

净水技术前沿与热点综述

张立, 孙旭超, 李朝宇, 等. 全氟化合物在污水处理中的赋存特征及去除技术研究进展[J]. 净水技术, 2025, 44(8): 9-20.

ZHANG L, SUN X C, LI C Y, et al. Research progress of occurrence characteristics and removal technology of perfluorinated compounds in wastewater treatment [J]. Water Purification Technology, 2025, 44(8): 9-20.

全氟化合物在污水处理中的赋存特征及去除技术研究进展

张立¹, 孙旭超², 李朝宇³, 王思³, 刘海燕¹, 万年红¹, 李首道⁴, 姜宇^{3,*}

(1. 中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北武汉 430000; 2. 武汉理工大学资源与环境工程学院, 湖北武汉 430070; 3. 武汉理工大学土木工程与建筑学院, 湖北武汉 430070; 4. 岛津企业管理(中国)有限公司武汉分公司, 湖北武汉 430060)

摘要 【目的】全氟化合物(perfluorinated compounds, PFCs)因其化学稳定性及疏油疏水特性,在自然水体和污水处理厂各个环节中均被检测出。PFCs具有生物毒性,即使低浓度下也会对环境 and 生物体造成潜在危害。研究旨在探讨PFCs的污染现状及其赋存特征,系统评估其在污水处理厂不同处理单元及典型PFCs去除技术的处理效果,为PFCs的污染控制提供科学依据。【方法】通过系统分析现有文献,评估PFCs在污水处理厂各处理单元中的去除效率,并结合吸附法、膜滤法、湿地植物修复法及高级氧化法等典型去除技术的应用案例,比较其对短链与长链PFCs的去除效果与限制条件。【结果】污水处理厂进水中PFCs以短链为主;一级处理工艺对PFCs去除率较低,消毒工艺甚至可能使PFCs浓度增加;二级处理工艺通过污泥吸附去除部分PFCs,短链PFCs在生物处理单元中不易被污泥吸附及富集,且部分长链PFCs在处理中转化为短链PFCs,进一步降低短链PFCs的去除效率。相比之下,典型处理技术对PFCs的去除效果显著优于常规处理工艺,但对短链PFCs的去除效率仍低于长链PFCs。【结论】总体而言,常规污水处理工艺对PFCs的去除受限,且长链PFCs的转化则进一步增加了短链PFCs的环境暴露风险。典型PFCs去除技术具有显著优势,但其实际应用受制于经济成本和技术成熟度。因此,未来应注重开发针对短链PFCs的高效去除技术,并探索多种方法的耦合联用,同时加强对PFCs迁移与降解机制的研究,实现全生命周期的污染控制。

关键词 全氟化合物 污水处理 时空分布 活性污泥 污水处理技术

中图分类号: X703 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-0177(2025)08-0009-12

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.08.002

Research Progress of Occurrence Characteristics and Removal Technology of Perfluorinated Compounds in Wastewater Treatment

ZHANG Li¹, SUN Xuchao², LI Chaoyu³, WANG Si³, LIU Haiyan¹, WAN Nianhong¹, LI Shoudao⁴, JIANG Yu^{3,*}

(1. Central & Southern China Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Wuhan 430000, China;

2. School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

3. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

4. Shimadzu <China> Co., Ltd., Wuhan Branch, Wuhan 430060, China)

Abstract [Objective] Perfluorinated compounds (PFCs), due to their chemical stability and hydrophobic/oleophobic properties, have been detected in natural water bodies and at various stages of wastewater treatment plants (WWTPs). PFCs exhibit biotoxicity and may pose potential hazards to the environment and organisms even at low concentrations. This study aims to investigate the current pollution status and occurrence characteristics of PFCs, systematically evaluate their removal efficiencies in different treatment units of

[收稿日期] 2024-08-26

[基金项目] 武汉市知识创新专项曙光计划资助项目(2023020201020327);湖北省住房和城乡建设科学技术计划项目(KY-S-S-2023-006)

[作者简介] 张立(1995—),女,工程师,主要从事水处理工艺技术研究等工作,E-mail:895766617@qq.com。

[通信作者] 姜宇(1991—),女,特任研究员,研究方向为污水处理与资源化,E-mail:yujiang@whut.edu.cn。

WWTPs and typical PFCs removal technologies, provide a scientific basis for PFC pollution control. [**Methods**] By systematically analyzing existing literature, the study evaluates the removal efficiency of PFCs in different treatment units of WWTPs and compares the effectiveness and limitations of typical removal technologies such as adsorption, membrane filtration, wetland plant remediation and advanced oxidation technology in addressing short- and long-chain PFCs. [**Results**] PFCs in the influent of WWTPs are mainly short-chain compounds. Primary treatment processes have low removal rates for PFCs, and disinfection processes may even increase PFC concentrations. Secondary treatment processes can remove certain amounts of PFCs through sludge adsorption. Compared to long-chain PFCs, short-chain PFCs are less likely to be adsorbed and accumulated in the sludge phase during biological treatment units, and some long-chain PFCs may transform into short-chain PFCs during treatment processes; therefore, the removal rate of short-chain PFCs is lower than that of long-chain PFCs. In contrast, typical PFCs removal technologies demonstrate significantly better performance in treating PFCs compared to conventional treatment processes, but the removal efficiency for short-chain PFCs is still lower than that for long-chain PFCs. [**Conclusion**] Overall, conventional wastewater treatment processes are limited to removing PFCs, and the transformation of long-chain PFCs further increases the environmental exposure risk of short-chain PFCs. Although typical PFCs removal technologies have significant advantages, their practical application is constrained by economic costs and technological maturity. Therefore, future efforts should focus on developing efficient removal technologies targeting short-chain PFCs, exploring the combined use of multiple method, and strengthen research on the migration and degradation mechanisms of PFCs to achieve full lifecycle pollution control.

Keywords perfluorinated compounds (PFCs) wastewater treatment spatiotemporal distribution activated sludge wastewater treatment technology

全氟化合物(perfluorinated compounds, PFCs)是一类疏油疏水的有机化合物,具有高表面活性、高化学稳定性的特点。PFCs 已被广泛应用于生产和生活中,如作为洗涤剂、洗发香波、泡沫灭火剂和农药等产品的组成成分。PFCs 对人类和野生动物的生殖、发育和内分泌系统均构成潜在威胁,且在动物体内的肌肉组织、肝脏中富集。随着 PFCs 的大规模应用,其生物累积性与生物毒性的特点被探明,该类污染物逐渐受到国内外的广泛关注。2009 年及 2019 年,全氟辛烷磺酸(perfluorooctane sulfonate, PFOS)及全氟辛酸(perfluorooctanoic acid, PFOA)分别作为“限制或禁止持久性有机污染物”被列入《斯德哥尔摩公约》。我国在 2023 年 3 月 1 日起实施的《重点管控新污染物清单》将 PFOS 类、PFOA 类和全氟己基磺酸类 PFCs 列入重点管控类型。鉴于 PFCs 的生物毒性以及当前全球政策,有必要监测和评估其在环境中的赋存情况,并采取有效措施限制和减少 PFCs 的使用。

2022 年 5 月,国务院办公厅印发了《新污染物治理行动方案》,提出了深化新污染物末端治理的指导意见。城市污水处理厂作为 PFCs 等新污染物的末端处理环节,目前的工艺设计主要针对 COD、氮、磷、悬浮固体等常规污染物的去除。另外,污泥可吸附包括 PFCs 在内的多种污染物,发生复杂的

生化反应并作为剩余污泥再利用,因此,同样是 PFCs 富集的载体。本综述根据目前研究进展,总结了 PFCs 在污水和污泥中的分布特点,分析了污水处理厂现有工艺对 PFCs 的去除情况。基于此,系统总结了针对 PFCs 的污水厂处理工艺,探讨了其原理和去除效果,进一步对比了长链及短链 PFCs 的去除差异,以期为 PFCs 在环境中减量和污水处理针对 PFCs 去除提供借鉴。

