塑料和/或微塑料,且由于目前检测方法的局限性,很难判断微塑料是否在处理过程中转化为纳米塑料<sup>[65]</sup>。

#### 4.1.2 吸附

吸附法是去除水中微塑料的主要方法之一。吸

附剂具备大比表面积、稳定的理化性质和多孔结构,能够强力吸附微塑料,并使其聚集在多孔固体或吸附剂表面。生物炭是常见的吸附剂之一,能够捕获微塑料。当水体缓慢流过孔隙直径小于 30  $\mu\text{m}$  的吸附材料时,塑料颗粒可能进入细小的孔隙中从而失去流动性,这种现象常出现于“蜂窝”和“丝瓜”结构的生物炭中。Wang 等<sup>[66]</sup>发现,生物炭对直径为 10  $\mu\text{m}$  的微塑料球的去除和固定能力显著,即使在使用蒸馏水冲洗样品时,生物炭只释放不到 0.5% 的微塑料颗粒,大部分仍然被保留。除活性炭、生物炭和沸石等常见吸附剂外,具有三维多孔结构的海绵材料也表现出优异的微塑料去除性能。一项研究<sup>[67]</sup>利用可再生植物蛋白的化学交联制备了一种新型强海绵,其表面氨基酸残基上的活性侧链具有良好吸附微塑料的能力,同时该海绵由于其多孔结构和疏水性,在 10 s 内能够快速吸附 38% 的微塑料,而且经过 20 次重复使用后仍能保持快速吸附能力,表现出优异的快速吸附和可重复使用性。

吸附剂早在几十年前就被应用于水处理行业,且国内外科研人员对吸附材料的研制及应用也做了大量工作,但仍需探索开发更多经济有效的新型吸附剂,兼顾材料的绿色环保效能,同时更加注重微塑料的回收利用。

#### 4.1.3 混凝

混凝是一种常用的水处理方法,通过投加混凝剂,使水中的胶体悬浮物脱稳并集成容易沉降的絮凝体,用于处理废水中的细小悬浮物和胶体微粒,其中包括微塑料。在水环境中,带负电的微塑料颗粒由于静电排斥作用保持稳定分散状态。投加混凝剂后,中和微塑料的表面电荷,当静电斥力降低到最小时,微塑料颗粒聚集形成大尺寸的絮体并沉降到底部,从而实现微塑料的去除<sup>[68]</sup>。除了电荷中和之外,混凝剂活性位点能与未完全脱稳的微塑料发生其他相互作用(例如,氢键、配位键和疏水键),从而实现微塑料的去除。

混凝法能有效去除水体中微塑料,但为兼顾成本和效率,仍应不断优化反应条件。Zhou 等<sup>[68]</sup>利用聚合氯化铝混凝去除 PS 和 PE,聚合氯化铝用量为 77 mg/L 时,PS 和 PE 的去除效率分别达到 83.29% 和 70.90%,当聚合氯化铝用量继续增长时,微塑料去除率保持稳定,甚至略有降低。造成这种现象的原因可能是混凝剂用量过大时,絮凝体趋于

松散且容易破裂,导致混凝性能下降。除单独的混凝工艺外,电凝-混凝-过滤、混凝-浮选等组合混凝工艺对于微塑料的去除更具优势。因此,除了在现有工艺条件上进行优化外,还有必要开发更多的组合工艺来应对日益严重的微塑料污染。

4. 1. 4 光催化

在自然环境中,光氧化是引发微塑料降解的重要过程,但同时也被认为是一个缓慢低效的过程。

表 3 不同光催化剂对微塑料的降解  
Tab. 3 Degradation of Microplastics by Different Photocatalysts

| 光催化剂                     | 辐射源                | 微塑料类型 | 微塑料失重率 | 参考文献 |
|--------------------------|--------------------|-------|--------|------|
| TiO <sub>2</sub>         | UV-C (254 nm)      | PA66  | 97%    | [73] |
| 纳米 TiO <sub>2</sub>      | UV-C (254 nm)      | PS    | 98.40% | [74] |
| 蛋白源 N-TiO <sub>2</sub>   | 可见光 (400~800 nm)   | HDPE  | 6.40%  | [75] |
| 蛋白源 C,N-TiO <sub>2</sub> | LED 灯 (400~800 nm) | HDPE  | 71.77% | [76] |
| ZnO 纳米棒                  | 可见光 (400~800 nm)   | PP    | 65%    | [77] |
| Fe-ZnO                   | 阳光                 | LDPE  | 41.3%  | [78] |

注:PA66 为聚己二酰己二胺;HDPE 为高密度聚乙烯;LDPE 为低密度聚乙烯。

光催化技术为降低微塑料污染提供更环保的选择,且微塑料光催化降解后在水体中检测到的副产物对人类和水生环境表现为低毒性。但在实际催化过程中,很难实现微塑料的完全光催化降解,大量产生的降解中间体具有潜在毒性,而且目前对于降解中间体的毒性评估也不够健全<sup>[77,79]</sup>。

4. 1. 5 生物降解

微生物适应性强,并具有降解不同污染物的能力,包括在自然环境中能保持稳定性质的微塑料<sup>[80]</sup>。微生物在微塑料生物降解过程中,会在微塑料表面形成生物膜,微生物分泌的胞外聚合物(EPS)能够增强生物膜的稳固性,增加微塑料劣化的可能性。微塑料表面微生物群落产生的胞内酶及胞外酶作用于聚合物侧成链或化学基团,促进微塑料碳链裂解,将微塑料分解为低聚合物、二聚体和单体。分解后的产物作为碳源被微生物吸收利用,最终通过矿化作用转化为 CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O、CH<sub>4</sub> 等产物<sup>[81-84]</sup>。这种利用环境中细菌和真菌等微生物实现微塑料降解的方式,为解决微塑料污染问题提供了一种低成本和绿色环保的途径。

