

何峻伟, 卢绪鑫, 亓华, 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 perfluorochemicals removal in water[J]. Water Purification Technology, 2023, 42(10): 37-45, 172.

水中全氟化合物去除技术及效能研究进展

何峻伟¹, 卢绪鑫², 亓华^{3,*}, 唐兆国⁴, 韩延镇⁵, 邵明睿¹

(1. 山东建筑大学市政与环境工程学院, 山东济南 250100; 2. 临沂市水务集团有限公司, 山东临沂 276000; 3. 新泰市自来水有限公司, 山东新泰 271200; 4. 中建安装集团有限公司, 山东济南 250014; 5. 明洋<山东>环境科技有限公司, 山东菏泽 274300)

摘要 全氟化合物(PFCs)被广泛应用于泡沫灭火剂、纸张涂层和洗涤剂。近年来,不断有 PFCs 在饮用水中被检测出来,传统的水处理工艺常用于处理难降解有机物,部分技术对 PFCs 去除能力有限,文章对不同方法去除水中 PFCs 进行了综述,并对各种方法的优缺点及去除效率进行了汇总。物理方法操作简便、不产生多余反应副产物且经济效益高,但无法从根本上实现对水中 PFCs 的去除;化学方法虽然可以通过破坏碳氟键实现对水中 PFCs 的大部分去除,但能耗过高。在未来的研究中建议多种方法耦合联用实现对 PFCs 的高效去除。

关键词 全氟化合物(PFCs) 高级氧化工艺(AOP) 去除效率 全氟辛酸(PFOA) 全氟辛烷磺酸盐(PFOS)

中图分类号: X703 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-0177(2023)10-0037-10

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2023.10.005

Research Progress of Technology and Efficiency for Perfluorochemicals Removal in Water

HE Junwei¹, LU Xuxin², QI Hua^{3,*}, TANG Zhaoguo⁴, HAN Yanzhen⁵, SHAO Mingrui¹

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250100, China;

2. Linyi Water Group Co., Ltd., Linyi 276000, China;

3. Xintai Water Supply Co., Ltd., Xintai 271200, China;

4. China Construction Industrial & Energy Engineering Group Co., Ltd., Jinan 250014, China;

5. Mingyang <Shandong> Environmental Technology Co., Ltd., Heze 274300, China)

Abstract Perfluorochemicals (PFCs) are widely used in foam extinguishing agents, paper coatings, detergents and other aspects. In recent years, PFCs have been continuously detected in drinking water, but traditional water treatment processes are often used to treat refractory organics, some technologies have limited ability to remove PFCs. In this paper, different methods for PFCs removing from water are reviewed, the advantages, disadvantages and removal efficiency of various methods are summarized. Physical methods are easy to operate, without produce redundant reaction by-products and have high economic benefits, but it cannot fundamentally achieve the removal of PFCs in water. Although chemical methods can remove most of PFCs in water by breaking C-F bond, the energy consumption is too high. In future, it is suggested that multiple methods can be coupled to achieve efficient removal of PFCs.

Keywords perfluorochemicals(PFCs) advanced oxidation process (AOP) removal efficiency perfluorooctanoic acid (PFOA) perfluorooctane sulphonate (PFOS)

全氟化合物(PFCs)目前广泛出现在人们的生

产生活中,全氟辛酸(PFOA)和全氟辛烷磺酸(PFOS)是水环境中最常见的PFCs。研究^[1]指出,PFCs进入水环境中的途径主要有污水排放、垃圾渗滤液渗透、地表径流、降水以及土地/街道的地表径流。以胶州湾为例,PFCs主要通过沿岸河流汇入、污水厂排放、大气沉降以及渔业4种途径进入水环境中。

考虑到近年来国内外对PFCs的报道日益增

[收稿日期] 2022-08-23

[基金项目] 国家重点研发计划(2022YFC3203705、2022YFC3203704-03);山东省自然科学基金项目(ZR2020ME221)

