

张智轲, 辛惠娟, 王利娟, 等. 饮用水中胶体态新型微塑料的研究进展[J]. 净水技术, 2026, 45(4): 22-34.

Zhang Z K, Xin H J, Wang L J, et al. Research progress on colloidal new microplastics in drinking water[J]. Water Purification Technology, 2026, 45(4): 22-34.

## 饮用水中胶体态新型微塑料的研究进展

张智轲<sup>1</sup>, 辛惠娟<sup>1</sup>, 王利娟<sup>2</sup>, 赵伟高<sup>3,\*</sup>

(1. 兰州交通大学环境与市政工程学院, 甘肃兰州 730070; 2. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300350; 3. 天津大学环境科学与工程学院, 天津 300350)

**摘要** 【目的】随着全球微塑料污染加剧, 以再生塑料和生物塑料为代表的新型塑料因兼具环境友好性与生态减负潜力而备受关注。新型塑料在缓解传统塑料造成的环境压力的同时, 其在水中经过迁移、吸附、团聚等行为, 往往以胶体态污染物形式存在, 对环境造成潜在影响。与传统微塑料相比, 胶体态新型微塑料(CNMPs)因胶体稳定性和新型塑料基质特性, 在环境迁移、检测技术及处理工艺中表现出显著差异。【方法】本文聚焦于饮用水中的CNMPs, 从其概述、检测技术、健康风险以及控制策略4个方面, 总结和阐述了近年来饮用水中CNMPs的研究进展。【结果】其在水环境长期赋存的过程中, 易通过老化破碎、吸附团聚等环境行为形成具有高吸附性、易迁移性的CNMPs。传统检测技术在检测CNMPs时可能存在灵敏度和准确性方面的不足, 新兴技术虽灵敏度较高, 但对设备要求更为严苛。这给精确评估CNMPs在环境中的分布和暴露水平带来困难。CNMPs可通过食物链对人体健康产生潜在威胁, 其自身携带化学添加剂, 还能吸附有毒化合物, 可能干扰人体内分泌系统, 导致多种健康问题。在传统饮用水处理工艺中, 预处理工艺中的氧化、溶气气浮可在一定程度上去除CNMPs, 但其在水厂的应用并不广泛; 常规处理工艺的混凝沉淀对小粒径CNMPs去除效果有限, 过滤工艺在去除粒径 $>10\ \mu\text{m}$ 的CNMPs方面效果显著, 但对粒径 $<10\ \mu\text{m}$ 的CNMPs的去除效果有限; 深度处理工艺虽对CNMPs的去除效率可达90%, 但面临成本高、技术复杂等难题。【结论】本文基于研究现状对CNMPs的研究方向和控制技术进行了展望, 旨在为缓解新型微塑料污染问题的水处理技术提供关键参考。

**关键词** 胶体态新型微塑料 生物塑料 再生塑料 饮用水 水处理技术

中图分类号: TU991 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2026)04-0022-13

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.04.003

## Research Progress on Colloidal New Microplastics in Drinking Water

Zhang Zhike<sup>1</sup>, Xin Huijuan<sup>1</sup>, Wang Lijuan<sup>2</sup>, Zhao Weigao<sup>3,\*</sup>

(1. School of Environment and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. China Municipal Engineering North China Design Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300350, China;

3. School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

**Abstract** [Objective] As the global prevalence of microplastic pollution continues to rise, novel plastic varieties, exemplified by recycled plastics and bioplastics, are gaining significant attention owing to their inherent environmental friendliness and potential of ecological burdens reduction. While alleviating the environmental stress imposed by traditional plastics, novel plastics frequently assume a colloidal state subsequent to migration, adsorption, and agglomeration in aqueous environments, thereby potentially exerting an impact on the environment. In comparison with traditional microplastics, colloidal new microplastics (CNMPs) exhibit substantial disparities in environmental migration, detection methodologies, and treatment processes attributable to their colloidal stability and the unique properties of the novel plastic matrix. [Methods] This paper focuses on CNMPs in drinking water, the research progress of CNMPs in drinking water in recent years is summarized and elaborated from four aspects, namely, their overview, detection

[收稿日期] 2025-04-23

[基金项目] 河南省重点研发专项(241111320200); 甘肃省重点研发项目(GXH20250325-13)

[作者简介] 张智轲(2000—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为饮用水过滤技术, E-mail: z2k962464@163.com。

[通信作者] 赵伟高(1990—), 男, 副研究员, 主要研究方向为污染物微界面过程和水质净化技术, E-mail: zhaoweigao@tju.edu.cn。

techniques, health risks and control strategies. [Results] During their long-term persistence in aquatic environments, CNMPs are prone to forming highly adsorptive and highly mobile particles through environmental processes such as aging and fragmentation, adsorption and aggregation. Traditional detection technologies exhibit limitations in sensitivity and accuracy for CNMPs detection, while emerging technologies, though more sensitive, have more stringent equipment requirements. This poses challenges to the accurate assessment of the distribution and exposure levels of CNMPs in the environment. CNMPs can exert potential threats to human health via the food chain. CNMPs are equipped with chemical additives and can adsorb toxic compounds, potentially disrupting the human endocrine system and leading to a range of health complications. In traditional drinking water treatment processes, oxidation and dissolved air flotation in the pretreatment stage can remove CNMPs to some extent, but their application in water treatment plants is not widely; conventional treatment processes, such as coagulation and sedimentation, have limited effectiveness in removing small-particle-sized CNMPs. Filtration processes are highly effective in removing CNMPs with particle sizes greater than 10  $\mu\text{m}$ , but their effectiveness is limited for those smaller than 10  $\mu\text{m}$ . Advanced treatment processes can attain removal efficiency of up to 90% for CNMPs, but they encounter challenges such as high costs and complex technology. [Conclusion] The research direction and control technology of CNMPs based on the current status of this paper are prospected, aiming to provide a key reference for water treatment technology to alleviate the new microplastic pollution problem.

**Keywords** colloidal new microplastics (CNMPs) bioplastics recycled plastics drinking water water treatment technology

塑料问世以来,在各行业广泛应用<sup>[1]</sup>。由2021年数据可知,全球塑料生产量已达3.6亿t,由此产生大量塑料废物,引发土地、海洋和水源污染等严重问题<sup>[2]</sup>。其中,包装是塑料废物的最大来源,约占总质量的50%<sup>[3]</sup>,因其难以降解,最终会通过风化、老化和侵蚀等过程分解为粒径更小的微塑料<sup>[4-5]</sup>。微塑料因其微小尺寸和较大比表面积,易于在饮用水中传播,并与有害物质相互作用,进一步加剧污染问题<sup>[6]</sup>。研究<sup>[7]</sup>表明,微塑料广泛存在于饮用水体中,可能通过水源地积累进入饮用水对人类健康构成威胁<sup>[8]</sup>。

为减轻传统塑料对环境造成的压力,新型塑料应运而生,包括生物塑料和再生塑料,且其应用越来越广泛。研究<sup>[9]</sup>发现:促进生物塑料完全降解的自然条件较为罕见,这使得生物塑料可能比传统塑料能更快地降解为微米级和纳米级颗粒,更容易形成微塑料<sup>[10]</sup>。同时另一种新型塑料——再生塑料也存在回收效率低、导致水环境污染等问题,因此更易形成微塑料。当新型微塑料进入饮用水后,随着环境影响形成胶体态新型微塑料(CNMPs)<sup>[11]</sup>,其具有比表面积大、表面电荷强等胶体特性,因此更易吸附污染物并在饮用水系统中迁移。目前,关于CNMPs的研究<sup>[12]</sup>仅停留在部分新型微塑料与有机污染物的相互作用,但有关其在水中难以降解、降解后的归宿等问题仍有待研究。同时,现有检测技术对其灵敏度不足,导致风险评估存在盲区。

本文聚焦于新型塑料进入饮用水中形成的

CNMPs,尽管CNMPs研究尚处于起步阶段,但其作为新型塑料环境归宿的关键环节,已展现出与传统微塑料不同的风险特征。本文首次系统整合其定义、形成、检测和控制,旨在为相关研究提供理论依据和技术支持,以期为全球塑料污染问题的解决贡献智慧。