1 PFCs 性质及其在环境中的分布现状

1.1 PFCs 化学性质

PFCs 是一类由碳氢化合物碳链上氢原子被氟原子、羧酸盐或磺酸盐官能团所取代后形成的化合物。PFCs 内部结构中的 C—F 键具有极高的键能,从而导致 PFCs 具有极强的化学稳定性和热稳定性(例如, $\text{C}_2\text{F}_5\text{—F}$ 中 C—F 共价键键能为 127 kcal/mol, 而 C—C 共价键键能仅为 99 kcal/mol) (1 kcal/mol = 4.184 kJ/mol)^[1]。此外, PFCs 同时含有亲水基团和疏水基团。亲水基团促进了 PFCs 与水分子之间较强的相互作用,而疏水基团则与非极性物质相互作用有关。这种双重性质促使 PFCs 在液体表面形成一层分子薄膜,降低液体的表面张力,因此, PFCs 可在界面上形成较小的接触角,从而具有良好的润湿性和抗污染性能。

PFCs 的前体物质种类繁多,其中一些已经得到

确认,例如:6:2 氟调聚物磺酸为全氟羧酸的前体物质之一^[2];8:2 氟调聚物磺酸盐为 PFOA 的前体物质^[3];N-乙基-N-(2-羟乙基)-全氟辛烷磺酰胺和全氟辛烷磺酰胺(PFOSA)是 PFOS 的前体物质^[4]。然而,目前仍有多种 PFCs 前体物质尚未确定,前体物质的复杂性和多样性导致其在环境中转化和降解过程仍需进一步探索。

1.2 PFCs 在环境中的时空分布特征

PFCs 在水环境中易流动、极难降解且具有生物累积性,因此,广泛分布于水环境的多种介质中,包括水相、沉积物相和生物相。在水相中,短链 PFCs 因较高的水溶性,主要存在于地表水和地下水中,而长链 PFCs 则更倾向富集于沉积物和生物体内。PFCs 可通过地表径流、地下渗透及大气沉降在环境中迁移。另外,其前体物(如氟调聚物磺酸盐)可通过水解、脱氟或生物降解等转化途径生成短链 PFCs,从而增加短链 PFCs 的浓度。PFCs 性质稳定,不易被生物降解或通过传统处理技术去除,在去除 PFCs 方面给污水处理厂带来了巨大挑战。常规污水处理工艺对短链 PFCs 的去除效率有限,且污水处理过程中可能因前体物降解进一步释放 PFCs,导致出水中 PFCs 浓度增加。因此,明确 PFCs 在水环境中的赋存状态和迁移转化机制,有助于控制 PFCs 的污染。我国主要河流水系水体中 PFOS 和 PFOA 的平均浓度如表 1 所示。

表 1 我国主要河流水系水体中 PFOS 和 PFOA 的平均浓度
Tab. 1 Average Concentrations of PFOS and PFOA in Major River Systems at Home

流域名称	河流	PFCs/(ng·L ⁻¹)		参考文献
		PFOA	PFOS	
长江流域	长江上海段	141	7.31	[5]
	长江中段	148.85	148.85	[6]
	太湖	21.7	26.5	[7]
	巢湖	21.6	4.29	[8]
黄河流域	黄河上游	21.8	8.7	[9]
	黄河下游	22.4	9.6	
珠江流域	珠江	4.7	5.76	[10]
淮河流域	淮河	102.3	95.6	[11]
海河流域	海河	23.2	4.55	[12]
	白洋淀	31.8	8.8	[13]
辽河流域	浑河	5.91	1.86	[14]
	辽河	7.56	95.21	[7]
	大凌河	112.3	2.16	[15]
黑龙江流域	松花江	30.25	0.96	[16]

PFCs 在自然环境中可长时间积累。一项研究^[17]分析了 1958 年—2017 年 PFCs 在南极积雪层中沉积通量的变化;尽管长链 PFCs 的使用大幅减少,期间积雪层中每年 PFOA 沉积通量仍从 2.0 ng/m² 上升至约为 12 ng/m²,随后稳定在 8.0 ng/m²。另有研究^[18]证实,在 1981 年—2013 年,欧洲亚热带地区生物体内大多数长链 PFCs 以 3.9%~7.3% 的速率逐年增加。PFCs 通过大气、水体等环境介质在植物、动物和人体内累积,后通过食物链传递,导致 PFCs 在生态系统及生物体中的浓度呈增加趋势。

PFCs 可发生大范围空间迁移。例如,PFCs 通过地表与地下径流移动,此过程更倾向于表面土层与底部土层之间的纵向迁移^[19]。研究^[20]表明,受 PFCs 污染的区域土壤 PFCs 浓度通常比地下水中浓度高几个数量级,并且土壤中 PFCs 的赋存会持续对地下水环境产生影响。土壤 PFCs 污染程度比水体更为严重,这可能是由于 PFCs 更容易在土壤中吸附和滞留。PFCs 亦通过大气介质迁移,其中具有可挥发性的前体物质并可通过与灰尘颗粒相附进入大气层在全球范围内传递,通过降雨或降雪沉积至地表^[21]。前体物质通过一系列化学反应生成 PFCs,从而持续对生态环境构成威胁。

综上所述,PFCs 在环境中难以被降解,且污染时间、空间跨度较大,因此,对污水处理系统处理 PFCs 提出了更高的要求。

2 PFCs 在污水处理系统中的赋存

PFCs 前体物质(如氟调聚物磺酸盐、氟表面活性剂等)作为 PFCs 的重要来源,广泛存在于工业废水和生活污水中。研究^[22]表明,PFCs 前体物质在污水处理过程中,通过微生物代谢及化学降解等方式可转化为持久性 PFCs,其中短链 PFCs 的生成尤为显著。例如,PFOSA 可在好氧条件下通过脱氨基反应生成 PFOS;N-乙基-N-(2-羟乙基)-全氟辛烷磺酰胺通过 2 种途径转化为 PFOS,脱乙基生成 PFOSA 后再脱氨基,或氧化生成全氟辛基磺酰胺乙酸(FOSAA)后转化为 PFOSA 并脱氨基^[23]。这一转化机制显著影响 PFCs 在污水处理系统中的赋存状态及去除效果。前体物质在常规处理工艺中的降解可能导致出水中 PFCs,尤其是短链 PFCs 浓度升高,而短链 PFCs 难以通过污水处理厂常规处理工艺去除^[24]。因此,应充分考虑前体物质的影响,以全面评

估污水处理厂常规处理工艺对 PFCs 的去除效果。

2.1 污水厂进水中的 PFCs

污水处理厂进水中的 PFCs 主要来源于工业废水和城市生活污水。其中,长链 PFCs(如 PFOA 和 PFOS)主要来源于电子产品、金属电镀和防水涂层等行业的工业排放^[25-26];短链 PFCs[如全氟丁酸(PFBA)和全氟丁磺酸(PFBS)]的主要来源则与城市生活污水中大量使用的消费品(如个人护理用品、清洁剂及食品包装)有关。此外,短链 PFCs 因高水溶性,更易通过生活污水系统进入污水处理厂^[27]。

在污水中,PFCs 主要以溶解相和颗粒相形式存在,其赋存状态受到分子链长的影响。短链 PFCs 主要分布于溶解相中,而长链 PFCs 则倾向于吸附在颗粒物表面或污泥中^[28]。例如,研究^[29]发现,表层水中超过 99% 的 PFCs 分布在溶解相中,44.2% 的长链 PFCs(C10~C12)结合在悬浮颗粒上。污水中长短链 PFCs 的含量变化表现出显著的差异和季节性波动。污水处理厂进水中 PFCs 的浓度通常与工业分布和消费习惯密切相关,其质量浓度通常在 5.5~437.4 ng/L(图 1)^[24,30-32]。在夏季,因清洁剂和个人护理用品使用量增加,短链 PFCs 浓度较高;而在冬季,由于工业排放加剧,长链 PFCs 浓度较高^[33]。