全世界科研人员已经对细菌降解微塑料进行了大量研究,研究者通常从栖息地中分离得到的细菌降解微塑料。通常而言,生活在微塑料污染环境中

基于光氧化降解机理发展而来的光催化技术,突破了光氧化降解效率低下的问题,为微塑料降解提供了有效策略,同时因其兼具低成本和低环境危害的特性而广受关注<sup>[69-71]</sup>。TiO<sub>2</sub>、ZnO 是目前最常见的单组分光催化剂,为进一步拓宽光催化剂的光谱响应范围,抑制电子-空穴对的复合,衍生出各类改性复合催化剂<sup>[72]</sup>。表 3 总结了不同光催化剂对微塑料的降解结果。

的微生物通常会发展出降解微塑料的酶系统。近年来,越来越多可降解微塑料的细菌被分离鉴定出来。Auta 等<sup>[85]</sup>利用从红树林沉积物中分离出的两种细菌对不同类型微塑料进行降解,在 40 d 后,观察到部分微塑料表面变得粗糙,且出现许多孔隙、裂缝和凹槽,并分别显示出 1.6%~7.4%和 3.0%~6.2%的降解率。在微塑料降解研究中,利用细菌联合体共同降解微塑料也逐渐成为学者们关注的焦点。细菌联合体能够在微塑料的表面上形成致密的生物膜,并诱导表面形貌和流变特性的改变。Park 等<sup>[86]</sup>利用从城市垃圾填埋场沉积物中获得的嗜温混合细菌对微塑料进行降解,结果显示微塑料质量和平均粒径都有不同程度减少。相比于纯细菌培养物,细菌联合体可以消除有毒代谢物,在污染物处理过程中更具活性和耐受性,且微塑料降解水平高于纯细菌培养物的平均水平<sup>[87-88]</sup>。除了细菌外,真菌也被发现可用于微塑料的降解。真菌种类繁多、分布广泛、繁殖能力强,且具有显著的适应能力,能够在不断变化的环境条件及其他微生物难以生存的栖息地中生长,促进物质的转化和循环<sup>[89-90]</sup>。然而,到目前为止,很少报道真菌介导的微塑料分解,这意味着通过异位筛选获得具有优异微塑料降解性能的真菌菌株存在困难<sup>[91]</sup>。

生物降解作为一种绿色可持续的技术被广大科学研究者所关注,但微塑料需要在较长时间的生物降解作用下才能达到较为理想的降解效果,而且从自然环境中分离的降解菌种,难以实际应用于污水处理厂等条件中。但尽管如此,生物降解的研究工作仍然为开发旨在提高塑料废弃物的处理能力及减少微塑料污染对环境影响的创新方法铺平了道路。

#### 4.1.6 膜生物反应器(MBR)

MBR是通过将活性污泥法与膜过滤分离相结合的一种技术。MBR系统通常采用孔径为 $0.1\ \mu\text{m}$ 的超滤膜,具备良好的截留性能,可以有效去除大部分微塑料。目前研究表明,MBR在去除微塑料方面表现出明显优势。Li等<sup>[92]</sup>研究发现,经MBR(孔径为 $0.1\ \mu\text{m}$ )处理后的出水中未检测到微塑料。与传统活性污泥法相比,MBR技术在去除废水中微塑料方面的效率更高,相较而言,MBR出水微塑料浓度低于传统活性污泥法工艺的最终出水微塑料浓度<sup>[93]</sup>。这些被截留于膜外的微塑料可在生物降解的作用下进一步被处理。尽管MBR系统对微塑料的去除非常有效且相对稳定,但微塑料可能会导致MBR系统出现处理效能降低及膜污染加快等问题。已有研究<sup>[23,94-95]</sup>显示,微塑料的积累会在不同程度上影响污泥性质和微生物群落,从而降低MBR系统污染物处理效能,并通过物理堵塞膜孔和刺激活性污泥分泌更多EPS的方式加剧膜污染。同时,微塑料还被认为是水生微生物的载体,微生物定殖于微塑料表面并形成生物膜<sup>[96]</sup>,这些生物膜随着微塑料在抽吸力的作用下集中截留于膜表面,一定程度上也致使膜污染情况更加严重。此外,不同尺寸微塑料对于MBR系统的影响也有所不同,其中纳米塑料表现出更强的毒性,且可能导致不可逆的膜污染<sup>[92]</sup>。因此,为保障膜系统的长期运行,应开发更多经济有效的膜污染控制策略。

### 4.2 新兴技术

#### 4.2.1 磁分离技术

在水处理中,磁分离是一种重要的方法。近年来,研究者创新性地利用磁分离法针对微塑料进行去除回收,通过在微塑料溶液中添加磁性颗粒与微塑料结合,并利用外加磁场对磁性颗粒与微塑料的复合体进行有效分离回收。据报道,Shi等<sup>[97]</sup>利用磁性纳米 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 颗粒能有效去除河流水、生活污水、天然海水等环境水体中80%以上的微塑料。Grbic