## 1 饮用水中 CNMPs 概述

传统石油基塑料难以自然降解,易老化破碎形成微塑料,污染水环境,威胁生态和人类健康<sup>[13]</sup>。目前处理方式包括填埋、焚烧等。填埋易产生微塑料,进入河流和海洋污染水体,威胁饮用水安全<sup>[14]</sup>。焚烧产生的能源虽可用于发电或供热<sup>[15]</sup>,但会产生有毒成分的飞灰等物质,可能致癌、致畸和致突变<sup>[16]</sup>。新冠肺炎疫情期间,医用塑料废物增加了3倍~10倍<sup>[17]</sup>,其中包含大量新型塑料。这些塑料废物若处理不当,会显著增加环境中微塑料的产生概率。同时为增强塑料性能所添加的多种化学添加剂,对环境和人体健康存在潜在危害<sup>[18]</sup>。尽管新型塑料在一定程度上减少了传统塑料的使用,但其环境影响尚不明确,且仍有大量塑料在环境中积累,对生态系统构成威胁。这些新型塑料在未达到降解条件时,仍会破碎形成微塑料颗粒,与普通塑料一样对饮用水系统产生负面影响<sup>[19]</sup>。

### 1.1 CNMPs 的定义

水环境中,胶体是指分散质粒子直径为1 nm~1  $\mu\text{m}$ 的分散系,具有丁达尔效应、电泳现象,并不停地做布朗运动<sup>[20]</sup>。胶体态是介于溶解态和颗粒态

之间的一种特殊状态,而不是一种物质<sup>[21]</sup>。胶体态与溶解态物质不同,其存在不易沉降、吸附迁移能力更强的特点。这种状态下更容易与环境中的其他物质吸附、团聚;与颗粒态物质相比,胶体态物质不易受重力沉降,迁移能力更强。

饮用水中,新型微塑料可能因环境条件从非胶体态转化为胶体态<sup>[21]</sup>。当新型微塑料在水环境中以胶体态稳定存在时,称为 CNMPs。其具有胶体的稳定悬浮、高比表面积、易吸附和易迁移的性质。依据胶体化学(DLVO)理论,胶体稳定性的形成源于静电排斥作用与空间位阻效应实现。对于静电稳定机制,分散相微粒通过表面电离或离子吸附而带电,周围形成双电层结构。当粒子相互接近时,其双电层重叠产生静电排斥力,该力若能克服粒子间的范德华吸引力,即可形成能垒从而阻止聚沉,使体系处于动力学稳定状态,这使得 CNMPs 在饮用水中可以长期存在与转化。

## 1.2 CNMPs 的形成

CNMPs 是微塑料时代缺失的一环<sup>[22]</sup>。生物塑料[如聚乳酸(PLA)]因含有酯基、羟基等极性基团,在饮用水中更易通过进一步破碎形成胶体态碎片;再生塑料因回收过程的分子链断裂,产生粒径 $< 1 \mu\text{m}$ 的碎片比例比传统塑料更高<sup>[23]</sup>。这种基质差异导致 CNMPs 的产率显著高于传统微塑料。相较于溶解态污染物,CNMPs 粒径小、比表面积大、吸附能力强、吸附位点更多,往往能与周围环境中的物质相互作用,更容易与环境中的其他物质吸附、团聚。与颗粒态相比,CNMPs 受重力沉降和孔隙阻拦作用较弱,更易随水体迁移。由于 CNMPs 的胶体特性主要由塑料核心及其表面电荷决定,尽管其可能与环境污染物形成团聚体,但核心仍为关键特征。

### 1.2.1 生物微塑料的形成

依据欧洲生物塑料组织的定义,基于生物材料制备的塑料、可生物降解的塑料,或同时具备这2种特性的塑料,都被称为生物塑料<sup>[23]</sup>。其原材料来自植物、生物废物和微生物等,功能与传统塑料类似。在当今生产的生物塑料总量中,43%是可生物降解的,57%是不可生物降解的。如:生物基聚乙烯、生物基聚对苯二甲酸乙二醇酯、生物基聚酰胺等<sup>[24]</sup>。这些不可降解的生物塑料旨在节约化石资源。与传统塑料相同,生物塑料在水环境中生物降解性受限,也易形成 CNMPs。像 PLA 塑料,若未处于适宜降解

条件(如 50 °C 高温)的堆肥环境,在自然界中难以完全降解,最终成为微塑料来源之一<sup>[25-26]</sup>。

作为传统塑料的替代品之一,生物塑料一直是研究热点,二者用途相似但又存在明显差异,但从微塑料的形成角度来看,又存在着显著差异。传统塑料是由不可生物降解的化石原料经化工等工艺制成,在自然环境中极难分解,长期暴露下老化破碎形成微塑料的过程相对缓慢但持续发生。而生物塑料虽部分具有生物降解性,但降解条件难以满足,如缺乏适宜的微生物群落、温度、湿度等,降解速率大幅降低,导致其也易成为微塑料的潜在来源。

### 1.2.2 再生微塑料的形成

除生物塑料外,再生塑料因回收工艺的物理化学损伤,亦成为 CNMPs 的重要来源。再生塑料是通过预处理、熔融造粒和改性等物理或化学方法加工回收塑料后重新得到的塑料<sup>[27]</sup>。传统塑料因难以降解,其在垃圾填埋场及自然环境中的堆积和风化,是微塑料的重要来源。而由传统塑料回收再生的再生塑料,更易形成微塑料。尽管目前塑料回收已成为减少塑料废物、助力可持续发展的实用方法,但再生塑料在回收加工中经机械剪切、化学改性等操作后,其耐热性能和化学稳定性能变差,分子结构稳定性下降,在后续使用及环境暴露中更易分解为微小颗粒,形成微塑料的概率相对更高<sup>[28]</sup>。例如,再生塑料颗粒在注塑成型时,会因高温和压力进一步破坏分子链结构,这些制品废弃后,在环境中更易破碎形成微塑料<sup>[29]</sup>。

综上所述,当新型塑料在环境中持续降解与碎片化形成新型微塑料后,因环境影响形成胶体态污染物<sup>[30]</sup>,得以长期悬浮于水体中,成为高效吸附污染物的 CNMPs。

## 1.3 饮用水中 CNMPs 污染分布

微塑料降解途径包括光氧化降解<sup>[31]</sup>、热降解<sup>[32]</sup>、催化降解和生物降解。其中,生物降解又可以分为细菌生物降解<sup>[33]</sup>和真菌生物降解<sup>[34]</sup>,例如堆肥<sup>[35]</sup>是实现生物降解的重要工艺方式之一。这些不同的降解途径共同促成了微塑料的形成,凸显了它们在环境中发生和分布的复杂性。当前研究主要关注传统微塑料在海洋、淡水、地下水、土壤、沉积物、生物群和人类等各种环境中的出现和分布,但对饮用水中 CNMPs 的研究甚少。因此,有必要系统开

展 CNMPs 的赋存及迁移转化全流程的研究。

目前,我国区域水源的传统微塑料及新型微塑料水平如表 1 所示。由表 1 可知,国内饮用水体中的传统微塑料污染已较普遍,研究显示这些微塑料形状多样,包含纤维、颗粒、小球等。材质大部分为聚丙烯(PP)、聚乙烯(PE)、聚苯乙烯(PS)、聚酰胺(PA)、聚氯乙烯(PVC)和聚对苯二甲酸乙二酯(PET)等<sup>[20]</sup>。然而,由于现有检测技术的局限性,这些研究未能针对新型微塑料开展专项探究,难以对水中新型微塑料进行特异性识别,未来需通过研发新型检测技术、优化现有方法,突破检测技术瓶颈,推进新型微塑料的研究。

从目前资料来看,地表水、地下水、水库、雨水中

均检测出传统微塑料,其中河流水丰度最高,这可能是由于其与人类生产生活密切接触。华中地区地表水到入海口长江三角洲和珠江三角洲地区的淡水微塑料含量明显降低,证明了微塑料的陆源性质<sup>[36]</sup>。对 CNMPs 的丰度研究目前十分有限,故通过其前驱体新型微塑料的污染分布来分析其分布特征。周添红等<sup>[37]</sup>研究某水库中微塑料赋存情况丰度水平显著低于国内湖泊型水体的丰度数据,而略低于河流型水体。仇付国等<sup>[38]</sup>研究雨水径流中微塑料的赋存情况,其中生物塑料类占比为 5%,而再生塑料无法统计。这些新型微塑料进入饮用水后,通过环境作用将会形成 CNMPs,且其在各类水体中的丰度均不低。