[作者简介] 何峻伟(1998—),男,硕士,研究方向为水处理理论与技术,E-mail:2212856576@qq.com。

[通信作者] 亓华(1970—),高级工程师,主要从事水处理技术方面研究,E-mail:qihua1969@126.com。

多,加强对 PFCs 的监测管理刻不容缓。PFCs 具有多器官毒性,会影响遗传、生殖,还有研究^[2-3]表明 PFCs 会干扰人体内分泌,且疑似有致癌性。短链 PFCs 虽然毒性较低,但仍对人体健康存在危害,研究^[4]表明,短链 PFCs 可以破坏人体骨髓干细胞的更新以及分化。有学者^[5]对天津市主要河流中的 PCFs 进行了检测,发现 12 组不同位置取到的水样中,PFOA 和 PFOS 检出率都为 100%,并且其中一个取样点由于上游存在使用表面活性剂以及排放废水的工厂,该点位水样中 PFCs 的质量浓度最高,达到 357.85 ng/L。即使在受工业污染影响较弱小的青藏高原区域,研究人员^[6]还是在所有土壤样本中发现了 PFCs,进一步说明 PFCs 已经深入到人类生活中。

目前,国内外对于归纳去除水中 PFCs 的方法研究还不够详细,缺乏系统梳理。本文综述了不同方法降解去除水中 PFCs,并对不同方法的优缺点进行了阐述,以期为未来研究出更加高效的去除方法提供参考。

1 物理方法去除水中 PFCs

近年来,对 PFCs 的去除研究取得了一定的进展,去除水中 PFCs 的物理方法主要有吸附法、离子交换法、过滤法等,不同学者对这些方法进行了研究,以下对不同方法去除水中 PFCs 的优缺点进行了总结。

1.1 吸附法

目前,用于处理水中 PFCs 的常见吸附剂主要是碳材料、矿物材料、金属氧化物等,对水体中的 PFCs 吸附作用机理包括疏水作用、静电作用、络合、离子交换作用、气泡作用、氢键、范德华力、架桥作用等,其中,前三者为主要吸附作用机理。PFCs 是一种疏水、疏油性物质,且多含有中长碳链,碳链越长疏水性越强,因此,在吸附过程中疏水作用常占主导地位^[7];与活性炭、碳纳米管、矿物材料等作吸附剂时,多与静电作用相结合以促进吸附反应^[8];当采用离子交换树脂吸附 PFCs 时,发现短碳链的去除效果不如长链,由此证明疏水作用的存在,此时吸附主要是疏水作用与离子交换作用相结合^[9];多数 PFCs 在反应时以阴离子形式存在于溶液中,故有部分吸附剂可利用自身表面阳离子通过静电引力去除 PFCs,而表面带有负电的吸附剂则会干扰吸附^[10]。

在实际吸附处理过程中,反应多是其中几种吸附作用共同完成。由于各种因素的干扰,吸附剂的吸附容量会在较大的范围内波动,这些吸附剂经过适当的改性处理后吸附性能可大大提高。不同种类的吸附剂对于水体中特定的 PFCs 去除效率可达 80% 以上,但由于水体类型以及 PFCs 种类的不同,吸附法存在一定的局限性,例如在利用粉末活性炭吸附 PFOS 与 PFOA 时,发现水中碳氧双键的存在降低粉末活性炭对 PFOS 和 PFOA 的吸附效率,并且粉末活性炭表面活性点位的数量越多,对 PFOS 的吸附能力越强^[11]。吸附剂中活性炭应用较为广泛,然而,虽然活性炭可以应用于地下水以及饮用水中 PFCs 的去除^[12],但是也需要催化剂,同时随着使用次数的上升,活性炭的吸附能力会逐渐下降。碳纳米管被广泛应用于化学、电子等领域^[13],但是我国对于碳纳米管的相关研究起步较晚,因此,如何提高吸附效率以及降低制备成本仍需进一步研究^[14]。

1.2 离子交换法

离子交换法目前被广泛应用于电子、医药、工业生产以及污染物去除等领域^[15],其中具有代表性的便是用其处理水中污染物。有学者^[9]利用 4 种不同阴离子交换树脂实现对 PFCs 的去除,对质量浓度为 500 ng/L 的全氟戊酸(PFPeA)、全氟庚酸(PFHpA)、全氟己酸(PFHxA)和 PFOA 进行去除研究,发现凝胶型与大孔型聚苯乙烯对上述 PFCs 的去除率均在 80% 以上。但目前的科学技术尚不能满足对树脂的低成本再生,有机溶剂造价偏高,因此,应用于实际的可行性不高^[12]。