自 2000 年,世界各国已采取各种法规和措施限制 PFCs 的生产和使用,尤其是危害较大的长链 PFCs。生态环境中长链 PFCs 含量虽未大量减少,但由于污水处理厂的进水来源于生活污水和工业废水,PFCs 种类和浓度已发生变化,例如从全氟磺酸和长链全氟羧酸逐渐向 PFOS 替代降解产物和短链全氟羧酸转变^[34]。据报道,污水厂进水 PFCs 多为短链。研究^[35]对武汉地区污水 PFCs 含量分析发现,短链 PFCs 以 PFBA 和全氟丁基磺酸含量最多,并出现了短链替代的现象。根据现有研究^[36],短链 PFCs 同样表现出生物毒性,且相较于长链 PFCs,其在环境中的流动性更强。

短链 PFCs 的替代现象对污水处理技术提出了新的挑战。从化学性质上看,由于短链 PFCs 具有低吸附性和高水溶性,在环境中更易迁移和扩散,从而在污水厂进水中具有较高的浓度。这种短链替代现象给污水处理技术带来了新的难题。在污水处理过程中,短链 PFCs 吸附效率低、氧化降解困难,导

致处理过程中能耗增加以及污染扩散风险的加剧^[36]。因此,短链 PFCs 在出水中其浓度高于长链 PFCs,并且易随出水进入自然水体,进而在地下水和地表水中表现出较高的赋存,增加了生态风险。

2.2 活性污泥中的 PFCs

污水中的 PFCs 能够被活性污泥吸附,从而导致其在活性污泥中富集。活性污泥法处理碳链长为 C2~C15 的 PFCs 时,降低反应体系的 pH 或增加钙离子浓度均促进了污泥对 PFCs 的吸附^[37]。此外,不同碳链长度的 PFCs 可能与活性污泥结合效率不同。对于碳链长度在 C2~C5 的短链 PFCs,其与污泥的结合能力和碳链长度呈反比;而对于碳链长度在 C6~C15 的长链 PFCs,延伸碳链长度可提高 PFCs 在污泥相的含量^[37-39]。另外,短链 PFCs 由于其流动性增强,更倾向保留在水相中,而长链 PFCs 则与之相反^[38]。值得注意的是,由于官能团的差异,活性污泥对不同类型 PFCs 具有不同吸附效果。如 PFOS 相较于 PFOA 更容易被污泥吸附,这可能是由于磺酸基团更倾向于与污泥结合^[40]。因此,相较而言,PFOA 在水相中的浓度更高^[41]。在生物处理单元内选择 PFOS 和 PFOA 作为代表性 PFCs,发现系统中 99% 的 PFOA 保留在污水相中,而 89.6% 的 PFOS 保留在污泥相中^[42]。

PFCs 的吸附亦可改变污泥的理化性质和微生物活性。一项研究^[43]将 PFOS 以 10 μg/L 的质量浓度加入活性污泥反应器后,反应器对总氮的去除率降低 22.48%,且 PFOS 的加入降低了活性污泥的沉降速率。另有研究^[44]证实,PFOS 导致活性污泥的污泥容积指数增加。好氧颗粒污泥虽然具有较好的沉降性能、致密的微生物结构,但实验室条件下当 PFOA 质量浓度在 0.1~1.0 mg/L 时,污泥吸附的 PFOA 导致好氧颗粒污泥沉降性能显著恶化,并影响微生物对磷的吸收/释放和氮的还原进程^[45]。综上,吸附至活性污泥上的 PFCs 会对活性污泥的理化性质造成负面影响,甚至抑制活性污泥内微生物活性,进而影响污水处理效果。

3 PFCs 在污水处理单元中的去除特征

不同性质的 PFCs 在污水处理工艺中的去除效果存在显著差异。长链 PFCs 因强疏水性和高吸附性,易与活性炭、污泥等吸附介质结合。短链 PFCs 因较低的疏水性,难以与传统吸附材料充分结合;此

外,较高的水溶性使其更倾向于停留在水相中。因此,常规处理工艺对长链 PFCs 的去除率通常高于短链 PFCs^[28]。如活性污泥法对长链 PFCs 的去除效率通常在 50% 以上,而对短链 PFCs 的去除率不足 20%^[46]。在膜分离工艺中,纳滤和反渗透对长链 PFCs 的截留效果明显优于短链 PFCs^[47]。高级氧化工艺(如臭氧氧化和 Fenton 氧化)对不同 PFCs 的反应速率差异较大,短链 PFCs 因分子结构稳定性较高,通常需要更高的氧化剂剂量和更长的反应时间才能达到明显的去除效果^[47]。因此,碳链长短不同导致的分子大小、水溶性及疏水性等性质显著差别会影响污泥吸附、膜分离和高级氧化工艺对 PFCs 的去除效果。

污水中 PFCs 经过生物处理时,污泥对 PFCs 的吸附作用和相应的生化反应对 PFCs 前体物质有一定降解作用,因此,部分 PFCs 可被去除^[24]。然而,微生物的生化反应是污水处理厂二级处理中 PFCs 前体转化为 PFCs 的可能原因之一。因此,PFCs 的含量可能会因部分 PFCs 前体转化为新的 PFCs 而上升。将河流水体和污水处理厂出水同时通过 $\cdot\text{OH}$ 氧化法处理后,发现污水厂出水全氟羧酸类化合物增加量更高,但全氟羧酸类化合物增加量:全氟羧酸类化合物氧化前值却明显低于河流水样的值,这可能是由于污水处理过程中前体物被降解^[48]。Li 等^[49]针对全氟烷基酸设计了一套模拟实际污水处理的反应器,出水中全氟烷基酸的总质量相比进水增加 $112\% \pm 14\%$,且 PFOA、全氟庚酸和 PFOS 分别增加 $79\% \pm 24\%$ 、 $109\% \pm 31\%$ 和 $57\% \pm 17\%$,推测它们是由污水处理过程中的潜在前体形成的。

不同二级处理工艺对 PFCs 的去除效果存在差异。传统一级处理技术对 PFCs 几乎无去除效果,二级生物处理工艺通过污泥的吸附作用和部分前体物的转化,减少了部分 PFCs 在水相中的浓度。然而,由于其高稳定性和生物难降解性,其可能在污泥中积累。活性污泥法是应用最广泛的二级处理工艺,其去除效果因设计参数和运行条件而异。研究^[50]表明,循环活性污泥系统(CASS)对 PFCs 的去除率可达到 32.2%,高于传统氧化沟和厌氧-缺氧-好氧(AAO)工艺。然而,在实际运行中,水力停留时间通常远低于 PFCs 的生物降解所需时间,因此生物降解对 PFCs 去除的贡献有限,吸附作用仍然是主要机制^[39]。研究^[51]表明,AAO 工艺结合膜生

物反应器后,PFCs 的去除率分别提高至 60.65%,进一步证明了膜生物反应器技术在处理 PFCs 方面的优势。在生物处理工艺中,水质条件对 PFCs 去除效果的影响不容忽视。例如,COD 和氨氮的存在均会影响 PFCs 的去除效果。COD 会竞争吸附位点,降低 PFCs 的去除效率,氨氮在高浓度条件下可能加剧这一竞争效应^[52]。因此,根据水质特征和处理需求,合理选择与优化二级处理工艺是提升 PFCs 去除率的关键。