表 1 我国主要流域水源中微塑料与新型微塑料的污染水平

Tab. 1 Pollution Levels of Microplastics and New Microplastics in Water Sources of Major River Basins in China

区域	水源类型	传统微塑料丰度	新型微塑料丰度	新型塑料占比	参考文献
太湖	湖泊	3.40~25.8 个/km <sup>2</sup>	—	—	[39-40]
渤海	海洋	(0.35±0.13) 个/km <sup>2</sup>	0.12 个/km <sup>2</sup>	13%	[41-42]
胶州湾	海洋	20~120 个/km <sup>2</sup>	50 个/km <sup>2</sup>	56.25%	[43-44]
长江三峡	河流	1.60~12.61 个/km <sup>2</sup>	—	—	[45]
长江入海口	河流	(4.14±2.46) 个/km <sup>2</sup>	—	—	[46]
黄河(中上游)	河流	(43.57±34.49) 个/kg	—	—	[47-48]
黄河(下游)	河流	(54.29±69.97) 个/kg	—	—	[47-48]
漳河邯郸段	河流	(6 717±2 350) 个/m <sup>3</sup>	—	10%~20%	[49]
汉江	河流	(2 933±305.5) 个/km <sup>2</sup>	—	—	[50]
武汉南湖	湖泊	(5 745±901.6) 个/km <sup>2</sup>	—	—	[50]
武汉北湖	湖泊	(8 925±1 591) 个/km <sup>2</sup>	—	—	[50]
南海	海洋	(0.52±0.42) 个/m <sup>3</sup>	0.12 个/km <sup>2</sup>	0~20%	[51]
东海海岸	海洋	0.167 个/m <sup>3</sup>	—	—	[45,52]
密云水库	水库	0.4~7.6 个/m <sup>3</sup>	—	51.7%	[53]
刘家峡水库	水库	(0.58±0.17) 个/m <sup>3</sup>	—	34%	[37]

## 2 饮用水中 CNMPs 的检测技术与健康风险

目前,关于在水环境领域,CNMPs 的检测技术,以及其毒理学效应的研究是一个新兴领域,仍然有几个主要的研究空白需要填补。目前 CNMPs 的检测技术主要存在灵敏度和准确性方面的不足。而毒理学研究主要侧重于短期暴露,而对长期暴露的长期影响知之甚少。有必要研究 CNMPs 与污染物和气候变化等其他环境压力因素相结合的累积效应。这些组合的压力源可能具有协同或拮抗作用,但目

前尚未完全了解。CNMPs 对不同生物体产生毒性作用的具体机制,目前仍在很大程度上未知。需要进行研究来了解其通过食物链不同级别的转移,从初级生产者(例如植物和藻类)到更高的营养级别,包括人类,以评估 CNMPs 进入食物链的潜在风险。

### 2.1 CNMPs 的采样与检测技术

#### 2.1.1 CNMPs 的采样与预处理方法

传统微塑料与新型微塑料都是微塑料,在采样方面具有一致性,需遵循代表性、随机性和避免交叉

污染原则<sup>[53]</sup>。然而,当新型微塑料成为胶体态时,因尺寸更小、胶体特性突出、易团聚且常与溶解性有机质结合,采样需更精细的富集技术和稳定性控制,保持其原始形态和分布状态。在采样时需特别关注粒径小、易团聚和易受环境影响等问题。其采样和预处理有3个注意要点:避免颗粒损失、抑制团聚/解吸、实现胶体相精准分离。

新型微塑料采样方法主要关注采样的全面性和代表性,而 CNMPs 采样更注重分层采样和原位表征,以获取其在水体中的真实分布和状态信息;新型微塑料在采样时使用惰性材质容器,避免塑料材质释放微塑料干扰样品,CNMPs 对采样容器材质要求更严格还要避免容器影响胶体团聚<sup>[54]</sup>。同时,由于 CNMPs 在水体中存在垂直分布差异,需采用分层采样器获取不同水层样品,以避免因重力沉降导致的样本偏差。原位监测参数(如 pH、电导率、浑浊度)需同步记录,因环境条件变化可能导致 CNMPs 表面电荷改变,引发团聚或解吸。

新型微塑料和 CNMPs 在预处理阶段的要求因颗粒特性差异而有所不同。新型微塑料预处理依赖物理分离和强氧化,适用于大颗粒处理<sup>[54]</sup>。CNMPs

则需精细维持胶体稳定性,依赖超滤/离心富集,避免结构破坏。为防止 CNMPs 团聚,需在样品中添加稳定剂,避免 pH 的剧烈波动。需要注意的是,两者均需去除样品中的有机质、无机质等干扰物,确保检测准确性<sup>[55]</sup>。

### 2.1.2 CNMPs 的检测技术

近期,多项研究<sup>[56-59]</sup>指出,现有的微塑料检测技术在灵敏度和准确性方面存在提升空间,这可能干扰对微塑料暴露水平的精确评估。在检测微塑料的丰度和浓度时,误判情况时有发生,尤其是针对本文聚焦的 CNMPs,因其胶体特性,传统检测方法面临诸多挑战,导致其检测需克服以下挑战:(1)传统目视法与显微镜难以识别亚微米级颗粒;(2)拉曼/傅里叶变换红外光谱(FTIR)易受水体背景信号干扰;(3)热裂解气相色谱-质谱联用(GC/MS)需优化裂解温度以避免胶体组分分解。因此,新兴技术如量子级联激光器(QCL)和微型颗粒物精细分类检测仪更适用于 CNMPs 的高通量分析。针对目前已经出现多种新型检测技术,汇总如表 2 所示,对 2 类检测技术进行比较,有助于加深对 CNMPs 的理解。

表 2 CNMPs 的传统与新兴检测技术汇总  
 Tab. 2 Summary of Traditional and Emerging Detection Technologies for CNMPs

检测方法类型	检测技术	检测原理	优势	局限	适用场景	参考文献
传统检测方法	目视法	肉眼或显微镜观察	操作简单、成本低	仅能对大粒径的颗粒进行筛选	样品初步筛选	[57]
	显微镜图像分析[扫描电子显微镜(SEM)]	电子束扫描成像并结合能谱仪(EDS)分析元素	纳米级分辨率,能分析结构与成分	样品需镀膜,成本高、耗时长	需深入研究微观结构与成分	[57]
	FTIR	红外吸收峰识别聚合物类型	无损检测、适合批量筛查	受水分干扰,无法测粒径<20 μm 颗粒	含水量低、较大粒径样品的定性分析	[6]
	拉曼光谱	分子振动模式分析	可检测微小颗粒、不受水干扰	荧光易干扰检测	微小、含水量高样品快速检测	[58]
新兴检测方法	热裂解 GC/MS	高温裂解后质谱鉴定产物	灵敏度高、适用于复杂基质定量	样品处理复杂	复杂基质中新型微塑料定量	[59-60]
	微型颗粒物精细分类检测仪	—	可识别亚微米级颗粒、高通量、快速检测	—	亚微米级新型微塑料快速检测	[61]
	改进的残差网络模型(应用于拉曼光谱)	优化拉曼光谱分类识别	提升低质量光谱分类准确率	依赖拉曼检测	处理拉曼光谱数据以识别各种微塑料	[62]
	量子级联激光器	中红外波段匹配特征吸收峰	光谱覆盖广、灵敏度高、检测快速	—	多种类型、微米级新型微塑料快速检测	[63-64]

不同检测技术各有优劣,在实际检测 CNMPs 时,需要依据样品特性、检测目标以及试验条件综合选择合适的检测方法。未来,开发更加高效、灵敏、准确且普适性强的检测技术,尤其是针对粒径更小,具有胶体稳定性和化学复杂性的 CNMPs 的检测方法是微塑料检测领域的重要研究方向,这对于准确评估 CNMPs 在环境中的分布、迁移转化规律及其对生态系统和人体健康的影响具有关键意义。