1.3 膜处理法

膜处理法主要包括利用纳滤(NF)技术、反渗透(RO)技术以及近年来新兴的正渗透(FO)技术实现对水中 PFCs 的去除。

1.3.1 NF 技术

NF 技术是近些年来发展起来的一项新型的功能膜分离技术,是介于超滤(UF)和 RO 之间的由压力驱动膜分离过程。根据孔径的不同,将 NF 膜分成了不同种类,膜孔径的不同会影响对水体中 PFCs 的去除能力。

对于膜孔致密的 NF90 膜,其对水中 PFOA 等主要类型的 PFCs 去除率达到 80% 以上;而对于孔径疏松的 NFG 膜,其去除率在 10%~80%^[16]。聚酰

胺复合 NF 膜对水中不同浓度 PFOA 的截留率均在 80% 左右,且 PFOA 浓度越高,NF 膜对 PFOA 的截留率越大^[17]。大部分类型的 NF 膜都可达到对水体中 PFCs 的高去除率,NF200、NF270、DL 和 DK 这 4 种 NF 膜对水环境中的特定 PFCs 的去除率均大于 95%^[18]。同时,NF 膜成本低、截留率高并且不易污染水环境^[19],使其具有较高的研究前景。

然而,单一的 NF 技术存在许多局限性,因此,将 NF 技术与其他技术联用成为了近年来的研究热点。芳香聚酰胺 NF 膜便是其中具有代表性的膜产品,聚酰胺 NF 膜具有脱盐率高和通量大的优点,将芳香聚酰胺用作 NF 膜材料,能够耐受大多数有机溶剂。其大分子主链上存在苯环,由此制备的 NF 膜的热稳定性和耐压密性比醋酸纤维素膜强,同时,它具有好的化学稳定性,能耐强碱、有机溶剂、高温,机械强度高。利用芳香聚酰胺 NF 膜在 25 ℃、1.0 MPa 下,对不同浓度梯度的 PFOS 溶液进行处理,发现随着浓度的上升,芳香聚酰胺 NF 膜对 PFOS 的去除率也会随之上升^[20]。

1.3.2 RO 技术

相较于 NF 膜法,RO 膜对 PFCs 去除率更高,研究^[21]显示,利用聚酰胺商用膜进行 RO 处理质量浓度为 0.5~1 500 mg/L 的 PFOS 时去除率在 99% 左右。然而二者对于 PFCs 只能进行截留,而不能做到去除,因此,利用单一过滤法不结合化学方法较难去除水中 PFCs。单独使用 NF 膜或者 RO 膜工艺处理 PFCs 废水会造成二次污染,且能耗较大,工艺流程复杂,所以越来越多的学者将膜处理技术与其他处理方法联合,达到净化废水的目的^[22]。近年来,以聚丙烯腈(PAN) UF 膜为支撑体,在 PAN 膜表面以均苯三酰氯(TMC)和间苯二胺(MPD)为单体进行界面聚合反应制备 RO 复合膜的研究十分火热。利用 RO 膜对不同浓度的 PFOS 进行处理,发现 RO 膜对 PFOS 的去除率均在 90% 以上^[21]。同时,RO

膜可以在确保高效去除水体中 PFOA 的前提下,在物理冲洗后实现 RO 膜的再生,效率可达 85% 以上^[23]。

1.3.3 FO 技术

FO 技术是兴起的一种新型膜分离技术,是以选择性分离膜两侧的渗透压差为驱动力,使得水分子由原料液侧通过选择性分离膜向汲取液传递,最终使溶质分子或离子被阻挡的一种膜分离过程。FO 过程不需要施加外压,因此,有望在很大程度上实现低能耗,从而实现低成本。