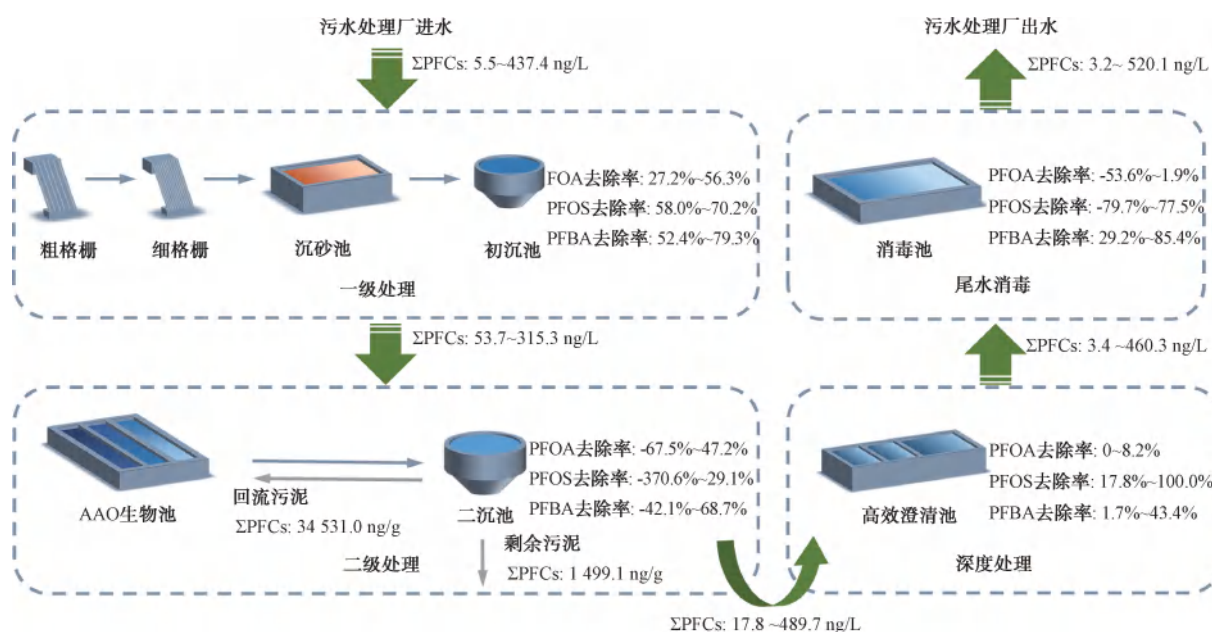
另外,污水厂不同消毒工艺对 PFCs 的去除效果存在差异。紫外(UV)消毒导致 PFOA 质量浓度从 0.7 ng/L 上升至 0.87 ng/L,PFOS 质量浓度从检出限以下上升至 0.18 ng/L^[31]。采用液氯消毒时 PFCs 浓度同样有所上升,液氯投加量为 5 mg/L、接触时间为 30 min 时,出水中 PFOA 的浓度升高 35.28%~45.48%^[53]。另有研究^[54]发现,经 15 mg/L 臭氧处理后,PFOA 前体物 8:2 氟调聚物磺酸盐的降解率可达 16.0%,PFOA 生成率为 13.4%。综上,UV、氯及臭氧消毒工艺会氧化 PFCs 前体物质,导致其出水浓度上升。然而,在高剂量臭氧的碱性条件下($8.7 \text{ g O}_3/\text{L}$ 、pH 值=11),水体中产生大量 $\cdot\text{OH}$,进一步促进自由基链式反应,促使 PFOA 中 C—F 键断裂,可去除 99% 的 PFOA^[55]。此外,臭氧耦合超声工艺可通过脱磺、脱羧、醇化一系列反应高效降解 PFOS,去除率可达 98.26%,将 PFOS 转化为短链的全氟磺酸与全氟羧酸^[56]。因此,低剂量参数下的常规消毒工艺难以去除 PFCs,需要不断调整工艺参数或联合多种消毒工艺以提高 PFCs 去除率。

污水处理厂的深度处理工艺,如混凝、沉淀和高级氧化,在 PFCs 的去除中起着重要作用。例如,混凝与沉淀工艺主要通过吸附和颗粒结合去除长链 PFCs,其去除率可达 50% 以上,但对短链 PFCs 的去除效果有限;高级氧化工艺[如 UV/ H_2O_2 /颗粒活性炭(GAC)]能降解部分长链 PFCs(PFOA 与 PFOS 的去除率约为 59%),但对短链 PFCs 的去除率仅为 12.9%^[57]。

4 典型 PFCs 去除技术

4.1 吸附法

吸附法通过吸附剂表面对 PFCs 分子的物理化学吸附作用,从水相中去除 PFCs。物理吸附主要依赖于吸附剂的比表面积和孔隙结构,而化学吸附则

图1 污水处理厂不同工艺单元对PFCs的去除^[24,30-32]Fig. 1 PFCs Removal by Different Process Units in WWTPs^[24,30-32]

通过静电作用、疏水相互作用和氢键作用实现与PFCs分子的结合^[47]。

近年来,吸附技术得到广泛研究,吸附材料从传统的活性炭发展到多种新型材料。例如,活性炭(如椰壳活性炭)被广泛用于PFCs去除,其中对全氟烷基醚磺酸盐、全氟壬烯氧基苯磺酸钠和PFOS的去除率分别达到99.3%、99.3%和99.9%^[58]。新型吸附剂如聚酯纤维在结合聚电解质涂层后,能在中试规模下去除95%的长链和85%的短链PFCs^[59]。此外,胶体活性炭对PFCs污染土壤和水体的整体去除率可达54%,其中PFOA和PFOS的去除率分别为69%和58%^[60]。为了进一步提升吸附效率,吸附技术正逐渐与其他工艺联用。例如,臭氧预处理结合GAC技术可使PFCs的去除率提高约70%^[61]。此外,吸附剂再生技术的发展也逐渐受到关注,包括热再生法、微波辐射再生法和碱热再生法等。例如,使用热再生法处理活性炭中的PFOS,在水温为92℃、固液比为0.5的条件下,经过6次循环可成功解吸分离90%以上的PFOS^[62]。微波辐射和碱热再生法作为热再生技术的改良,显示出良好的发展潜力^[63-64]。

吸附法因其成本低、操作简便、适用性强而成为研究热点。其对低浓度PFCs污染具有显著的去除效果,尤其对长链PFCs(如PFOS、PFOA)的吸附能

力较强。新型吸附材料的研发(如石墨烯、聚酯纤维等)显著提升了吸附性能,同时吸附法可以与其他处理技术结合,进一步提高对短链PFCs的去除效率。尽管吸附法对PFCs去除表现出显著优势,但仍存在一些局限性。吸附法对短链PFCs去除效果相对有限;另一方面,吸附剂的使用寿命有限,吸附饱和后需进行再生或更换,而吸附剂再生技术目前仍面临能耗高、操作条件复杂的问题。

4.2 膜滤法

膜滤法是在压力驱动下通过滤膜孔隙大小可以选择性透过一些物质,其中纳滤膜和反渗透膜可有效去除废水中的PFCs。其主要作用机制包括静电排斥、分子筛分和吸附作用^[47]。PFCs分子的截留效果与其分子大小、链长以及膜表面的亲疏水性密切相关。一般来说,长链PFCs因分子空间结构更大、疏水性更强导致其易被截留,短链PFCs分子小、疏水性弱,在穿过膜孔过程中难以被拦截,去除效率更低。

近年来,膜滤法在PFCs去除方面的研究主要集中在纳滤膜和反渗透膜的优化与组合工艺开发。研究^[65]发现,不同类型的纳滤膜(如NF270、NF90和ESNA1)对PFOS的去除率均超过92%。此外,反渗透膜在处理高浓度污染水体时表现出更高的效率,例如,在进料质量浓度 $\leq 1\,500\text{ mg/L}$ 时,反渗透

膜对半导体废水中 PFOS 的去除率超过 99%^[66]。为了提升膜滤法的适用性和经济性,研究者逐步开发膜滤与其他技术的耦合工艺。例如,纳滤膜与电化学技术的结合不仅可将全氟己酸的去除率提高至 99%,还能显著降低能耗,相较于单一电解工艺节能 59.2%^[67]。另一项研究^[68]采用多级纳滤膜与电氧化技术结合,在浓缩和分解 PFCs 时,相比单一电氧化工艺,整体成本降低 78.4%。此外,纳滤膜与 UV-亚硫酸盐技术的结合也取得了良好的效果,纳滤系统的截留率始终保持在 95% 以上,同时 UV 分解 PFCs 的效率超过 90%^[69]。