## 2.2 CNMPs 的健康风险

在全球塑料污染问题日益严峻的当下,微塑料对人类健康和生态环境的负面影响逐渐成为研究焦点。与传统塑料一样,新型塑料也含有各类化学添加剂。包括增塑剂、阻燃剂和抗氧化剂等<sup>[65]</sup>。随着塑料的降解,其中的化合物和添加剂可能会释放到环境中<sup>[66]</sup>。这些潜在有毒物质的浸出可能带来环境和健康风险,尤其是当这些化学物质在食物链或水源中积累时<sup>[67]</sup>,风险会进一步加剧。此外,塑料还可能与环境中已有的其他污染物如重金属或持久性有机污染物发生相互作用<sup>[68]</sup>。这些相互作用可能产生累加或协同效应,即综合影响大于单独影响之和,这可能会加剧环境危害<sup>[69]</sup>。

CNMPs 由于其胶体稳定性及纳米级尺寸特性,更容易通过环境运输进入食物链,还可绕过肠道屏障直接进入血液循环对人类健康产生负面影响。目前已有报告称它们存在于生物标本中,如唾液、粪便和血液<sup>[21]</sup>。CNMPs 在环境中的运输和对人类健康的威胁的总体途径如图 1 所示。CNMPs 在饮用水中通过“胶体泵”效应对有害污染物的吸附更强<sup>[70]</sup>,每日饮用积累,长期摄入或接触这些化学物质会对人体造成健康风险<sup>[71]</sup>。

当饮用水环境条件发生变化时,水中污染物可能转化为胶体态,致使 CNMPs 的浓度上升<sup>[72]</sup>。饮用水中的 CNMPs 会通过静电引力、范德华力等作用,吸附其他污染物形成团聚体,引发胶体泵效应,造成水质复合污染。CNMPs 对污染物的吸附受多种因素影响,尺寸越小、老化程度越高,吸附容量越大<sup>[73]</sup>。吸附机理包括疏水作用、范德华力等,含苯共轭结构的 CNMPs 还存在  $\pi$ - $\pi$  相互作用<sup>[74]</sup>。因其颗粒特性,CNMPs 对多种有机污染物有强吸附和富集趋势<sup>[75]</sup>。研究<sup>[42]</sup>显示,可生物降解的聚对苯二甲酸-己二酸丁二醇酯(PBAT)微塑料比传统塑料

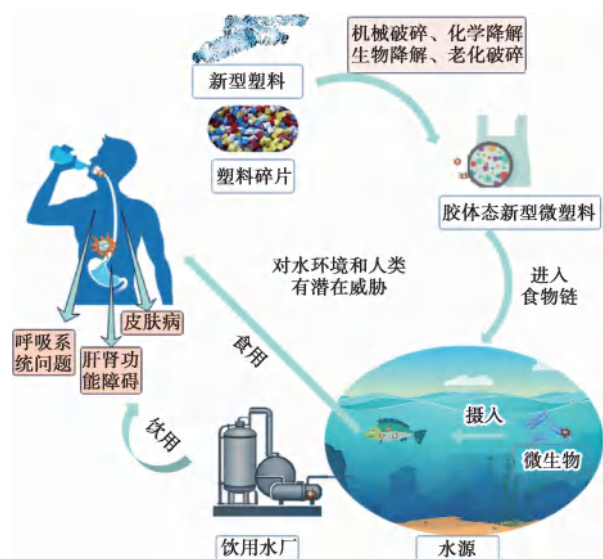


图 1 胶体态新型微塑料对环境和人类健康危害途径

Fig. 1 Pathways of CNMPs for Environmental and Human Health Hazards

对有机污染物的吸附和解吸能力更强,意味着 CNMPs 是更强的有机污染物载体。此外,进入饮用水的 CNMPs 可能改变溶解性有机质特性<sup>[76]</sup>,CNMPs 还会加剧湖泊沉积物的温室气体排放<sup>[77]</sup>。CNMPs 可吸附污染物并携带其穿透生物屏障,增强污染性的“木马效应”,这更会威胁饮用水安全性<sup>[78]</sup>。这些充分表明 CNMPs 在环境中的行为复杂,对生态系统和人类健康存在潜在影响。

目前,虽在生物标本中检测到微塑料,证实其与多种健康问题存在相关性,但明确二者因果关系仍困难重重。人体健康受多种复杂因素影响,微塑料环境暴露情况复杂,且现有研究多为相关性研究,难以排除其他因素干扰。因此,未来需开展更多长期、系统研究,运用更严谨的试验设计与分析方法,明确微塑料与健康问题的因果联系,防止误导公众。

## 3 饮用水中 CNMPs 的控制策略

现有饮用水处理工艺虽非专门针对微塑料设计,但其多级处理流程(如预处理、常规处理和深度处理)通过组合应用可部分适用于 CNMPs,减少其进入人体的潜在风险。表 3 总结了不同处理工艺对 CNMPs 的作用机制、去除效率及适用性。

### 3.1 预处理工艺

从水源地开始,就需对 CNMPs 加以控制。CNMPs 由于其特殊的尺寸性质,其在水体中的分布存在空间差异,受环境因素、水动力条件、湍流及热

分层变化影响,在水体中迁移、转化活跃。因此,合理选择进水位置,能够在一定程度上减少 CNMPs 的污染。同时,可在取水口设置多层滤网,通过物理拦截的方式,有效去除水体中的 CNMPs。进入水厂

后,CNMPs 会通过迁移、吸附、团聚等行为污染水质,即便初始浓度低也可能积累,威胁饮用水安全。目前,在预处理工艺阶段的预氧化、溶气气浮、溶胶-凝胶技术等能有效去除 CNMPs。

表 3 饮用水处理工艺对微塑料去除效果与 CNMPs 去除差异性分析

Tab. 3 Effectiveness and Variability of Drinking Water Treatment Processes for Removal of Conventional Microplastics and CNMPs

处理工艺	作用原理	微塑料去除率	优点	缺点	参考文献	
传统处理工艺	预氧化	通过氧化剂破坏 CNMPs 表面电荷及有机涂层,促进凝聚	20%~40%	操作简单、成本低	氧化剂残留可能引发二次污染	[56,79]
	混凝沉淀	利用混凝剂中和 CNMPs 表面负电荷,形成絮体后沉降	30%~60%	适应性强、工艺成熟	对小粒径 CNMPs 去除效果有限	[80-81]
	过滤	利用多孔粒状滤层截留水中悬浮杂质,包括 CNMPs	20%~90%	无化学添加	部分 CNMPs 可能从过滤介质逸出	[82-84]
深度处理工艺	高级氧化技术	强氧化自由基降解 CNMPs 为小分子或无机物	70%~85%	环境友好、降解彻底	能耗高、反应条件苛刻	[85-87]
	膜技术	物理截留 CNMPs,依赖膜材料选择性过滤	>90%	高效精准、无化学添加	成本高、膜污染风险高	[88-89]

预氧化通过改变 CNMPs 表面电荷、结构及 Zeta 电位,破坏其与吸附物的结合,降低吸附物分子量,促进有机涂层解吸,减少空间效应和静电势垒,增加微粒碰撞凝聚机会,提升后续混凝处理效果<sup>[90]</sup>。溶气气浮利用微小气泡吸附 CNMPs,提高混凝/絮凝去除效率,其效果与胶体颗粒湿润性相关。溶胶-凝胶法是一种用于处理微塑料的高效化学技术,可用于预沉淀池。Herbort 等<sup>[91]</sup>提出利用无机-有机复合硅胶,通过官能团与 CNMPs 结合形成包合物实现分离,对微塑料的分离效果优于颗粒活性炭,抗干扰性强,适用于多种水环境,为 CNMPs 去除提供了新思路。

### 3.2 常规处理工艺

#### 3.2.1 混凝沉淀

混凝沉淀工艺是针对胶体污染物,但 CNMPs 的独特性质导致其实际去除效率低于传统微塑料。首先,其粒径更小使其难以通过絮体网捕作用被截留;其次,其拥有高表面电荷可增强胶体稳定性,阻碍电荷中和与絮凝;最后,强迁移性使其易穿透滤层或随水流逃逸。因此,需通过工艺耦合(如预氧化+强化混凝)提升 CNMPs 去除效果。研究<sup>[92]</sup>表明,经水厂混凝沉淀后,传统微塑料的去除率为 60%~80%,粒径更小的 CNMPs 经混凝沉淀去除率仅为 30%~60%<sup>[93-94]</sup>,因其布朗运动剧烈、静电斥力强,常规铝盐、铁盐混凝剂难以有效吸附,去除率显著降低。预氧化能改善混凝效果,其作用机制因氧化剂种类和