氯化银矿化改性膜相比未改性的原始膜表现出更高的水通量和 PFCs 截留率,并发现随着矿化程度的上升,氯化银表面改性 FO 膜对水中的 PFOA 以及 PFOS 去除率呈现先上升后下降趋势,但总体去除率都维持在 90% 以上^[24]。

1.4 絮凝沉淀法

絮凝沉淀法可以处理不同类型的饮用水和废水,但是单纯的混凝沉淀对于水体中 PFCs 的去除效果较低,将电极与混凝沉淀过程相结合,在处理有机污染物方面比其他技术具有更高的效率^[25]。由于处理后水质较好且污泥生成量低,电絮凝技术被认为可以处理高浓度工业废水。电絮凝过程中会产生一些金属氢氧化物,依靠疏水作用可以去除水中 PFOA 和 PFOS,研究^[26]显示,二者在 0.5 mmol/L 溶液中在经过 50 min 电絮凝后,去除率分别为 78% 和 99%。利用电絮凝对人工合成地下水中的 PFCs 进行去除,在最佳电压下,10 min 内对全氟丁基磺酸(PFBS)、PFHxS 和 PFOS 的去除率分别达到 87.4%、95.6% 和 100.0%^[27]。虽然电絮凝会去除部分 PFCs,但是会在过程中产生一些毒性高的副产物^[28],同时在不同 pH 条件下,电絮凝对于水体中 PFCs 的去除效率相差可达 60% 左右^[29]。

不同物理方法在最佳条件下对 PFCs 去除率如表 1 所示。

表 1 不同物理方法在最佳条件下对 PFCs 去除率

Tab. 1 Removal Rates of PFCs by Different Physical Methods under Optimum Conditions

方法	材料	进水浓度	具体 PFASs	去除率	参考文献
吸附法	多壁碳纳米管	50 μg/L	PFOA	88.9%	[30]
		50 μg/L	PFOS	90.0%	
离子交换法	硝酸盐插层水滑石	100 mg/L	PFOS	99.7%	[31]
	凝胶型聚苯乙烯树脂	500 ng/L	PFOA	95.0%	[9]

(续表1)

方法	材料	进水浓度	具体 PFASs	去除率	参考文献			
膜处理法	大孔型聚苯乙烯树脂	500 ng/L	全氟丁酸(PFBA)	80.0%	[32]			
		500 ng/L	PFOA	95.0%				
		500 ng/L	PFHpA	56.0%				
		PAC-IRA67	0.29 mmol/L(单一溶质)	PFOA		91.0%		
		0.11 mmol/L(单一溶质)	PFHpA	88.0%				
		0.29 mmol/L(模拟工业废水)	PFOA	60.0%				
		0.11 mmol/L(模拟工业废水)	PFHpA	20.0%				
	NFG 膜	100 μg/L	PFOA	55.0%±2.3%		[16]		
			PFBA	16.0%±1.6%				
		NF90 膜	100 μg/L	PFOA			96.0%±0.5%	
			100 μg/L	PFBA			91.0%±1.3%	
		聚酰胺复合 NF 膜	5 μg/L	PFOA			77.4%~91.0%	[17]
			50 μg/L	PFOA			85.9%~94.0%	
		芳香聚酰胺 NF 膜	10 μg/L	PFOS			42.1%	[20]
			500 μg/L	PFOS			96.7%	
芳香聚酰胺 RO 膜		1 600 μg/L	PFOS	90%以上	[21]			
氯化银矿化改性膜		10 μg/L	PFOA	90.3%~96.2%	[24]			
	10 μg/L	PFOS	89.0%~95.7%					
絮凝沉淀法	Fe 电极	0.5 mmol/L	PFOA	99.6%	[28]			
			PFOS	72.9%				
	Al 电极	0.5 mmol/L	PFOA	78.3%				
			PFOS	57.5%				
	Al-Zn 电极	31 μg/L(合成水溶液)	PFBS	87.4%		[27]		
		31 μg/L(天然地下水)		59.0%				
		0.8 μg/L(合成水溶液)	PFHxS	95.6%				
		0.8 μg/L(天然地下水)		88.2%				
	0.5 μg/L(合成水溶液)	PFOS	100.0%					
	0.5 μg/L(天然地下水)		100.0%					