等<sup>[98]</sup>开发了一种能与微塑料结合的疏水性铁纳米颗粒,并成功对不同环境介质(海水、淡水、沉积物)中的微塑料进行了有效磁性回收。类似地,Schwaminger等<sup>[99]</sup>使用油酸酯包覆的铁纳米颗粒,通过磁诱导其与微塑料聚集形成团簇,调控磁场进一步实现团簇迁移与回收。在这种方法中,磁性材料的尺寸可根据微塑料的粒径进行调整,突破了因微塑料粒径不同而难以回收的限制。同时,磁化以及高磁场分离技术的引入,很大程度上降低了纳米材料可能带来的潜在环境健康风险。为防止出现二次污染,需要关注磁性材料本身是否会浸出铁离子而造成污染。

#### 4.2.2 等离子技术

放电等离子体通过高压放电产生反应性物质,包括高能电子、自由基和氧化分子,它被认为是超越固体、液体和气体的第4种物质状态。放电等离子体在原位产生反应性物质,避免了化学试剂的储存和运输。这些反应性物质可以迅速破坏有机物的化学键,将其降解为更小的分子,最终形成 $\text{CO}_2$ 和 $\text{H}_2\text{O}$ <sup>[100-101]</sup>。利用放电等离子体去除微塑料克服了二次泄漏的问题,同时无需进行复杂的后续处理<sup>[102]</sup>。虽然等离子体热解/气化技术已被广泛应用于塑料的化学回收,但由于反应热力学和动力学的限制,通常需要高温甚至高压条件下进行。然而,近年来,研究人员<sup>[103]</sup>已经利用非热等离子体技术实现了温和条件下的废塑料升级回收。例如,Ren等<sup>[102]</sup>发现在最佳条件下,介质阻挡放电等离子体可以实现PVC高达85.9%的去除率,展现出卓越微塑料去除性能。等离子技术可以在温和的条件下实现更多种类塑料的升级再造,并且具有工艺简单、高效、成本低的特点。然而,目前等离子技术还处于发展阶段,仍需在反应机理方面进行更深入的研究。

#### 4.2.3 生物聚集

生物降解策略能够解决微塑料污染带来的全球性挑战,但降解微塑料的生物过程需要很长时间。近年来,已有研究人员在开发可持续的生物聚集工艺以快速捕获和去除微塑料这一方面做出尝试。微生物分泌的EPS具有特殊的黏性凝胶状结构,同时可以在悬浮固体的黏附和凝聚过程中建立伦敦力、静电相互作用和氢键,有助于形成异质聚集体(微生物+生物膜+微塑料)<sup>[104-105]</sup>,优良的絮凝性和生物可降解性使EPS用作去除微塑料的天然絮凝剂

成为可能。已有研究<sup>[104,106-107]</sup>表明,微藻、铜绿假单胞菌等微生物分泌的 EPS 有助于微塑料的捕获、聚集和沉降,从而最终实现解决微塑料污染的目的。然而,受异质聚集体中 EPS 的黏性特性的影响,让回收循环利用微塑料这项工作变得更加困难。为了克服这一难题,Liu 等<sup>[108]</sup>设计了一种具有“捕获-释放机制”的细菌生物膜,其 EPS 可以首先引起微塑料的生物聚集以便于分离,然后通过添加 L-阿拉伯糖降低生物膜中环二鸟苷酸水平,从而诱导生物膜破碎,释放被捕获的微塑料,使得回收微塑料更加便利。尽管这项工作理论上提供了一种有效捕获和回收微塑料的方法,但其需要微生物分泌的 EPS 达到较高的黏性要求才能获得良好的微塑料去除性能。此外,由于转基因细菌的安全问题,这种方法难以在工业应用中直接使用,但这项研究为今后有效分离污水中异质聚集体的生物膜提供了有益基础。

## 5 结语

微塑料作为一种持续性污染物,对水生生态环境与人类健康构成了严重威胁。为缓解微塑料带来的环境压力,科研人员已在微塑料的生物效应、分析方法和去除技术上开展了不少的调查研究,但这项工作仍处于起步阶段,在研究中还存在很多空白。为了更好地应对微塑料污染的全球挑战,未来对水中微塑料的环境命运和风险研究还应着重考虑以下几方面。