CNMPs 类型而异。为提高沉淀去除 CNMPs 的效果,常采用强化混凝手段<sup>[95]</sup>。如预氧化处理、调节 pH、投加助凝剂、改良混凝剂等,促使 CNMPs 聚集成更大絮体,便于后续沉降或浮选去除<sup>[96]</sup>。

#### 3.2.2 过滤

在饮用水处理过程中,过滤去除 CNMPs 主要依靠物理截留和化学吸附。过滤介质凭借孔隙结构拦截微塑料颗粒,同时借助范德华力、静电力等将其吸附在表面或内部<sup>[43]</sup>。在对过滤工艺对 CNMPs 的去除效果研究<sup>[86,97]</sup>中发现,对粒径大于 10 μm 的 CNMPs 去除率超 90%,小于 10 μm 的去除率约为 35%。砂滤作为常见的过滤方式,对于粒径大于 5 μm 的 CNMPs 可实现有效截留,但针对 5 μm 以下的 CNMPs,其去除率仅为 14.8%<sup>[85]</sup>。

Wolff 等<sup>[98]</sup>表明快速砂滤的微塑料去除率为 99.2%±0.29%和 99.4%±0.15%。颗粒活性炭过滤对微塑料去除效果良好,去除率相较传统砂滤提升 17.2%~22.2%<sup>[94]</sup>。Wang 等<sup>[99]</sup>研究表明,生物炭过滤器对粒径 10 μm 的球状微塑料去除率可达 90%。总体而言,过滤工艺对 CNMPs 去除效果较好,但对小粒径 CNMPs 的去除能力仍需提高。

### 3.3 深度处理工艺

#### 3.3.1 高级氧化技术(AOPs)

AOPs 通过声、光、电、催化剂产生大量强氧化性自由基,作用于 CNMPs 时,促使其发生化学键断

裂、开环和电子转移等反应,最终转化为易降解的小分子或无机物<sup>[100]</sup>。AOPs 能高效降解胶体态有机污染物。常见技术包括电化学氧化、光催化、Fenton 氧化等。

电化学氧化利用电流驱动反应,对 CNMPs 的去除率可达 90% 以上,但存在电极材料成本高、能耗大等问题<sup>[101]</sup>;光催化将太阳能转化为化学能,环境友好,但光能利用效率低;Fenton 氧化法虽能产生强氧化性的羟基自由基,对微塑料在辐照 1 周后平均颗粒体积减少了 95%,但处理时间较长<sup>[102]</sup>。总体而言,AOPs 前景广阔,但面临自由基浓度低、反应时间长、成本高和二次污染等问题,需依托新材料和技术进步来推动应用。

### 3.3.2 膜技术

膜技术利用选择透过性膜,在水流推动下截留 CNMPs。其具有在常温下分离、无相变、能耗低、分离选择性高、装置简单易操作等优点,对 CNMPs 处理和富集效果显著,大多数膜过滤去除微塑料效率超 90%<sup>[103-104]</sup>。其中,纳滤和反渗透可高效去除 CNMPs,但会截留离子和水溶性盐,影响水质,且能耗高<sup>[105]</sup>;微滤和超滤作为低压液固分离技术,广泛应用于饮用水净化,但存在膜材料成本高、易污染等问题<sup>[55]</sup>。

### 3.3.3 吸附法

吸附法依靠多孔固体吸附剂,如活性炭、沸石和粘土等,凭借高孔隙率、大比表面积和丰富的表面官能团,吸附 CNMPs 实现分离<sup>[106]</sup>。吸附过程包括物理吸附和化学吸附,该方法成本低、效果好、在水厂中应用广泛。其中,物理吸附是依靠吸附剂与 CNMPs 之间的范德华力、氢键等分子间作用力实现的吸附,其过程可逆,吸附质结构不会发生改变,解吸相对容易,且对吸附对象无严格选择性;化学吸附则是通过吸附剂与 CNMPs 之间的电子交换或转移等化学作用实现的吸附,通常会导致吸附质结构发生不可逆变化,解吸难度大,且对特定物质具有选择性。在饮用水处理中,物理吸附和化学吸附通常同时发生。

常规处理工艺虽历经长期发展,然而因其并非专门针对 CNMPs 设计,在去除 CNMPs 方面存在固有缺陷,亟待改进以提升去除效果。预处理阶段,可从水源地着手,通过合理选择进水位置、设置滤网减少 CNMPs 污染。CNMPs 的胶体特性导致其在混凝

沉淀中的去除效率下降,同时其高迁移性也增加了在管网中的二次释放风险。此外,与传统微塑料相比,CNMPs 的胶体特性使其在混凝沉淀阶段表现出粒径依赖性,大粒径胶体( $>1\ \mu\text{m}$ )因混凝剂有效作用而易于去除,小粒径胶体( $<1\ \mu\text{m}$ )则因尺寸效应难以捕获。同时,CNMPs 与有机物的复合污染可能干扰混凝剂作用,降低实际去除效果。传统过滤对大尺寸 CNMPs 的去除效果较好,但不能有效去除小粒径 CNMPs,可通过强化过滤过程并结合预氧化和混凝法,提高对 CNMPs 的去除效率。深度处理工艺能够高效去除 $<10\ \mu\text{m}$  的 CNMPs,有效弥补了常规饮用水处理工艺在这方面的短板。

## 4 结论与展望

本文综述了饮用水中 CNMPs 的定义、形成、检测和控制技术。由于 CNMPs 具有小尺寸、亲疏水性、静电力等性质,使其在饮用水中稳定存在,并在饮用水处理流程中不断迁移,可能会通过饮用在人体中不断积累从而对人体健康构成潜在威胁。目前,通过水源地控制、预处理工艺及常规处理工艺对粒径小于 $10\ \mu\text{m}$  的 CNMPs 去除率约为 35%。深度处理工艺对其去除率在 90% 以上,但工艺成本较高,未来研究需要聚焦以下几点。

(1)目前,大多数研究集中在传统微塑料的污染程度、来源和归趋,而对 CNMPs 的关注不足。然而,随着新型塑料使用量逐年增加,其进入水体形成 CNMPs 的风险也在上升。CNMPs 的污染问题日益突出,其环境影响和解决方案仍不明确。因此,亟需加强对 CNMPs 的研究,明确其在饮用水中的迁移规律、污染影响机制以及与其他污染物的复合污染效应。同时,需制定 CNMPs 特异性检测标准,解决现有技术对胶体态颗粒的识别盲区;量化 CNMPs 与污染物的复合毒性,建立新型塑料化学结构(如生物塑料酯基含量、再生塑料链断裂程度)与生物毒性的关联模型;开发适配 CNMPs 的低成本高效处理工艺。

(2)通过开发新型材料、优化处理技术来提高去除效率,以提高饮用水的安全性。一方面,对活性炭、沸石等传统吸附剂进行改性,增加其表面活性位点与特异性吸附基团,以提升对 CNMPs 的吸附能力;另一方面,探索如金属有机框架、共价有机骨架材料等新型吸附材料,利用其独特结构实现高效吸

附。在膜技术领域,研发新型抗污染膜材料,如在膜表面接枝亲水性聚合物,降低膜污染风险,延长膜使用寿命,提高对 CNMPs 的截留效率。

(3)制定相关政策和行业规范,推动新型塑料更合理利用和回收,从而降低 CNMPs 的污染风险。同时,关注饮用水中新型微塑料的形成机制及共迁移作用,通过深入研究迁移机制,使研究人员和行业可以设计更有效的生物塑料,减少 CNMPs 的形成及其对饮用水的潜在影响。