1.5 未来发展趋势研判

利用物理方法实现对水中 PFCs 的去除具有不产生其他污染物以及处理工艺简单等优点。但随着人们对于水中新污染物处理效果需求的提高,单一的物理吸附、离子交换效果会随着处理时间、处理次数的上升而降低。就吸附而言,吸附材料自身的性质,如粒径大小等会影响对水中 PFCs 的处理效果,而且物理吸附只是将 PFCs 从一种载体上转移到另一载体上,污染物根本没有得到降解,其后续的处置可能会造成二次污染。

近年来,兴起在过氧化一硫酸盐(PMS)存在的

条件下,将新鲜活性炭(FAC)与氮掺杂活性炭(NAC)联用加速对水体中 PFCs 的吸附^[33],虽然可以提高吸附效率,但造价较高。

相较于吸附,离子交换树脂对水中 PFCs 的去除效果较差,并且造价过高;单一的膜处理工艺优点是膜组件简单、自动化率高且维护容易,然而去除能力较差。膜处理工艺与其他技术联用去除水中 PFCs 成为一大热点,并且试验阶段的去除率可达 90%以上,去除效果较好。目前,国内对含有 PFCs 实际水源的膜处理耦合工艺的研究较为匮乏,膜处理耦合工艺能否去除 PFCs 仍需要进一步研究,为

PFCs 在面对水源的突发性污染事故的应急处理提供依据。

2 化学方法降解去除水中 PFCs

2.1 电化学氧化法

近年来,电化学氧化法被广泛用于水处理领域,在室温以及高电流密度的条件下,通过电化学氧化促进水溶液产生 $\cdot\text{OH}$ ^[34],依靠 $\cdot\text{OH}$ 的强氧化性去除水中 PFCs。Lin 等^[35]研究了 PFOA 溶液在不同电极材料氧化作用下的去除效果,分别采用 Ti/SnO₂-Sb、Ti/SnO₂-Sb/PbO₂、Ti/SnO₂-Sb/MnO₂ 作为电极材料,对 100 mg/L 溶液的脱氟率分别为 72.9%、77.4%、45.6%。还有学者^[36]利用不锈钢板为阳极和阴极的电化学氧化反应器深度处理污水中 PFCs,在最佳条件下,对水中 PFCs 的去除率为 23.5%~51.8%。

近年来广受欢迎的碳纳米管-石墨烯复合电极对水中 PFCs 的去除率可达 96.9%左右,并且反应时间仅为 4 h^[37]。不仅是普通的金属电极,利用金纳米颗粒嵌入聚丙烯酸(PAA)/聚烯丙基胺盐酸盐(PAH)水凝胶纤维上,在提高表面电荷传输速率的同时,也提高了对水体中 PFCs 的去除率^[38]。

但电化学氧化法处理水体会产生诸多副产物,降低 PFCs 去除率,比如在降解过程中会产生较短碳链的 PFCs,同时还会产生无机副产物,例如高氯酸盐^[39]。

2.2 超声降解法

超声降解法原理是超声波对于溶液进行辐照的时候能够形成高温的气泡与氧化性较强的物质^[40]。对于降解 PFOS 和 PFOA 来说,超声波较好频率为 358 kHz^[41]。在碱性条件下超声降解 PFOA,随着试验中 NaOH 投加量的上升,PFOA 的降解率由 64% 上升到 92.0%左右^[42]。设备和技术不成熟、生产成本高等因素限制了超声降解的大规模生产,而且溶液 pH、黏滞系数、表面张力系数、溶液温度等因素对超声降解的影响也较大,因此,超声氧化大规模应用还需进一步研究^[43]。

2.3 O₃ 氧化法

O₃ 氧化是指利用 O₃ 和水体内污染物反应消除难降解有机物的化学过程,且在 O₃ 分解过程中生成的 $\cdot\text{OH}$ 可以加快反应进程^[22]。当溶液 pH 为强碱性时,可以加快水中 O₃ 氧化为 $\cdot\text{OH}$,在溶液 pH