(1) 制定标准化的微塑料检测与风险评价方法、体系,便于监管机构能够更准确地评估不同环境分区中微塑料的污染程度。

(2) 深入研究微塑料与其他污染物产生的复合毒性效应,更加真实地反映微塑料对环境产生的影响。

(3) 开发具有成本效益、高效率和能够大规模应用的微塑料修复技术,有效缓解水环境中微塑料污染压力。

## 参考文献

- [1] DING J F, JIANG F H, LI J X, et al. Microplastics in the coral reef systems from Xisha Islands of South China Sea [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(14): 8036-8046.
- [2] AUTA H S, EMENIKE C U, FAUZIAH S H. Distribution and importance of microplastics in the marine environment: A review of the sources, fate, effects, and potential solutions [J]. *Environment International*, 2017, 102: 165-176. DOI: 10.1016/j.envint.2017.02.013.
- [3] THOMPSON R C, OLSEN Y, MITCHELL R P, et al. Lost at sea: Where is all the plastic? [J]. *Science*, 2004, 304(5672): 838-838.
- [4] LAW K L, THOMPSON R C. Microplastics in the seas [J]. *Science*, 2014, 345(6193): 144-145.
- [5] EERKES-MEDRANO D, THOMPSON R C, ALDRIDGE D C. Microplastics in freshwater systems: A review of the emerging threats, identification of knowledge gaps and prioritisation of research needs [J]. *Water Research*, 2015, 75: 63-82. DOI: 10.1016/j.watres.2015.02.012.
- [6] SOBEK A, GUSTAFSSON O. Deep water masses and sediments are main compartments for polychlorinated biphenyls in the arctic ocean [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(12): 6719-6725.
- [7] YUAN W K, LIU X N, WANG W F, et al. Microplastic abundance, distribution and composition in water, sediments, and wild fish from Poyang Lake, China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 170: 180-187. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2018.11.126.
- [8] WALKER T R, FEQUET L. Current trends of unsustainable plastic production and micro (nano) plastic pollution [J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2023, 160: 116984. DOI: 10.1016/j.trac.2023.116984.
- [9] GEYER R, JAMBECK J R, LAW K L. Production, use, and fate of all plastics ever made [J]. *Science Advances*, 2017, 3(7): e1700782. DOI: 10.1126/sciadv.1700782.
- [10] BRADNEY L, WIJESEKARA H, PALANSOORIYA K N, et al. Particulate plastics as a vector for toxic trace-element uptake by aquatic and terrestrial organisms and human health risk [J]. *Environment International*, 2019, 131: 104937. DOI: 10.1016/j.envint.2019.104937.
- [11] ZHAO S Y, ZHU L X, 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.
- [12] WANG T, ZOU X Q, LI B J, et al. Preliminary study of the source apportionment and diversity of microplastics: Taking floating microplastics in the South China Sea as an example [J]. *Environmental Pollution*, 2019, 245: 965-974. DOI: 10.1016/j.envpol.2018.10.110.
- [13] ZHANG W W, ZHANG S F, WANG J Y, et al. Microplastic pollution in the surface waters of the Bohai Sea, China [J]. *Environmental Pollution*, 2017, 231: 541-548. DOI: 10.1016/j.envpol.2017.08.058.
- [14] SUN X X, LIANG J H, ZHU M L, et al. Microplastics in seawater and zooplankton from the Yellow Sea [J].

- Environmental Pollution, 2018, 242: 585–595. DOI: 10.1016/j.envpol.2018.07.014.
- [15] DAI L Y, WANG Z Y, GUO T J, et al. Pollution characteristics and source analysis of microplastics in the Qiantang River in southeastern China [J]. Chemosphere, 2022, 293: 133576. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.133576.
- [16] SU L, XUE Y G, LI L Y, et al. Microplastics in Taihu Lake, China [J]. Environmental Pollution, 2016, 216: 711–719. DOI: 10.1016/j.envpol.2016.06.036.
- [17] LUSHER A L, BURKE A, O'CONNOR I, et al. Microplastic pollution in the Northeast Atlantic Ocean: Validated and opportunistic sampling [J]. Marine Pollution Bulletin, 2014, 88 (1/2): 325–333. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2014.08.023.
- [18] CINCINELLI A, SCOPETANI C, CHELAZZI D, et al. Microplastic in the surface waters of the Ross Sea (Antarctica): Occurrence, distribution and characterization by FTIR [J]. Chemosphere, 2017, 175: 391–400. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2017.02.024.
- [19] SIGHICELLI M, PIETRELLI L, LECCE F, et al. Microplastic pollution in the surface waters of Italian Subalpine Lakes [J]. Environmental Pollution, 2018, 236: 645–651. DOI: 10.1016/j.envpol.2018.02.008.
- [20] KAPP K J, YEATMAN E. Microplastic hotspots in the Snake and Lower Columbia rivers: A journey from the Greater Yellowstone Ecosystem to the Pacific Ocean [J]. Environmental Pollution, 2018, 241: 1082–1090. DOI: 10.1016/j.envpol.2018.06.033.
- [21] EO S, HONG S H, SONG Y K, et al. Spatiotemporal distribution and annual load of microplastics in the Nakdong River, South Korea [J]. Water Research, 2019, 160: 228–237. DOI: 10.1016/j.watres.2019.05.053.
- [22] TALVITIE J, HEINONEN M, PAAKKONEN J P, et al. Do wastewater treatment plants act as a potential point source of microplastics? Preliminary study in the coastal Gulf of Finland, Baltic Sea [J]. Water Science and Technology, 2015, 72(9): 1495–1504.
- [23] WANG Q Y, LI Y L, LIU Y Y, et al. Effects of microplastics accumulation on performance of membrane bioreactor for wastewater treatment [J]. Chemosphere, 2022, 287: 131968. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.131968.
- [24] ENFRIN M, DUMEE L F, LEE J. Nano/microplastics in water and wastewater treatment processes – Origin, impact and potential solutions [J]. Water Research, 2019, 161: 621–638. DOI: 10.1016/j.watres.2019.06.049.
- [25] WANG Z, LIN T, CHEN W. Occurrence and removal of microplastics in an advanced drinking water treatment plant (ADWTP) [J]. Science of the Total Environment, 2020, 700: 134520. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.134520.
- [26] PIVOKONSKY M, CERMAKOVA L, NOVOTNA K, et al. Occurrence of microplastics in raw and treated drinking water [J]. Science of the Total Environment, 2018, 643: 1644–1651. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.08.102.
- [27] SARKAR D J, DAS SARKAR S, DAS B K, et al. Microplastics removal efficiency of drinking water treatment plant with pulse clarifier [J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 413: 125347. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.125347.
- [28] YANG Z, LI S, MA S, et al. Characteristics and removal efficiency of microplastics in sewage treatment plant of Xi'an City, northwest China [J]. Science of the Total Environment, 2021, 771: 145377. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.145377.
- [29] ZHANG Y H, WANG H, XU J M, et al. Occurrence and characteristics of microplastics in a wastewater treatment plant [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2021, 107(4): 677–683.
- [30] KOYUNCUOĞLU P, ERDEN G. Microplastics in municipal wastewater treatment plants: A case study of Denizli/Turkey [J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2023, 17(8): 99. DOI: 10.1007/s11783-023-1699-8.
- [31] KIM M J, NA S H, BATTOOL R, et al. Seasonal variation and spatial distribution of microplastics in tertiary wastewater treatment plant in South Korea [J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, 438: 129474. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2022.129474.
- [32] ACARER S. Microplastics in wastewater treatment plants: Sources, properties, removal efficiency, removal mechanisms, and interactions with pollutants [J]. Water Science and Technology, 2023, 87(3): 685–710.
- [33] YEE M S L, HII L W, LOOI C K, et al. Impact of microplastics and nanoplastics on human health [J]. Nanomaterials, 2021, 11(2): 496. DOI: 10.3390/nano11020496.
- [34] 王成, 李哲, 魏健, 等. 水中微塑料来源、生态毒理效应及处理技术研究进展 [J]. 环境工程技术学报, 2023, 13(5): 1883–1892.
- WANG C, LI Z, WEI J, et al. Research progress on sources, ecotoxicological effect and treatment technology of microplastics in water [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2023, 13(5): 1883–1892.
- [35] GUZZETTI E, SUREDA A, TEJADA S, et al. Microplastic in marine organism: Environmental and toxicological effects [J]. Environmental Toxicology and Pharmacology, 2018, 64: 164–171. DOI: 10.1016/j.etap.2018.10.009.
- [36] PALMER J, HERAT S. Ecotoxicity of microplastic pollutants to marine organisms: A systematic review [J]. Water Air and Soil Pollution, 2021, 232(5): 195. DOI: 10.1007/s11270-021-05155-7.
- [37] RAGUSA A, SVELATO A, SANTACROCE C, et al. Plasticenta: First evidence of microplastics in human placenta [J]. Environment International, 2021, 146: 106274. DOI: 10.