膜滤技术成熟、能耗较低、安全性高,处理过程中不会引入外来物质,同时对 PFCs 保持较高去除率(90% 以上),并且受无机离子和共存有机物的影响较小,适合处理有机物和 PFCs 浓度较高的废水废液。尽管膜滤技术设备投资和运行成本较高,膜污染问题会增加清洗频率并缩短使用寿命,但其高去除率和长期运行的经济可行性,仍使其适用于高浓度 PFCs 废水的处理应用。

4.3 湿地植物修复法

湿地植物修复法通过系统中的植物、微生物群落及沉积介质的综合作用去除 PFCs,其主要机制包括物理吸附、植物根系吸收与微生物生物转化。湿地沉积物通过吸附和颗粒结合作用富集长链 PFCs,而短链 PFCs 主要以溶解态存在于水相中,难以被湿地植物根系吸收或土壤微生物降解。植物(如芦苇、香蒲)通过根系吸收和富集长链 PFCs,同时为微生物提供稳定的生存环境^[70]。湿地微生物群落则通过降解 PFCs 前体物(如全氟磺酰胺)实现转化,但由于 PFCs 分子中 C—F 键的高度稳定性,完全矿化降解难以实现^[71]。因此,湿地植物修复法在 PFCs 去除中以吸收和富集作用为主。

近年来,植物修复法得到了广泛研究,并在中试规模和实际工程中逐步应用。一项中试研究^[72]发现,利用以芦苇为主的人工湿地处理受 PFCs 污染的水体时,全氟烷基酸的去除率可达到 50%。此外,在种植宽叶香蒲的垂直流湿地系统中,对 PFCs 前体物的去除率可达 92%,但对 PFCs 的整体去除率较低,甚至部分短链 PFCs 浓度可能会因前体物降解而增加^[73]。湿地系统对 PFCs 去除的效率与污染物的碳链长度密切相关。研究^[69]表明,湿地对长链 PFCs(如 PFOA 和 PFOS)的去除效果较为显著,

其去除率分别为 61.0% 和 83.7%。此外,天然湿地的水相中以短链和中链 PFCs 为主,而沉积物中则以长链 PFCs 为主,进一步表明湿地系统对长链 PFCs 的吸附和富集作用更为显著^[74]。

湿地植物修复法是一种生态友好、低成本且可持续的污染治理技术,降低 PFCs 浓度的同时可改善周边生态环境及生物多样性。湿地系统无需额外添加化学药剂,经济成本相对较低,适用于大面积低浓度 PFCs 污染的处理。然而,该方法难以去除短链 PFCs,且 PFCs 前体物降解可能导致短链 PFCs 浓度升高。尽管湿地系统初始建设成本较低,但长期维护费用(如植物更换和泥沙清理)需予以考虑。

4.4 高级氧化技术

高级氧化技术通过高活性氧化剂(如 $\cdot\text{OH}$ 、 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 等)或阳极产生的氧化物质快速破坏有机污染物分子的化学键,实现降解和去除。在 PFCs 处理过程中,臭氧氧化、UV/ H_2O_2 、Fenton 反应、过硫酸盐活化及电氧化均表现出显著效果^[75]。

近年来,高级氧化技术的研究集中于不同氧化体系的优化与工程化应用。例如,臭氧耦合超声(O_3 -US)体系在最佳条件(初始 pH 值 = 10.0,载气流量 = 2 L/min,超声强度 = 630 W)下对 PFOA、PFOS 的去除率分别可达 92.14%、98.26%^[76];UV/ H_2O_2 处理后经 GAC 吸附可去除 90% 以上的 PFOA 和 PFOS,短链 PFCs 的去除率亦可达到 50% 以上^[57]。在实际污水处理过程中具有一定的应用前景。基于过硫酸盐的 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 氧化技术可有效降解 PFCs,其降解率在实验室条件下高达 90%^[77]。此外,电氧化技术因其阳极可控性和高效性,逐渐成为研究热点,硼掺杂金刚石阳极对 PFOA 的去除率可达到 98%^[78],但目前更多是在实验室规模下进行验证,工程化应用仍需进一步研究。

高级氧化技术能直接破坏 PFCs 分子中化学稳定性极高的 C—F 键,适用于低浓度 PFCs 的处理。此外,高级氧化技术可通过与吸附、膜分离等技术联用,进一步提升 PFCs 的去除率。然而,像臭氧、过硫酸盐等氧化剂成本高,阳极材料易腐蚀,增加了高级氧化技术的处理成本。

5 总结与展望

PFCs 在各种环境介质中难以被降解,且可通过土壤、水体和大气进行迁移。污水处理厂作为 PFCs

处理的重要一环,其进水和污泥中均含有大量 PFCs。一级处理对 PFCs 几乎没有去除效果。在二级处理中短链 PFCs 更倾向于存在于污水相,长链则反之。现阶段的二级处理中 CASS 工艺对 PFCs 稍有去除效果,且长链 PFCs 相较于短链去除效率稍高。然而,经消毒工艺处理后,PFCs 浓度反而可能升高。故而仍需对新型处理技术去除 PFCs 进行深入研究,以降低其对生态环境的威胁。

本综述基于近年研究提出以下对于 PFCs 处理的展望。

(1)现阶段研究多针对长链 PFCs,但是由于各种法令法规的限制,长链 PFCs 多被短链 PFCs 所替代。故应加强对短链 PFCs 的研究,以适应 PFCs 在环境中赋存的新变化。

(2)在环境治理领域,通常采用多种技术耦合提高效率,降低成本。例如,在 PFCs 去除中,可以单独应用化学氧化、吸附剂等技术,也可以将不同技术耦合,如臭氧预处理与吸附结合、膜处理与电氧化技术结合等。这些耦合技术的综合应用有助于克服单一技术的局限性。但是,技术之间的协同作用以及使用的边界条件仍需要进一步考虑,以实现最佳的处理效果。

(3)深度处理工艺中,长链 PFCs 的去除率相较于短链更高。活性炭吸附、纳滤及反渗透技术可有效去除水体中短碳链 PFCs,因此,未来研究应进一步聚焦于考察以上工艺组合对短链 PFCs 的去除效果,以减少其在水体中的赋存。

通过先进的污水处理技术,PFCs 的去除效率得到了显著提高。然而,要实现长期、有效的污染控制,还需要从全生命周期的角度出发,综合考虑源头控制、过程优化以及废弃物的安全处置。这种全面的污染控制策略将有助于减少 PFCs 的环境负担,推动环境保护政策的制定和实施。