值约为 11 时,在最佳条件下 O₃ 氧化对水中 PFOA 去除率为 92.0%左右,并且可以完全去除 PFOS^[44]。

O₃ 氧化技术成本低廉、反应速率快并且产生的消毒副产物大多无毒,但在实际应用中由于废水种类复杂且无法控制环境因素^[45],很难实现对 PFCs 的高效去除率。当溶液 pH 值在 11 以下甚至接近中性时,O₃ 对水中 PFCs 去除率较低,O₃ 对水中 PFOA 去除率一般在 10%~20%^[46]。虽然有学者^[47]利用 TiO₂ 光催化 O₃ 氧化耦合体系提高了 PFOA 降解效率,但对水中 PFOA 去除率也仅为 44.3%。

因此,虽然 TiO₂ 光催化氧化技术相较于普通 O₃ 氧化法去除效率有所提高,但仍然降解速率慢并且脱氟率偏低^[48]。

2.4 Fenton 氧化法

Fenton 氧化法对降解高浓度的有机污染物具有明显优势,是一种具有潜力的废水处理技术,在水处理中经典 Fenton 试剂的作用是有有机物氧化和混凝^[49]。Fenton 具有对环境友好、费用便宜、设备安装简便、操作过程简单以及反应速度快等优点^[50],与 Fenton 系统联用技术去除 PFCs 也被广泛应用于各水厂。Fenton 体系与光或光电联用会提升水中 PFCs 的去除率。

2.4.1 UV-Fenton 氧化技术

UV-Fenton 氧化技术是一种将难降解有机污染物氧化为易降解产物,并提高降解效率的新型改进技术^[51-52]。UV 不仅可以促进 Fe³⁺ 向 Fe²⁺ 的转化,还可以缩短有机物氧化时间并且提高分解效率^[53]。UV-Fenton 法对水中常见 PFCs 的去除率较高,在波长为 185 nm 的 UV 光源照射、pH 值为 5、温度为 50 °C 的最佳条件下反应 20 h 后,UV-Fenton 法对水中 PFOA 的去除率达到 48.32%,同时,在其他最佳条件下对水中全氟三丁胺(PFTBA)去除率为 59.31%^[54]。UV-Fenton 法对两种常见 PFCs 的降解均产生了正向效果,并且 UV-Fenton 法的脱氟率相较于其他处理方法较高,降解过程安全,可靠性高。

2.4.2 光-电-Fenton 氧化技术

在 Fenton 体系中引入光能和电能构建光-电-Fenton 氧化技术,协同催化有机物的降解。UV 的照射可以加速产生 $\cdot\text{OH}$,同时 UV 能够促进 Fe²⁺ 向 Fe³⁺ 的转化^[55]。

目前光-电-Fenton 高级氧化技术已成为研究热点,由此引申出的太阳能光电类 Fenton 体系可以实现对 PFOA 的高效降解。在最佳反应条件下,120 min 内对 PFOA 去除率可达 99.0% 左右,同时 TOC

去除率也可达 91% 左右^[56],因此,光-电-Fenton 联用氧化技术可以去除水中大部分 PFCs。

不同化学方法在最佳条件下对 PFCs 去除率如表 2 所示。

表 2 不同化学方法在最佳条件下对 PFCs 去除率
Tab. 2 Removal Rates of PFCs by Different Chemical Methods under Optimum Conditions

方法	材料及处理条件	进水浓度	PFASs	去除率	参考文献
电化学氧化法	Ti/SnO ₂ -Sb 电极	100 mg/L	PFOA	72.9%	[35]
	Ti/SnO ₂ -Sb/PbO ₂ 电极	100 mg/L	PFOA	77.4%	
	Ti/SnO ₂ -Sb/MnO ₂ 电极	100 mg/L	PFOA	45.6%	
	不锈钢电极	5.46 ng/L	PFOA	46.3%	[36]
超声降解法	投加 NaOH 物质的量浓度为 800 mmol/L 投加过硫酸盐物质的量浓度为 0.93 mmol/L	6.16 ng/L	PFOS	51.8%	
		100 μmol/L	PFOA	约 96.9%	[37]
		12.1 μmol/L	PFOA	约 92.0%	[42]
O ₃ 氧化法	240 min O ₃ 预氧化处理	18.6 μmol/L	PFOS	99.5%	[57]
		33.6 μg/L	PFOA	约 92.0% (pH 值=11)	[44]
	15 min O ₃ 预氧化处理	8.0 μg/L	PFOS	约 100.0% (pH 值=11)	
		11.7 μg/L	PFOA	6.0% (pH 值=7)	[46]
Fenton 氧化法	UV-Fenton 光-电-Fenton	4.1 μg/L	PFNA	27.2% (pH 值=7)	
		0.01 mol/L	PFOA	48.32%	[54]
		1 μg/L	PFOA	约 99.0%	[56]