- 1016/j. envint. 2020. 106274.
- [38] ELTEMSAH Y S, BØHN T. Acute and chronic effects of polystyrene microplastics on juvenile and adult *Daphnia magna* [J]. *Environmental Pollution*, 2019, 254: 112919. DOI: 10. 1016/j. envpol. 2019. 07. 087.
- [39] CHEN Q Q, LACKMANN C, WANG W Y, et al. Microplastics lead to hyperactive swimming behaviour in adult zebrafish [J]. *Aquatic Toxicology*, 2020, 224: 9. DOI: 10. 1016/j. aquatox. 2020. 105521.
- [40] CHEN Q Q, YIN D Q, JIA Y L, et al. Enhanced uptake of BPA in the presence of nanoplastics can lead to neurotoxic effects in adult zebrafish [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 609: 1312–1321. DOI: 10. 1016/j. scitotenv. 2017. 07. 144.
- [41] NIZZETTO L, BUSSI G, FUTTER M N, et al. A theoretical assessment of microplastic transport in river catchments and their retention by soils and river sediments [J]. *Environmental Science-Processes & Impacts*, 2016, 18(8): 1050–1059.
- [42] HAUSER R, CALAFAT A M. Phthalates and human health [J]. *Occupational and Environmental Medicine*, 2005, 62(11): 806–818.
- [43] CAMPANALE C, MASSARELLI C, SAVINO I, et al. A detailed review study on potential effects of microplastics and additives of concern on human health [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(4): 1212. DOI: 10. 3390/ijerph17041212.
- [44] SETALA 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.
- [45] SANTOS D, FELIX L, LUZIO A, et al. Toxicological effects induced on early life stages of zebrafish (*Danio rerio*) after an acute exposure to microplastics alone or co-exposed with copper [J]. *Chemosphere*, 2020, 261: 127748. DOI: 10. 1016/j. chemosphere. 2020. 127748.
- [46] DONG J H, KANG Y, KUANG S P, et al. Combined biological effects of polystyrene microplastics and phenanthrene on *Tubifex tubifex* and microorganisms in wetland sediment [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 462: 142260. DOI: 10. 1016/j. cej. 2023. 142260.
- [47] HIDALGO-RUZ V, GUTOW L, THOMPSON R C, et al. Microplastics in the marine environment: A review of the methods used for identification and quantification [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(6): 3060–3075.
- [48] 王晓庆, 牛清雨, 李鹏浩, 等. 淡水水体中微塑料污染现状、检测方法 & 毒理性研究进展 [J]. *应用化工*, 2023, 52(2): 551–556.
- WANG X Q, NIU Q Y, LI P H, et al. Advances in pollution, detection and toxicology of microplastics in fresh water [J]. *Applied Chemical Industry*, 2023, 52(2): 551–556.
- [49] 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.
- [50] QIU Q, TAN Z, WANG J, et al. Extraction, enumeration and identification methods for monitoring microplastics in the environment [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2016, 176: 102–109. DOI: 10. 1016/j. ecss. 2016. 04. 012.
- [51] MCDERMID K J, MCMULLEN T L. Quantitative analysis of small-plastic debris on beaches in the Hawaiian archipelago [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2004, 48(7): 790–794.
- [52] MA B W, XUE W J, DING Y Y, et al. Removal characteristics of microplastics by Fe-based coagulants during drinking water treatment [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2019, 78: 267–275. DOI: 10. 1016/j. jes. 2018. 10. 006.
- [53] HANIF M A, IBRAHIM N, DAHALAN F A, et al. Microplastics and nanoplastics: Recent literature studies and patents on their removal from aqueous environment [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 810: 152115. DOI: 10. 1016/j. scitotenv. 2021. 152115.
- [54] LAPOINTE M, FARNER J M, HERNANDEZ L M, et al. Understanding and improving microplastic removal during water treatment: Impact of coagulation and flocculation [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(14): 8719–8727.
- [55] LI J Y, LIU H H, CHEN J P. Microplastics in freshwater systems: A review on occurrence, environmental effects, and methods for microplastics detection [J]. *Water Research*, 2018, 137: 362–374. DOI: 10. 1016/j. watres. 2017. 12. 056.
- [56] LENZ R, ENDERS K, STEDMON C A, et al. A critical assessment of visual identification of marine microplastic using Raman spectroscopy for analysis improvement [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, 100(1): 82–91.
- [57] NUELLE M T, DEKIFF J H, REMY D, et al. A new analytical approach for monitoring microplastics in marine sediments [J]. *Environmental Pollution*, 2014, 184: 161–169. DOI: 10. 1016/j. envpol. 2013. 07. 027.
- [58] NAGRAIK R, KAUSHAL A, GUPTA S, et al. Nanofabricated versatile electrochemical sensor for *Leptospira* interrogans detection [J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2020, 129(4): 441–446.
- [59] ASAMOAH B O, KANYATHARE B, ROUSSEY M, et al. A prototype of a portable optical sensor for the detection of transparent and translucent microplastics in freshwater [J]. *Chemosphere*, 2019, 231: 161–167. DOI: 10. 1016/j. chemosphere. 2019. 05. 114.
- [60] BEHERA A, MAHAPATRA S R, MAJHI S, et al. Gold