### 参考文献

- [ 1 ] Hale R C, Seeley M E, La Guardia M J, et al. A global perspective on microplastics [ J ]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2020, 125: e2018JC014719. DOI: 10.1029/2018JC014719.
- [ 2 ] Goel V, Luthra P, Kapur G S, et al. Biodegradable/bioplastics: Myths and realities [ J ]. *Journal of Polymers and the Environment*, 2021, 29( 10 ): 3079–3104.
- [ 3 ] 张海珊. 基于淀粉和纤维素的共价自适应网络的制备与性能研究 [ D ]. 广州: 华南理工大学, 2022.  
Zhang H S. Preparation and properties of covalent adaptive networks based on starch and cellulose [ D ]. Guangzhou: South China University of Technology, 2022.
- [ 4 ] Lahl U, Zeschmar-Lahl B. Material recycling of plastics-A challenge for sustainability [ J ]. *Sustainability*, 2024, 16( 15 ): 6630. DOI: 10.3390/su16156630.
- [ 5 ] Zhang K, Shi H H, Peng J P, et al. Microplastic pollution in China's inland water systems: A review of findings, methods, characteristics, effects, and management [ J ]. *Science of the Total Environment*, 2018, 630: 1641–1653. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.02.300.
- [ 6 ] 赵宇彤, 史俊, 刘栓, 等. 水中微塑料的常规与新兴去除工艺的研究进展 [ J ]. *净水技术*, 2023, 42( s1 ): 32–39, 85.  
Zhao Y T, Shi J, Liu S, et al. Research advances in conventional and emerging processes for removing microplastics from water [ J ]. *Water Purification Technology*, 2023, 42( s1 ): 32–39, 85.
- [ 7 ] Chen L, Bi T T, Lizundia E, et al. Biomass waste-assisted micro ( nano ) plastics capture, utilization, and storage for sustainable water remediation [ J ]. *The Innovation*, 2024, 5( 4 ): 100655. DOI: 10.1016/j.xinn.2024.100655.
- [ 8 ] World Health Organization. Microplastics in drinking-water [ R/OL ]. 2019. <https://www.who.int/publications/i/item/9789241516198>.
- [ 9 ] Ali W, Ali H, Gillani S, et al. Polylactic acid synthesis, biodegradability, conversion to microplastics and toxicity: A review [ J ]. *Environmental Chemistry Letters*, 2023, 21( 3 ): 1761–1786.
- [ 10 ] Fojt J, David J, Prikryl R, et al. A critical review of the overlooked challenge of determining micro-bioplastics in soil [ J ]. *Science of the Total Environment*, 2020, 745: 140975. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140975.
- [ 11 ] Wang Y, Ding K Q, Ren L X, et al. Biodegradable microplastics: A review on the interaction with pollutants and influence to organisms [ J ]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2022, 108( 6 ): 1006–1012.
- [ 12 ] 姜昊, 颜菲菲, 万继腾, 等. 水环境中生物可降解微塑料与有机污染物的相互作用研究进展 [ J ]. *环境化学*, 2025, 44( 8 ): 2763–2773.  
Jiang H, Yan F F, Wan J T, et al. Research progress on interaction of biodegradable microplastics with organic pollutants in the aquatic environment [ J ]. *Environmental Chemistry*, 2025, 44( 8 ): 2763–2773.
- [ 13 ] Lambert S, Wagner M. Environmental performance of bio-based and biodegradable plastics: The road ahead [ J ]. *Chemical Society Reviews*, 2017, 46( 22 ): 6855–6871.
- [ 14 ] Prajapati R, Kohli K, Maity S K, et al. Recovery and recycling of polymeric and plastic materials [ M ]. Singapore: Springer, 2021: 15–41.
- [ 15 ] Astrup T, Møller J, Fruergaard T. Incineration and co-combustion of waste: Accounting of greenhouse gases and global warming contributions [ J ]. *Waste Management & Research: the Journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association*, 2009, 27( 8 ): 789–799.
- [ 16 ] Wu G Q, Li J, Xu Z M. Triboelectrostatic separation for granular plastic waste recycling: A review [ J ]. *Waste Management*, 2013, 33( 3 ): 585–597.
- [ 17 ] Rosenboom J G, Langer R, Traverso G. Bioplastics for a circular economy [ J ]. *Nature Reviews Materials*, 2022, 7( 2 ): 117–137.
- [ 18 ] Hahladakis J N, Velis C A, Weber R, et al. An overview of chemical additives present in plastics: Migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal and recycling [ J ]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, 344: 179–199. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2017.10.014.
- [ 19 ] González-Pleiter M, Tamayo-Belda M, Pulido-Reyes G, et al. Secondary nanoplastics released from a biodegradable microplastic severely impact freshwater environments [ J ]. *Environmental Science: Nano*, 2019, 6( 5 ): 1382–1392.
- [ 20 ] 郝京诚. 胶体与界面化学 [ J ]. *物理化学学报*, 2020, 36( 10 ): 10–12.  
Hao J C. Colloidal and interfacial chemistry [ J ]. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 2020, 36( 10 ): 10–12.
- [ 21 ] 黄建军, 张晓晴, 赵鹏, 等. 饮用水中胶体态污染物的研究进展 [ J ]. *环境化学*, 2024, 43( 5 ): 1507–1517.  
Huang J J, Zhang X Q, Zhao P, et al. Research progress on

- colloidal pollutants in drinking water [J]. *Environmental Chemistry*, 2024, 43(5): 1507–1517.
- [22] Shruti V C, Kutralam-Muniasamy G. Bioplastics: Missing link in the era of microplastics [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 697: 134139. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.134139.
- [23] Lackner M, Mukherjee A, Koller M. What are "bioplastics"? defining renewability, biosynthesis, biodegradability, and biocompatibility [J]. *Polymers*, 2023, 15(24): 4695. DOI: 10.3390/polym15244695.
- [24] Islam M, Xayachak T, Haque N, et al. Impact of bioplastics on environment from its production to end-of-life [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2024, 188: 151–66. DOI: 10.1016/j.psep.2024.05.113.
- [25] Thiruchelvi R, Das A, Sikdar E. Bioplastics as better alternative to petro plastic [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2020: 225428190. DOI:10.1016/j.matpr.2020.07.176.
- [26] Wei X F, Capezza A J, Cui Y X, et al. Millions of microplastics released from a biodegradable polymer during biodegradation/enzymatic hydrolysis [J]. *Water Research*, 2022, 211: 118068. DOI: 10.1016/j.watres.2022.118068.
- [27] Caffero L M, De Angelis D, Tuccinardi L, et al. Current state of chemical recycling of plastic waste: A focus on the Italian experience [J]. *Sustainability*, 2025, 17(3): 1–18.
- [28] Morici E, Carroccio S C, Bruno E, et al. Recycled (bio) plastics and (bio) plastic composites: A trade opportunity in a green future [J]. *Polymers*, 2022, 14(10): 2038. DOI: 10.3390/polym14102038.
- [29] Suzuki G, Uchida N, Tanaka K, et al. Global discharge of microplastics from mechanical recycling of plastic waste [J]. *Environmental Pollution*, 2024, 348: 123855. DOI: 10.1016/j.envpol.2024.123855.
- [30] Viaroli S, Lancia M, Re V. Microplastics contamination of groundwater: Current evidence and future perspectives. A review [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 824: 153851. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.153851.
- [31] Adnan M, Siddiqui A J, Ashraf S A, et al. Characterization and process optimization for enhanced production of polyhydroxybutyrate (PHB)-based biodegradable polymer from bacillus flexus isolated from municipal solid waste landfill site [J]. *Polymers*, 2023, 15(6): 1407. DOI: 10.3390/polym15061407.
- [32] Monte C D, Locritani M, Merlino S, et al. An in situ experiment to evaluate the aging and degradation phenomena induced by marine environment conditions on commercial plastic granules [J]. *Polymers*, 2022, 14(6): 1111. DOI: 10.3390/polym14061111.
- [33] Wang Y Z, Yang R L, Xu G Q, et al. Zn-catalyzed coordination-insertion depolymerization strategy of poly(3-hydroxybutyrate) under bulk conditions [J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2023, 214: 110413. DOI: 10.1016/j.polydegradstab.2023.110413.
- [34] Villalobos N F, Costa M C, Marín-Beltrán I. A community of marine bacteria with potential to biodegrade petroleum-based and biobased microplastics [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2022, 185: 114251. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2022.114251.
- [35] Vithanage M, Ramanayaka S, Hasinthara S, et al. Compost as a carrier for microplastics and plastic-bound toxic metals into agroecosystems [J]. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 2021, 24: 100297. DOI: 10.1016/j.coesh.2021.100297.
- [36] 王晓庆, 牛清雨, 李鹏浩, 等. 淡水水体中微塑料污染现状、检测方法及毒性研究进展 [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.
- [37] 周添红, 张佳倩, 闵芮, 等. 刘家峡水库微塑料的赋存特征及其风险评估 [J]. *中国环境科学*, 2023, 43(11): 6007–6015.  
Zhou T H, Zhang J Q, Min R, et al. Occurrence characteristics and risk assessment of microplastics in Liujiaxia Reservoir [J]. *China Environmental Science*, 2023, 43(11): 6007–6015.
- [38] 仇付国, 梁安祺, 童诗雨, 等. 雨水径流中微塑料的赋存规律探究 [J]. *环境工程*, 2024, 42(7): 106–112.  
Qiu F G, Liang A Q, Tong S Y, et al. Investigation of occurrence regularity of microplastics in rainwater runoff [J]. *Environmental Engineering*, 2024, 42(7): 106–112.
- [39] 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.
- [40] Zhang Q J, Liu T, Liu L, et al. Distribution and sedimentation of microplastics in Taihu Lake [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 795: 148745. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.148745.
- [41] Zhang W W, Zhang S F, Zhao Q, et al. Spatio-temporal distribution of plastic and microplastic debris in the surface water of the Bohai Sea, China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, 158: 111343. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2020.111343.
- [42] Zuo L Z, Li H X, Lin L, et al. Sorption and desorption of phenanthrene on biodegradable poly (butylene adipate co-terephthalate) microplastics [J]. *Chemosphere*, 2019, 215: 25–32. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2018.09.173.
- [43] Zheng Y F, Li J X, Cao W, et al. Distribution characteristics of microplastics in the seawater and sediment: A case study in Jiaozhou Bay, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 674: 27–35. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.04.008.
- [44] 李湘湖, 文少白, 张军. 饮用水中微塑料的赋存特征及风险评估研究进展 [J]. *环境化学*, 2025, 44(4): 1310–1319.