参考文献

- [1] WARDMAN P. Reduction potentials of one-electron couples involving free radicals in aqueous solution [J]. Journal of Physical Chemical Reference Data, 1989, 18(4): 1637-1755.
- [2] HAMID H, LI L Y, GRACE J R. Effect of substrate concentrations on aerobic biotransformation of 6 : 2 fluorotelomer sulfonate (6 : 2 FTS) in landfill leachate [J]. Chemosphere, 2020, 261: 128108. DOI: 10.1016/j. chemosphere. 2020. 128108.
- [3] HOUTZ E F, SEDLAK D L. Oxidative conversion as a means of detecting precursors to perfluoroalkyl acids in urban runoff [J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46(17): 9342-9349.
- [4] ZHAO S Y, ZHOU T, WANG B H, et al. Different biotransformation behaviors of perfluorooctane sulfonamide in wheat (*Triticum aestivum* L.) from earthworms (*Eisenia fetida*) [J]. Journal of hazardous Materials, 2017, 346: 191-198. DOI:10.1016/j. jhazmat. 2017. 12. 018.
- [5] SO M K, MIYAKE Y, YEUNG W Y, et al. Perfluorinated compounds in the Pearl River and Yangtze River of China [J]. Chemosphere, 2007, 68(11): 2085-2095.
- [6] WANG T, WANG P, MENG J, et al. A review of sources, multimedia distribution and health risks of perfluoroalkyl acids (PFAAs) in China [J]. Chemosphere, 2015, 129: 87-99. DOI:10.1016/J. Chemosphere. 2014. 09. 021.
- [7] YANG L, ZHU L, LIU Z. Occurrence and partition of perfluorinated compounds in water and sediment from Liao River and Taihu Lake, China [J]. Chemosphere, 2011, 83(6): 806-814.
- [8] PAN X, YE J, ZHANG H, et al. Occurrence, removal and bioaccumulation of perfluoroalkyl substances in Lake Chaohu, China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(10): 1692.
- [9] PAN C G, YING G G, ZHAO J L, et al. Spatial distribution of perfluoroalkyl substances in surface sediments of five major rivers in China [J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2015, 68(3): 566-576.
- [10] LIU Y, QIAN M, MA X, et al. Nontarget mass spectrometry reveals new perfluoroalkyl substances in fish from the Yangtze River and Tangxun Lake, China [J]. Environmental Science & Technology, 2018, 52(10): 5830-5840.
- [11] LI F, SUN H, HAO Z, et al. Perfluorinated compounds in Haihe River and Dagou drainage canal in Tianjin, China [J]. Chemosphere, 2011, 84(2): 265-271.
- [12] YU N, SHI W, ZHANG B, et al. Occurrence of perfluoroalkyl acids including perfluorooctane sulfonate isomers in Huai River Basin and Taihu Lake in Jiangsu Province, China [J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(2): 710-717.
- [13] ZHOU Z, SHI Y, LI W, et al. Perfluorinated compounds in surface water and organisms from Baiyangdian Lake in north China: source profiles, bioaccumulation and potential risk [J]. Bulletin of environmental contamination and toxicology, 2012, 89(11): 519-524.
- [14] SUN R, WU M, TANG L, et al. Perfluorinated compounds in surface waters of Shanghai, China: source analysis and risk assessment [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, 149: 88-95. DOI:10.1016/j. ecoenv. 2017. 11. 012.
- [15] ZHU Z Y, WANG T Y, MENG J, et al. Perfluoroalkyl

- substances in the Daling River with concentrated fluorine industries in China: Seasonal variation, mass flow, and risk assessment[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22: 10009–10018. DOI:10.1007/s11356-015-4189-0.
- [16] DONG W, LIU B, SONG Y, et al. Occurrence and partition of perfluorinated compounds (PFCs) in water and sediment from the Songhua River, China [J]. *Archives of environmental Contamination and Toxicology*, 2018, 74: 492–501. DOI: 10.1007/s00244-017-0474-x.
- [17] GARNETT J, HALSALL C, WINTON H, et al. Increasing accumulation of perfluorocarboxylate contaminants revealed in an antarctic firn core (1958–2017) [J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, 56(16): 11246–11255.
- [18] SCHULTES L, SANDBLOM O, BROEG K, et al. Temporal trends (1981–2013) of per- and polyfluoroalkyl substances and total fluorine in baltic cod (*gadus morhua*) [J]. *Environmental Toxicology Chemistry*, 2020, 39(2): 300–309.
- [19] LIU M, MUNOZ G, DUY S V, et al. Per- and polyfluoroalkyl substances in contaminated soil and groundwater at airports: A Canadian case study [J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 56(2): 885–895.
- [20] BRUSSEAU M L, ANDERSON R H, GUO B. PFAS concentrations in soils: Background levels versus contaminated sites [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 740: 140017. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140017.
- [21] WANG Q, RUAN Y, LIN H, et al. Review on perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in the Chinese atmospheric environment [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 737: 139804. DOI:10.1016/j.scitotenv.2020.139804.
- [22] 孙红文, 方博, 陈浩, 等. 全氟和多氟烷基化合物微生物降解与转化研究进展 [J]. *环境科学*, 2023, 44(3): 1214–1227.
- SUN H W, FANG B, CHEN H, et al. Advances in microbial degradation and transformation of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) [J]. *Environmental Science*, 2023, 44(3): 1214–1227.
- [23] 赵淑艳, 周涛, 王博慧, 等. PFOS 前体物质 (PreFOSs) 降解菌的分离鉴定及其降解特性 [J]. *环境科学*, 2018, 39(7): 3321–3328.
- ZHAO S Y, ZHOU T, WANG B H, et al. Isolation, identification, and biodegradation behaviors of a perfluorooctane sulfonic acid precursor (PreFOSs) degrading bacterium from contaminated soil [J]. *Environmental Science*, 2018, 39(7): 3321–3328.
- [24] 范庆, 邓述波, 周琴, 等. 城市污水处理厂中全氟化合物的存在及去除效果研究 [J]. *环境污染与防治*, 2011, 33(1): 30–35.
- FAN Q, DENG S B, ZHOU Q, et al. Occurrence and removal of perfluorinated compounds in municipal wastewater treatment plants [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2011, 33(1): 30–35.
- [25] 李敏, 蔡凤珊, 秦瑞欣, 等. 重庆市典型行业废水中 16 种全氟化合物污染特征 [J]. *生态毒理学报*, 2021, 16(5): 44–58.
- LI M, CAI F S, QIN R X, et al. Pollution status of sixteen per- and polyfluoroalkyl substances in wastewater of typical industries in Chongqing City [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2021, 16(5): 44–58.
- [26] WANG T, WANG Y W, LIAO C Y, et al. Perspectives on the inclusion of perfluorooctane sulfonate into the stockholm convention on persistent organic pollutants [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(14): 5171–5175.
- [27] 王之芬, 梁新秀, 占笔成, 等. 快速城市化流域全氟化合物的污染特征及生态风险 [J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2019, 55(3): 543–552.
- WANG Z F, LIANG X X, ZHAN B C, et al. Pollution characteristics and ecological risk of perfluorinated compounds in a rapidly urbanizing catchment [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2019, 55(3): 543–552.
- [28] AHRENS L. Polyfluoroalkyl compounds in the aquatic environment: A review of their occurrence and fate [J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2011, 13(1): 20–31.
- [29] 乔磊, 张汝频, 杨余, 等. 全氟化合物在北江顺德水道表层水、悬浮颗粒物以及沉积物中的污染特征及风险评估 [J]. *地球化学*, 2022, 51(6): 617–624.
- QIAO L, ZHANG R P, YANG Y, et al. Pollution characteristics and risk assessment of perfluoroalkyl substances in surface water, suspended particulate matter, and sediment in the Shunde Waterway of the Beijiang River [J]. *Geochimica*, 2022, 51(6): 617–624.
- [30] 唐鑫如, 陈杰, 魏庆, 等. 污水厂各处理单元对全氟辛酸浓度的影响 [J]. *环境科学与技术*, 2023, 46(3): 185–191.
- TANG X R, CHEN J, WEI Q, et al. Effects of various treatment units in sewage plants on the concentration of perfluorooctanoic acid [J]. *Environmental Science & Technology*, 2023, 46(3): 185–191.
- [31] 汪磊, 张彰, 张宪忠, 等. 污水处理厂中全氟化合物的污染研究 [J]. *环境科学学报*, 2011, 31(7): 1363–1368.
- WANG L, ZHANG Z, ZHANG X Z, et al. Removal of perfluorinated compounds by wastewater treatment plants [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(7): 1363–1368.
- [32] 马洁, 陈红瑞, 王娟, 等. 4 种短链全氟化合物替代物在城市污水处理厂的污染特征研究 [J]. *生态毒理学报*, 2017, 12(3): 191–202.
- MA J, CHEN H R, WANG J, et al. Pollution characteristics of four short chain perfluorinated compound substitutes in municipal wastewater treatment plant [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*,