- nanoparticle assisted colorimetric biosensors for rapid polyethylene terephthalate (PET) sensing for sustainable environment to monitor microplastics[J]. *Environmental Research*, 2023, 234: 116556. DOI: 10.1016/j.envres.2023.116556.
- [61] TALVITIE J, MIKOLA A, KOISTINEN A, et al. Solutions to microplastic pollution – Removal of microplastics from wastewater effluent with advanced wastewater treatment technologies [J]. *Water Research*, 2017, 123: 401–407. DOI: 10.1016/j.watres.2017.07.005.
- [62] 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.
- [63] LI L C, XU G R, YU H R, et al. Dynamic membrane for micro-particle removal in wastewater treatment: Performance and influencing factors[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 627: 332–340. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.01.239.
- [64] ZIAJAHROMI S, NEALE P A, RINTOUL L, et al. Wastewater treatment plants as a pathway for microplastics: Development of a new approach to sample wastewater-based microplastics [J]. *Water Research*, 2017, 112: 93–99. DOI: 10.1016/j.watres.2017.01.042.
- [65] DING H J, ZHANG J, HE H, et al. Do membrane filtration systems in drinking water treatment plants release nano/microplastics? [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 755: 142658. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142658.
- [66] WANG Z H, SEDIGHI M, LEA-LANGTON A. Filtration of microplastic spheres by biochar: Removal efficiency and immobilisation mechanisms [J]. *Water Research*, 2020, 184: 116165. DOI: 10.1016/j.watres.2020.116165.
- [67] WANG Z G, SUN C Z, LI F M, et al. Fatigue resistance, reusable and biodegradable sponge materials from plant protein with rapid water adsorption capacity for microplastics removal [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 415: 129006. DOI: 10.1016/j.cej.2021.129006.
- [68] ZHOU G, WANG Q, LI J, et al. Removal of polystyrene and polyethylene microplastics using PAC and FeCl<sub>3</sub> coagulation: Performance and mechanism [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 752: 141837. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141837.
- [69] SHI Y Q, LIU P, WU X W, et al. Insight into chain scission and release profiles from photodegradation of polycarbonate microplastics[J]. *Water Research*, 2021, 195: 116980. DOI: 10.1016/j.watres.2021.116980.
- [70] ZHANG X, LIU Y X, DENG J G, et al. AuPd/3DOM TiO<sub>2</sub> Catalysts: Good activity and stability for the oxidation of trichloroethylene[J]. *Catalysts*, 2018, 8(12): 666. DOI: 10.3390/catal8120666.
- [71] PITKAAHO S, NEVANPERA T, MATEJOVA L, et al. Oxidation of dichloromethane over Pt, Pd, Rh, and V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> catalysts supported on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–TiO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–CeO<sub>2</sub> [J]. *Applied Catalysis B-Environmental*, 2013, 138: 33–42. DOI: 10.1016/j.apcatb.2013.01.058.
- [72] KIM S H, KWAK S-Y, SUZUKI T. Photocatalytic degradation of flexible PVC/TiO<sub>2</sub> nanohybrid as an eco-friendly alternative to the current waste landfill and dioxin-emitting incineration of post-use PVC[J]. *Polymer*, 2006, 47(9): 3005–3016.
- [73] LEE J M, BUSQUETS R, CHOI I C, et al. Photocatalytic degradation of polyamide 66; evaluating the feasibility of photocatalysis as a microfibre-targeting technology [J]. *Water*, 2020, 12(12): 3551. DOI: 10.3390/w12123551.
- [74] NABI I, BACHA A U R, LI K, et al. Complete photocatalytic mineralization of microplastic on TiO<sub>2</sub> nanoparticle film [J]. *iScience*, 2020, 23(7): 101326.
- [75] ARIZA-TARAZONA M C, VILLARREAL-CHIU J F, BARBIERI V, et al. New strategy for microplastic degradation: Green photocatalysis using a protein-based porous N-TiO<sub>2</sub> semiconductor [J]. *Ceramics International*, 2019, 45(7): 9618–9624.
- [76] ARIZA-TARAZONA M C, VILLARREAL-CHIU J F, HERNANDEZ-LOPEZ J M, et al. Microplastic pollution reduction by a carbon and nitrogen-doped TiO<sub>2</sub>: Effect of pH and temperature in the photocatalytic degradation process[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 395: 122632. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.122632.
- [77] UHEIDA A, MEJIA H G, ABDEL-REHIM M, et al. Visible light photocatalytic degradation of polypropylene microplastics in a continuous water flow system [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 406: 124299. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.124299.
- [78] LAM S M, SIN J C, ZENG H, et al. Green synthesis of Fe-ZnO nanoparticles with improved sunlight photocatalytic performance for polyethylene film deterioration and bacterial inactivation[J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2021, 123: 105574. DOI: 10.1016/j.mssp.2020.105574.
- [79] JIANG R R, LU G H, YAN Z H, et al. Microplastic degradation by hydroxy-rich bismuth oxychloride[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 405: 124247. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.124247.
- [80] BROOKS A N, TURKARSLAN S, BEER K D, et al. Adaptation of cells to new environments [J]. *Wiley Interdisciplinary Reviews-Systems Biology and Medicine*, 2011, 3(5): 544–561.
- [81] DEGLI-INNOCENTI F. Biodegradation of plastics and ecotoxicity testing: When should it be done[J]. *Frontiers in Microbiology*,