- Li X X, Wen S B, Zhang J. Occurrence characteristics and risk assessment of microplastics in drinking water[J]. *Environmental Chemistry*, 2025, 44(4): 1310–1319.
- [45] Guo Y P, Shao W F, Zhao W G, et al. The occurrence, distribution, environmental effects, and interactions of microplastics and antibiotics in the aquatic environment of China [J]. *Water*, 2024, 16(10): 1435. DOI: 10.3390/w16101435.
- [46] 辛惠娟, 吴佳俊, 赵伟高. 饮用水处理中过滤去除微塑料的研究进展[J]. *环境科学*, 2025, 46(9): 5951–5960.  
Xin H J, Wu J J, Zhao W G. Research progress on removal of microplastics by filtration in drinking water treatment [J]. *Environmental Science*, 2025, 46(9): 5951–5960.
- [47] 韩沂伶, 吴东海. 水环境中微塑料的赋存特征及控制技术研究进展[J]. *环境科学与技术*, 2021, 44(9): 7–16.  
Han Y L, Wu D H. Review on recent progress in microplastic pollution in aquatic environment and its removal technologies [J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 44(9): 7–16.
- [48] 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 X L, Zhang D Y, Pan X L. Pollution and characterization of microplastics in the sediments of the Yellow River[J]. *Arid Zone Research*, 2020, 37(3): 790–798.
- [49] 李思敏, 赵瑞雪, 孟鑫, 等. 漳河邯郸段水体微塑料分布特征及影响因素[J]. *环境化学*, 2025, 44(4): 1155–1168.  
Li S M, Zhao R X, Meng X, et al. Characteristics of microplastic distribution and influencing factors in the water body of Handan section of Zhanghe River [J]. *Environmental Chemistry*, 2025, 44(4): 1155–1168.
- [50] Wang W F, 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.
- [51] 李常军. 中国南海和东印度洋水体微塑料赋存、源汇和生态风险的研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2022.  
Li C J. A study on the distribution, source to sink and ecological risk assessment of microplastics in water bodies of the South China Sea and Eastern Indian Ocean[D]. Shanghai: East China Normal University, 2022.
- [52] 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.
- [53] 靳格格, 李垒, 吴昊远, 等. 密云水库水体微塑料的垂向分布特征[J]. *环境科学*, 2026, 47(2): 1151–1159.  
Jin G G, Li L, Wu H Y, et al. Vertical distribution characteristics of microplastics in Miyun Reservoir [J]. *Environmental Science*, 2026, 47(2): 1151–1159.
- [54] Lee H, Kim S, Sin A, et al. Pretreatment methods for monitoring microplastics in soil and freshwater sediment samples: A comprehensive review[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 871: 161718. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.161718.
- [55] 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.
- [56] Kumar A, Indhur R, Bux F, et al. Recent advances in mechanistic insights into microplastics mitigation strategies via emerging advanced oxidation processes: Legislation, challenges, and future direction [J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 957: 177150. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.177150.
- [57] 李珊, 张岚, 陈永艳, 等. 饮用水中微塑料检测技术研究进展[J]. *净水技术*, 2019, 38(4): 1–8.  
Li S, Zhang L, Chen Y Y, et al. Research progress on detection technology of microplastics in drinking water [J]. *Water Purification Technology*, 2019, 38(4): 1–8.
- [58] 周智勇, 卢帅良, 马涛, 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.
- [59] 江竹莲, 陈雪煜, 金宪丹. 热裂解-气质联用技术测试环境土壤中的微塑料[J]. *环境化学*, 2022, 41(5): 1824–1826.  
Jiang Z L, Chen X Y, Jin X D. Determination of microplastics in soil by pyrolyzer-GC-MS [J]. *Environmental Chemistry*, 2022, 41(5): 1824–1826.
- [60] Ivleva N P. Chemical analysis of microplastics and nanoplastics: Challenges, advanced methods, and perspectives [J]. *Chemical Reviews*, 2021, 121(19): 11886–11936.
- [61] Liu M Y, Liu H M, Yang K R, et al. Advancing the understanding of microplastic weathering: Insights from a novel polarized light scattering approach [J]. *Environmental Science & Technology*, 2024, 58(42): 19004–19015.
- [62] Huang W X, Chen J J, Xiong H, et al. Improved neural networks for the classification of microplastics via inferior quality Raman spectra [J]. *Talanta*, 2025, 289: 127756. DOI: 10.1016/j.talanta.2025.127756.
- [63] Chandran P J I, Veerasingam S. Laser direct infrared spectroscopy: A cutting-edge approach to microplastic detection in environmental samples [J]. *Talanta*, 2025, 284: 127284. DOI: 10.1016/j.talanta.2024.127284.
- [64] Tian X, Beén F, Bäuerlein P S. Quantum cascade laser imaging (LDIR) and machine learning for the identification of environmentally exposed microplastics and polymers [J]. *Environmental Research*, 2022, 212: 113569. DOI: 10.1016/j.envres.2022.113569.