- 2017, 12(3): 191–202.
- [33] YIN C, TAN Y, CHEN Y L, et al. Mass load and source apportionment of pharmaceutical and personal care product in the Wuhan section of the Yangtze River, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2025, 959: 178222. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.178222.
- [34] GALLAN C, BIGNERT A, TAUCARE G, et al. Temporal trends of perfluoroalkyl substances in an Australian wastewater treatment plant: A ten-year retrospective investigation[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 804: 150211. DOI: 10.1021/es061267m.
- [35] 周珍, 胡宇宁, 史亚利, 等. 武汉地区水环境中全氟化合物污染水平及其分布特征[J]. *生态毒理学报*, 2017, 12(3): 425–433.
- ZHOU Z, HU Y N, SHI Y L, et al. Occurrence and distribution of per- and polyfluoroalkyl substances in waste water and surface water samples in Wuhan[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2017, 12(3): 425–433.
- [36] 张美, 楼巧婷, 邵倩文, 等. 全氟化合物污染现状及风险评估的研究进展[J]. *生态毒理学报*, 2019, 14(3): 30–53.
- ZHANG M, LOU Q T, SHAO Q W, et al. Research progress of perfluorinated compounds pollution status and risk assessment[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2019, 14(3): 30–53.
- [37] ZHANG C, YAN H, LI F, et al. Sorption of short- and long-chain perfluoroalkyl surfactants on sewage sludges[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, 260(18): 689–699.
- [38] ARVANITI O S, ANDERSEN H R, THOMAIDIS N S, et al. Sorption of perfluorinated compounds onto different types of sewage sludge and assessment of its importance during wastewater treatment[J]. *Chemosphere*, 2014, 111(1): 405–411.
- [39] 代孟帆, 阎妮. 全氟和多氟烷基化合物(PFAS)与活性污泥间的相互作用研究进展[J]. *生态毒理学报*, 2023, 18(4): 87–101.
- DAI M F, YAN N. Interaction between per- and poly-fluoroalkyl substances (PFAS) and activated sludge: A review[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2023, 18(4): 87–101.
- [40] GOBELIUS L, GLIMSTEDT L, OLSSON J, et al. Mass flow of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in a Swedish municipal wastewater network and wastewater treatment plant[J]. *Chemosphere*, 2023, 336(9): 139182.
- [41] GUO R, SIM W J, LEE E S, et al. Evaluation of the fate of perfluoroalkyl compounds in wastewater treatment plants[J]. *Water Research*, 2010, 44(11): 3476–3486.
- [42] PAN C G, LIU Y S, YING G G. Perfluoroalkyl substances (PFASs) in wastewater treatment plants and drinking water treatment plants: Removal efficiency and exposure risk[J]. *Water Research*, 2016, 106(12): 562–570.
- [43] LU B, QIAN J, HE F, et al. Effects of long-term perfluorooctane sulfonate (PFOS) exposure on activated sludge performance, composition, and its microbial community[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 295: 118684. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.118684.
- [44] LIU X, YIN H, TANG S, et al. Effects of single and combined copper/perfluorooctane sulfonate on sequencing batch reactor process and microbial community in activated sludge[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 238: 407–415. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.04.045.
- [45] YANG G, ZHANG N, YANG J, et al. Interaction between perfluorooctanoic acid and aerobic granular sludge[J]. *Water Research*, 2020, 169: 115249. DOI: 10.1016/j.watres.2019.115249.
- [46] KRIPPNER J, BRUNN H, FALK S, et al. Effects of chain length and pH on the uptake and distribution of perfluoroalkyl substances in maize (*Zea mays*) [J]. *Chemosphere*, 2014, 94(1): 85–90.
- [47] 何峻伟, 卢绪鑫, 元华, 等. 水中全氟化合物去除技术及效能研究进展[J]. *净水技术*, 2023, 42(10): 37–45, 172.
- HE J W, LU X X, QI H, et al. Research progress of technology and efficiency for perfluorochemical removal in water[J]. *Water Purification Technology*, 2023, 42(10): 37–45, 172.
- [48] 张慧, 王世亮, 余杨. 乐安河流水体典型全氟化合物的浓度及其前体物的污染贡献[J]. *环境科学*, 2020, 41(7): 3204–3211.
- ZHANG H, WANG S L, YU Y. Concentrations of typical perfluoroalkyl acids and contributions of their precursors in the water of the Le'an River in China[J]. *Environmental Sciences*, 2020, 41(7): 3204–3211.
- [49] LI Y J, BRÄUNIG J, THAI P K, et al. Formation and fate of perfluoroalkyl acids (PFAAs) in a laboratory-scale urban wastewater system[J]. *Water Research*, 2022, 216: 118295. DOI: 10.1016/j.watres.2022.118295.
- [50] CHEN S Q, ZHOU Y Q, MENG J, et al. Seasonal and annual variations in removal efficiency of perfluoroalkyl substances by different wastewater treatment processes[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 242: 2059–2067. DOI: 10.1016/j.envpol.2018.06.078.
- [51] CHOI S, LEE W, SON H, et al. Occurrence, removal, and prioritization of organic micropollutants in four full-scale wastewater treatment plants in Korea[J]. *Chemosphere*, 2024, 361: 142460. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2024.142460.
- [52] TANG J, LIU Y, SU P, et al. Removal of COD, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, and perfluorinated compounds from wastewater treatment plant effluent using ZnO-coated activated carbon[J]. *Water Science & Technology*, 2020, 81(11): 2459–2470.
- [53] 陈森, 王新皓, 徐翊宸, 等. 市政污水处理系统中不同工艺段多氟/全氟烷基化合物(PFASs)的赋存、转化和去除[J]. *环境化学*, 2023, 42(7): 2228–2241.
- CHEN S, WANG X H, XU Y C, et al. Review on the