- 2014, 5. DOI: 10.3389/fmicb.2014.00475.
- [82] SOL D, LACA A, LACA A, et al. Approaching the environmental problem of microplastics: Importance of WWTP treatments[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 740: 140016. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140016.
- [83] URBANEK A K, RYMOWICZ W, MIRONCZUK A M. Degradation of plastics and plastic-degrading bacteria in cold marine habitats[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2018, 102(18): 7669–7678.
- [84] 李瑞, 李宁, 梁澜, 等. 水环境中微塑料去除技术的研究进展[J]. *水处理技术*, 2022, 48(2): 1–5, 12.  
LI R, LI N, LIANG L, et al. Research progress on removal methods of microplastics from aquatic environment [J]. *Technology of Water Treatment*, 2022, 48(2): 1–5, 12.
- [85] AUTA H S, EMENIKE C U, FAUZIAH S H. Screening of *Bacillus* strains isolated from mangrove ecosystems in Peninsular Malaysia for microplastic degradation [J]. *Environmental Pollution*, 2017, 231: 1552–1559. DOI: 10.1016/j.envpol.2017.09.043.
- [86] PARK S Y, KIM C G. Biodegradation of micro-polyethylene particles by bacterial colonization of a mixed microbial consortium isolated from a landfill site[J]. *Chemosphere*, 2019, 222: 527–533. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.01.159.
- [87] DOBRETISOV S, ABED R M M, TEPLITSKI M. Mini-review; Inhibition of biofouling by marine microorganisms [J]. *Biofouling*, 2013, 29(4): 423–441.
- [88] SINGH L, WAHID Z A. Methods for enhancing bio-hydrogen production from biological process: A review [J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2015, 21: 70–80. DOI: 10.1016/j.jiec.2014.05.035.
- [89] CHEN Y Y, STEMPLE B, KUMAR M, et al. Cell surface display fungal laccase as a renewable biocatalyst for degradation of persistent micropollutants bisphenol A and sulfamethoxazole [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(16): 8799–8808.
- [90] FERREIRA J A, VARJANI S, TAHERZADEH M J. A critical review on the ubiquitous role of filamentous fungi in pollution mitigation[J]. *Current Pollution Reports*, 2020, 6(4): 295–309.
- [91] YUAN J H, MA J, SUN Y R, et al. Microbial degradation and other environmental aspects of microplastics/plastics[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 715: 136968. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.136968.
- [92] LI L, LIU D, SONG K, et al. Performance evaluation of MBR in treating microplastics polyvinylchloride contaminated polluted surface water [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, 150: 110724. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2019.110724.
- [93] LARES M, NCIBI M C, SILLANPAA M, et al. Occurrence, identification and removal of microplastic particles and fibers in conventional activated sludge process and advanced MBR technology[J]. *Water Research*, 2018, 133: 236–246. DOI: 10.1016/j.watres.2018.01.049.
- [94] XIONG X J, BOND T, SIDDIQUE M S, et al. The stimulation of microbial activity by microplastic contributes to membrane fouling in ultrafiltration [J]. *Journal of Membrane Science*, 2021, 635: 119477. DOI: 10.1016/j.memsci.2021.119477.
- [95] LI L, SONG K, YEERKEN S, et al. Effect evaluation of microplastics on activated sludge nitrification and denitrification [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 707: 135953. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135953.
- [96] MCCORMICK A, HOELLEIN T J, MASON S A, et al. Microplastic is an abundant and distinct microbial habitat in an urban river[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(20): 11863–11871.
- [97] SHI X H, ZHANG X T, GAO W, et al. Removal of microplastics from water by magnetic nano- $\text{Fe}_3\text{O}_4$  [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 802: 149838. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.149838.
- [98] GRBIC J, NGUYEN B, GUO E, et al. Magnetic extraction of microplastics from environmental samples [J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2019, 6(2): 68–72.
- [99] SCHWAMINGER S P, SCHWARZENBERGER K, GATZEMEIER J, et al. Magnetically induced aggregation of iron oxide nanoparticles for carrier flotation strategies [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(17): 20830–20844.
- [100] GAO Z, ZHOU J, XUE M M, et al. Theoretical and experimental insights into the mechanisms of C6/C6 PFPiA degradation by dielectric barrier discharge plasma[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 424: 127522. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.127522.
- [101] JIANG N, LI X C, GUO H, et al. Plasma-assisted catalysis decomposition of BPA over graphene-CdS nanocomposites in pulsed gas-liquid hybrid discharge: Photocorrosion inhibition and synergistic mechanism analysis [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 412: 128627. DOI: 10.1016/j.cej.2021.128627.
- [102] REN J Y, LI J Y, ZHEN Y Z, et al. Removal of polyvinyl chloride microplastic by dielectric barrier discharge plasma[J]. *Separation and Purification Technology*, 2022, 290: 120832. DOI: 10.1016/j.seppur.2022.120832.
- [103] YAO L B, KING J, WU D Z, et al. Non-thermal plasma-assisted hydrogenolysis of polyethylene to light hydrocarbons[J]. *Catalysis Communications*, 2021, 150: 106274. DOI: 10.1016/j.catcom.2020.106274.
- [104] CUNHA C, FARIA M, NOGUEIRA N, et al. Marine vs freshwater microalgae exopolymers as biosolutions to microplastics pollution[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 249: 372–380. DOI: 10.1016/j.envpol.2019.03.046.