- [65] Sridharan S, Kumar M, Saha M, et al. The polymers and their additives in particulate plastics; What makes them hazardous to the fauna? [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 824: 153828. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.153828.
- [66] Idrees M, Batool S, Sufyan J M, et al. Adsorption and electrochemical facet of polymer precursor to yield mesoporous carbon ceramic [J]. *Separation and Purification Technology*, 2021, 275: 119199. DOI: 10.1016/j.seppur.2021.119199.
- [67] Yaseen M, Humayun M, Khan A, et al. Photo-assisted removal of rhodamine B and nile blue dyes from water using CuO-SiO<sub>2</sub> composite[J]. *Molecules*, 2022, 27(16): 5343. DOI: 10.3390/molecules27165343.
- [68] 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.
- [69] Batool S, Idrees M, Ahmad M, et al. Design and characterization of a biomass template/SnO<sub>2</sub> nanocomposite for enhanced adsorption of 2,4-dichlorophenol[J]. *Environmental Research*, 2020, 181: 108955. DOI: 10.1016/j.envres.2019.108955.
- [70] 赵伟高, 张晓晴, 田一梅, 等. 饮用水中微纳塑料的“胶体泵效应”研究进展[J]. *环境科学*, 2023, 44(10): 5861–5869.  
Zhao W G, Zhang X Q, Tian Y M, et al. Research progress on colloid pump effect of micro-and nanoplastics in drinking water [J]. *Environmental Science*, 2023, 44(10): 5861–5869.
- [71] Tchounwou P B, Yedjou C G, Patlolla A K, et al. Heavy metal toxicity and the environment[M]. Basel: Springer, 2012: 133–164.
- [72] 曲久辉, 贺泓, 刘会娟. 典型环境微界面及其对污染物环境行为的影响[J]. *环境科学学报*, 2009, 29(1): 2–10.  
Qu J H, He H, Liu H J. Typical environmental micro-interfaces and its effect on environmental behaviors of pollutants[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29(1): 2–10.
- [73] Liu G Z, Zhu Z L, Yang Y X, et al. Sorption behavior and mechanism of hydrophilic organic chemicals to virgin and aged microplastics in freshwater and seawater [J]. *Environmental Pollution*, 2019, 246: 26–33. DOI: 10.1016/j.envpol.2018.11.100.
- [74] Wan T, Lu S H, Cheng W, et al. A spectroscopic and theoretical investigation of interaction mechanisms of tetracycline and polystyrene nanospheres under different conditions [J]. *Environmental Pollution*, 2019, 249: 398–405. DOI: 10.1016/j.envpol.2019.03.049.
- [75] Hartmann N B, Rist S, Bodin J, et al. Microplastics as vectors for environmental contaminants: Exploring sorption, desorption, and transfer to biota[J]. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 2017, 13(3): 488–493.
- [76] Chen M, Zhao X W, Wu D M, et al. Addition of biodegradable microplastics alters the quantity and chemodiversity of dissolved organic matter in latosol[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 816: 151960. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.151960.
- [77] He Y Y, Li Y M, Yang X L, et al. Biodegradable microplastics aggravate greenhouse gas emissions from urban lake sediments more severely than conventional microplastics [J]. *Water Research*, 2024, 266: 122334. DOI: 10.1016/j.watres.2024.122334.
- [78] 赵伟高, 田一梅, 赵鹏, 等. 淡水环境中微塑料与重金属的“木马效应”研究进展[J]. *环境科学*, 2023, 44(3): 1244–1257.  
Zhao W G, Tian Y M, Zhao P, et al. Research progress on Trojan-horse effect of microplastics and heavy metals in freshwater environment[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(3): 1244–1257.
- [79] Krishnan R Y, Manikandan S, Subbaiya R, et al. Recent approaches and advanced wastewater treatment technologies for mitigating emerging microplastics contamination—A critical review[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 858: 159681. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.159681.
- [80] Morin-Crini N, Lichtfouse E, Fourmentin M, et al. Removal of emerging contaminants from wastewater using advanced treatments. A review [J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2022, 20(2): 1333–1375.
- [81] Liu S, Ding H J, Song Y Q, et al. The potential risks posed by micro-nanoplastics to the safety of disinfected drinking water[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, 450: 131089. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2023.131089.
- [82] Hooriabad Saboor F, Hadian-Ghazvini S, Torkashvand M. Microplastics in aquatic environments: Recent advances in separation techniques [J]. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, 2022, 66(2): 167–181.
- [83] Sharifi H, Movahedian Attar H, Bina B. Occurrence and removal of microplastics in a municipal wastewater treatment plant with conventional activated sludge process: A case study in Isfahan, Iran[J]. *Environmental Health Engineering and Management*, 2023, 10(1): 59–66.
- [84] 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.  
Xu L, Wang Z F. Occurrence and removal of microplastics in a water treatment plant[J]. *Water Purification Technology*, 2020, 39(7): 109–113, 120.
- [85] Gonçalves J O, Farias B S, Rios E C, et al. Advances in chitosan-based materials for application in catalysis and adsorption of emerging contaminants[J]. *Sustainability*, 2024, 16(19): 8321. DOI: 10.3390/su16198321.
- [86] Elgarahy A M, Eloffy M G, Priya A K, et al. A review on the

- synergistic efficacy of sonication-assisted water treatment process with special attention given to microplastics [J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2024, 206: 524–552. DOI: 10.1016/j.cherd.2024.05.027.
- [87] Rodríguez-Narvaez O M, Goonetilleke A, Perez L, et al. Engineered technologies for the separation and degradation of microplastics in water: A review [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 414: 128692. DOI: 10.1016/j.cej.2021.128692.
- [88] Tarigan M, Raji S, Al-Fatesh H, et al. The occurrence of micropollutants in the aquatic environment and technologies for their removal [J]. *Processes*, 2025, 13(3): 843. DOI: 10.3390/pr13030843.
- [89] Luo Y L, Guo W S, Ngo H H, et al. A review on the occurrence of micropollutants in the aquatic environment and their fate and removal during wastewater treatment [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 473/474: 619–641. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2013.12.065.
- [90] 张丽丽, 庄媛, 胡春, 等. 多相催化技术的固液微界面调控原理及应用进展[J]. *环境科学学报*, 2020, 40(12): 4225–4233.  
Zhang L L, Zhuang Y, Hu C, et al. Control mechanism of solid-liquid micro-interface and application progress for heterogeneous catalysis technology [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, 40(12): 4225–4233.
- [91] Herbert A F, Sturm M T, Fiedler S, et al. Alkoxy-silyl induced agglomeration: A new approach for the sustainable removal of microplastic from aquatic systems [J]. *Journal of Polymers and the Environment*, 2018, 26(11): 4258–4270.
- [92] Wang Z F, 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.
- [93] 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.
- [94] Perren W, Wojtasik A, Cai Q. Removal of microbeads from wastewater using electrocoagulation [J]. *ACS Omega*, 2018, 3(3): 3357–3364.
- [95] Ma B W, Xue W J, Hu C Z, et al. Characteristics of microplastic removal via coagulation and ultrafiltration during drinking water treatment [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 359: 159–167. DOI: 10.1016/j.cej.2018.11.155.
- [96] Dey T K, Uddin M E, Jamal M. Detection and removal of microplastics in wastewater: Evolution and impact [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(14): 16925–16947.
- [97] 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.
- [98] Wolff S, Weber F, Kerpen J, et al. Elimination of microplastics by downstream sand filters in wastewater treatment [J]. *Water*, 2021, 13(1): 33. DOI: 10.3390/w13010033.
- [99] 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.
- [100] Giwa A, Yusuf A, Balogun H A, et al. Recent advances in advanced oxidation processes for removal of contaminants from water: A comprehensive review [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2021, 146: 220–256. DOI: 10.1016/j.psep.2020.08.015.
- [101] 王一茹, 宋小三, 王三反, 等. 太阳能电絮凝技术在水处理中的研究进展 [J]. *化工进展*, 2021, 40(s2): 373–379.  
Wang Y R, Song X S, Wang S F, et al. Research progress of solar powered electrocoagulation technology in water treatment [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2021, 40(s2): 373–379.
- [102] Piazza V, Uheida A, Gambardella C, et al. Ecosafety screening of photo-Fenton process for the degradation of microplastics in water [J]. *Frontiers in Marine Science*, 2022, 8: 791431. DOI: 10.3389/fmars.2021.791431.
- [103] Kaile N, Lindivat M, Elio J, et al. Preliminary results from detection of microplastics in liquid samples using flow cytometry [J]. *Frontiers in Marine Science*, 2020, 7: 552688. DOI: 10.3389/fmars.2020.552688.
- [104] Hebner T S, Maurer-Jones M A. Characterizing microplastic size and morphology of photodegraded polymers placed in simulated moving water conditions [J]. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2020, 22(2): 398–407.
- [105] Das T K, Basak S, Ganguly S. 2D nanomaterial for microplastic removal: A critical review [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 492: 152451. DOI: 10.1016/j.cej.2024.152451.
- [106] 娜扎发提·穆罕麦提江, 陈颖明, 闵芳芳, 等. 不同类型生物炭对水体中微塑料的吸附性能 [J]. *环境化学*, 2021, 40(11): 3368–3378.  
Muhanmaitjiang N, Chen H M, Min F F, et al. Sorption properties of microplastics in water by different types of biochar [J]. *Environmental Chemistry*, 2021, 40(11): 3368–3378.