- occurrence, transformation and removal of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in different process segments of sewage wastewater treatment systems [J]. *Environment Chemistry*, 2023, 42(7): 2228–2241.
- [54] KAISER A M, SARACEVIC E, SCHAAR H P, et al. Ozone as oxidizing agent for the total oxidizable precursor (TOP) assay and as a preceding step for activated carbon treatments concerning per- and polyfluoroalkyl substance removal [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 300: 113692. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.113692.
- [55] LIN A Y C, PANCHANGAM S C, CHANG C Y, et al. Removal of perfluorooctanoic acid and perfluorooctane sulfonate via ozonation under alkaline condition [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, 243: 272–277. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2012.10.029.
- [56] 张毓敏, 关智杰, 廖小健, 等. 臭氧耦合超声高效降解全氟辛酸和全氟辛酸磺酸及其机理研究[J]. *环境科学学报*, 2023, 43(8): 1–11.
- ZHANG Y M, GUAN Z J, LIAO X J, et al. Study on the high efficiency degradation and mechanism of perfluorooctanoic acid and perfluorooctane sulfonate by ozone coupled ultrasound [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2023, 43(8): 1–11.
- [57] 郝明明, 郝昊天, 石宝友, 等. UV/H₂O₂/GAC 工艺去除水中全氟化合物[J]. *环境工程学报*, 2024, 18(2): 531–538.
- HAO M M, HAO H T, SHI B Y, et al. Removal of PFCs from water by UV/H₂O₂/GAC process [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2024, 18(2): 531–538.
- [58] 周佳钰, 吴少林, 吴永明, 等. 椰壳活性炭对水中 F-53B、OBS 和 PFOS 的协同去除性能研究[J]. *环境科学与技术*, 2022, 45(2): 106–111.
- ZHOU J Y, WU S L, WU Y M, et al. Study on synergistic removal of F-53B, OBS and PFOS from water by coconut shell activated carbon [J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, 45(2): 106–111.
- [59] A. SALMA, W. ALI, M. HILDENBRANDT, 等. 吸附用纺织品: 从受污染的水中去除 PFC 的方法[J]. *国际纺织导报*, 2022, 50(5): 23–25.
- SALMA A, ALI W, HILDENBRANDT M, et al. Adsorber textiles: Smart approach for PFC removal from contaminated water [J]. *Melliand China*, 2022, 50(5): 23–25.
- [60] GEORGIOU N, LUTZ A, DAN BERGGREN K, et al. In-situ application of colloidal activated carbon for PFAS-contaminated soil and groundwater: A Swedish case study [J]. *Remediation Journal*, 2023, 33(2): 101–110.
- [61] VATANKHAH H, TAJDINI B, MILSTEAD R P, et al. Impact of ozone-biologically active filtration on the breakthrough of perfluoroalkyl acids during granular activated carbon treatment of municipal wastewater effluent [J]. *Water Research*, 2022, 223: 118988. DOI: 10.1016/j.watres.2022.118988.
- [62] WANG W, DU Z, DENG S, et al. Regeneration of PFOS loaded activated carbon by hot water and subsequent aeration enrichment of PFOS from eluent [J]. *Carbon*, 2018, 134: 199–206. DOI: 10.1016/j.carbon.2018.04.005.
- [63] GAGLIANO E, FALCIGLIA P P, ZAKER Y, et al. Microwave regeneration of granular activated carbon saturated with PFAS [J]. *Water Research*, 2021, 198: 117121. DOI: 10.1016/j.watres.2021.117121.
- [64] ORI S, SHILAI H, BRIAN G T, et al. Application of hydrothermal alkaline treatment to spent granular activated carbon: Destruction of adsorbed PFASs and adsorbent regeneration [J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2023, 10(5): 425–430.
- [65] 王涛, 李烨, 马文瑾, 等. PMIA 中空纤维纳滤膜去除饮用水中的 PFOS [J]. *水处理技术*, 2015, 41(7): 103–108.
- WANG T, LI Y, MA W J, et al. Removal of PFOS from drinking water using PMIA hollow fiber nanofiltration membrane [J]. *Technology of Water Treatment*, 2015, 41(7): 103–108.
- [66] TANG C Y, FU Q S, ROBERTSON A P, et al. Use of reverse osmosis membranes to remove perfluorooctane sulfonate (PFOS) from semiconductor wastewater [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, 40(23): 37–45.
- [67] SORIANO Á, GORRI D, URTIAGA A. Membrane preconcentration as an efficient tool to reduce the energy consumption of perfluorohexanoic acid electrochemical treatment [J]. *Separation and Purification Technology*, 2019, 208: 160–168. DOI: 10.1016/J.SEPUR.2018.03.050.
- [68] SORIANO Á, GORRI D, BIEGLER L T, et al. An optimization model for the treatment of perfluorocarboxylic acids considering membrane preconcentration and BDD electrooxidation [J]. *Water Research*, 2019, 164: 114954. DOI: 10.1016/j.watres.2019.114954.
- [69] LIU C J, MCKAY G, JIANG D, et al. Pilot-scale field demonstration of a hybrid nanofiltration and UV-sulfite treatment train for groundwater contaminated by per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) [J]. *Water Research*, 2021, 205: 117677. DOI: 10.1016/j.watres.2021.117677.
- [70] 裘湛. 人工湿地植物根际效应对根部微生物影响的研究进展 [J]. *净水技术*, 2018, 37(7): 26–30.
- QIU Z. Research advances in rhizosphere effect of constructed wetland plants on root microorganism [J]. *Water Purification Technology*, 2018, 37(7): 26–30.
- [71] ARSANI M, EL-DIN M G. Removal of per- and poly-fluoroalkyl substances (PFASs) by wetlands: Prospects on plants, microbes and the interplay [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 800: 149570. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.149570.
- [72] FERRARIO C, PERUZZI C, CISLAGHI A, et al. Assessment of reed grasses (*Phragmites australis*) performance in PFAS removal from water: A phytoremediation pilot plant study [J].

- Water, 2022, 14(6): 946.
- [73] LOTT D J, ROBEY N M, FONSECA R, et al. Behavior of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in pilot-scale vertical flow constructed wetlands treating landfill leachate [J]. Waste Manage (Oxford), 2023, 161: 187–192. DOI: 10.1016/j.wasman.2023.03.001.
- [74] 雷梦真, 何锦秋, 张洪利, 等. 成都市典型湿地公园全氟化化合物的污染特征及风险评估[J]. 环境化学, 2024, 43(9): 1–11.
- LEI M Z, HE J Q, ZHANG H L, et al. Pollution characteristics and risk assessment of perfluoroalkyl substances in the typical wetland of Chengdu City [J]. Environmental Chemistry, 2024, 43(9): 1–11.
- [75] Sadou BARRY, 汪永, 郭佳琦, 等. UV-Fenton 工艺的研究进展及其在水环境微污染处理领域的应用[J]. 净水技术, 2023, 42(5): 21–28, 43.
- BARRY S, WANG Y, GUO J Q, et al. Research progress in UV-Fenton process and the application of micropollution control in water environment [J]. Water Purification Technology, 2023, 42(5): 21–28, 43.
- [76] 张盼盼. 水体中持久性有机污染物 PFOS 的去除方法研究 [D]. 北京: 首都经济贸易大学, 2016.
- ZHANG P P. Study on the removal method of persistent organic pollutant PFOS in water [D]. Beijing: Capital University of Economics and Business, 2016.
- [77] 郭丽, 袁颐进, 冯丽贞, 等. 电活化过硫酸盐降解全氟辛酸及其中间产物的探究分析[J]. 环境科学学报, 2020, 40(6): 2045–2054.
- GUO L, YUAN Y J, FENG L Z, et al. Electrochemical activated persulfate to degrade perfluorooctanoic acid and the analysis of intermediate products [J]. Acta Science Circumstantiae, 2020, 40(6): 2045–2054.
- [78] 卓琼芳, 邓述波, 许振成, 等. 电化学氧化 PFOA 阳极材料筛选及其机制研究[J]. 环境科学, 2014, 35(5): 1810–1816.
- ZHUO Q F, DENG S B, XU Z C, et al. Screening and mechanism study of electrochemical oxidation PFOA anode materials [J]. Environmental Science, 2014, 35(5): 1810–1816.
- (上接第 8 页)
- [26] 王崇武. 反渗透海水淡化系统能量分析及优化 [D]. 天津: 天津大学, 2008.
- WANG C W. Energy analysis and optimization of reverse osmosis seawater desalination system [D]. Tianjin: Tianjin University, 2008.
- [27] WANG C P, WANG S H, WANG K J, et al. Developmental impediment and prospective trends of desalination energy recovery device [J]. Desalination, 2024, 578: 117465. DOI: 10.1016/j.desal.2024.117465.
- [28] WANG S H, XIAO Y X, WANG C P, et al. Performance improvement of turbo energy recovery device in desalination using flow field simulation and uniform design experiment [J]. Desalination and Water Treatment, 2025, 321: 100980. DOI: 10.1016/j.dwt.2024.100980.
- [29] 汪程鹏, 王生辉, 肖业祥, 等. 海水淡化能量回收装置能耗分析与设计比选[J]. 水处理技术, 2023, 49(12): 51–54.
- WANG C P, WANG S H, XIAO Y X, et al. Energy consumption analysis and design comparison of seawater desalination energy recovery device [J]. Technology of Water Treatment, 2023, 49(12): 51–54.
- [30] 吴水波, 李兆魁, 王晓玲, 等. 反渗透能量回收装置性能评价指标研究[J]. 给水排水, 2013, 49(7): 146–150.
- WU S B, LI Z K, WANG X L, et al. Research on performance evaluating indexes of energy recovery devices for reverse osmosis desalination [J]. Water & Wastewater Engineering, 2013, 49(7): 146–150.
- [31] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 海水淡化反渗透膜装置测试评价方法: GB/T 32359—2015 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Test and evaluation methods of reverse osmosis equipment for seawater desalination: GB/T 32359—2015 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.