(下转第156页)

- 2020, 33(10): 2272–2282.
- [9] 霍荣荣. 河湖健康评价的理论与应用研究[D]. 北京: 北京师范大学, 2011.
- HUO R R. Theoretical and applied research on river and lake health assessment [D]. Beijing: Beijing Normal University, 2011.
- [10] 孙秋根. 太湖平原河网典型抗生素的时空分布和风险评价[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.
- SUN Q G. Spatial and temporal distribution and risk evaluation of typical antibiotics in the river network of Taihu Lake Plain [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2018.
- [11] 盛鹏程, 徐磊, 林锋, 等. 浙江湖州苕溪底泥中抗生素残留分析研究[J]. 中国水产, 2021(1): 96–100.
- SHENG P C, XU L, LIN F, et al. Analysis of antibiotic residues in the sediment of Campsis Creek, Huzhou, Zhejiang[J]. China Aquaculture, 2021(1): 96–100.
- [12] 陈雷, 远野, 卢少勇, 等. 环太湖主要河流入出湖口表层沉积物污染特征研究[J]. 中国农学通报, 2011, 27(1): 294–299.
- CHEN L, YUAN Y, LU S Y, et al. The analysis of pollutant characteristics in surface sediments of the stream inlets and outlets of the main rivers around Taihu Lake[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(1): 294–299.
- [13] 蔡杏伟, 李为, 樊厚瑞, 等. 鱼类群落调控在浅水湖泊生态修复中的作用: 以傀儡湖为例[J]. 中国水产科学, 2021, 28(6): 737–742.
- CAI X W, LI W, FAN H R, et al. Role of fish community regulation in ecological restoration of shallow lakes: A case study of Puppet Lake[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2021, 28(6): 737–742.
- [14] 胡国安. 平原河网区河流健康评估方法及应用[D]. 扬州: 扬州大学, 2018.
- HU G A. River health assessment method and application in plains river network area [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2018.
- [15] 闫永辉. 大凌河健康评估与问题诊断分析[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2013.
- YAN Y H. Health assessment and problem diagnosis analysis of Daling River [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Hydropower, 2013.
- [16] 杨俊, 王汉欣, 吴韵斐, 等. 苏州市水环境中典型抗生素污染特征及生态风险评估[J]. 生态环境学报, 2019, 28(2): 359–368.
- YANG J, WANG H X, WU Y F, et al. Occurrence, distribution and risk assessment of typical antibiotics in the aquatic environment of Suzhou City [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019, 28(2): 359–368.
- [17] 盛萧, 毛建忠, 曹然, 等. 基于5种大型底栖动物评价指数的河流生态健康评价[J]. 水资源保护, 2017, 33(1): 75–82.
- SHENG X, MAO J Z, CAO R, et al. River health assessment based on five biological indices for macroinvertebrates [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(1): 75–82.
- [18] 褚克坚, 阚丽景, 华祖林, 等. 平原河网地区河流水生态评价指标体系构建及应用[J]. 水力发电学报, 2014, 33(5): 138–144.
- CHU K J, KAN L J, HUA Z L, et al. Construction and application of an indicator system for assessment of river ecosystem in plain tributary networks [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(5): 138–144.

(上接第21页)

- [105] NOUHA K, KUMAR R S, BALASUBRAMANIAN S, et al. Critical review of EPS production, synthesis and composition for sludge flocculation [J]. Journal of Environmental Sciences, 2018, 66: 225–245. DOI: 10.1016/j.jes.2017.05.020.
- [106] ROMERO M, CARABELLI A, SWIFT M R, et al. Fluid dynamics and cell-bound Psl polysaccharide allows microplastic capture, aggregation and subsequent sedimentation by *Pseudomonas aeruginosa* in water [J]. Environmental Microbiology, 2022, 24(3): 1560–1572.
- [107] CUNHA C, SILVA L, PAULO J, et al. Microalgal-based biopolymer for nano- and microplastic removal: A possible biosolution for wastewater treatment [J]. Environmental Pollution, 2020, 263: 10. DOI: 10.1016/j.envpol.2020.114385.
- [108] LIU S Y, LEUNG M M L, FANG J K H, et al. Engineering a microbial ‘trap and release’ mechanism for microplastics removal [J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 404: 127079. DOI: 10.1016/j.cej.2020.127079.