2.5 未来发展趋势研判

化学方法可以实现对水中 PFCs 的去除,并且在最佳条件下,去除率可以稳定在 80% 以上,具有较为广阔的研究前景。

电化学对水体中 PFCs 的去除率上下浮动明显,目前存在 2 个拥有巨大研究前景的方向:其一是找寻到一种高效、廉价的电极;其二是与其他技术联用实现高效去除。然而,例如光降解等新兴技术,虽然相对其他化学方法而言可以保证试验的安全性,但是目前的相关研究也仅仅停留在超纯水以及 PFCs 模拟水体中^[58],与实际水体存在一定差距,使得真实的去除率与试验数据有所出入,今后可以加大对实际水体的研究。在最佳试验条件下,超声降解相较于电化学氧化,对水中 PFCs 的去除率相对较高,但要控制好超声频率,水中 PFCs 的去除率会随着超声频率的上升而先上升后下降。O₃ 氧化技术目前较为成熟,但要控制好试验进行过程中的 pH 变化,弱碱性的水体去除率明显高于中性水体。

3 结论与展望

PFCs 带来的环境问题也日益严重不可忽视,物

理方法具有操作简便、不产生多余反应副产物以及经济效益高的优点,同时还可以对其进行回收再利用,但无法从根本上实现对水中 PFCs 的去除。化学方法虽然可以通过破坏碳氟键实现对水中 PFCs 的大部分去除,但能耗过高,同时将长链 PFCs 降解为短链 PFCs 后仍具有相似毒性。

目前比较理想的处理技术是氧化和膜处理,在未来可以考虑多种技术耦合使用。我国学者对于 PFCs 去除的研究较为局限,大部分去除研究也仅局限在 PFOA 以及 PFOS 等常见 PFCs,接下来可以加大对其他种类 PFCs 去除的研究。并且各类研究都集中在实验室模拟水体或者地表水体,对地下水研究甚少,建议加大对地下水中 PFCs 的检测力度,建立简单经济的 PFCs 检测方法,为地下水中 PFCs 的治理提供研究资料。目前多个领域对 PFCs 替代品需求巨大,加大对 PFCs 替代品的研究力度,可以使得目前 PFCs 造成的环境污染得到缓解。

参考文献

[1] 韩同竹. 胶州湾海水和生物体中全氟化合物的分布特征及来

- 源解析[D]. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所, 2018.
- HAN T Z. Distribution and potential sources of perfluoroalkyl substances (PFASs) in Jiaozhou Bay[D]. Qingdao: The First Institute of Oceanography, SOA. 2018.
- [2] GALLO V, LEONARDI G, BRAYNE C, et al. Serum perfluoroalkyl acids concentrations and memory impairment in a large cross-sectional study [J]. *BMJ Open*, 2013, 3 (6): e2414. DOI:10.1136/bmjopen-2012-002414.
- [3] GRANDJEAN P, ANDERSEN E W, BUDTZ-JØRGENSEN E, et al. Serum vaccine antibody concentrations in children exposed to perfluorinated compounds[J]. *JAMA*, 2012, 307 (4): 391–397.
- [4] LIU S, YANG R, YIN N, et al. The short-chain perfluorinated compounds PFBS, PFHxS, PFBA and PFHxA, disrupt human mesenchymal stem cell self-renewal and adipogenic differentiation [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2020, 88: 187–199. DOI: 10.1016/j.jes.2019.08.016.
- [5] 武倩倩, 吴强, 宋帅, 等. 天津市主要河流和土壤中全氟化合物空间分布、来源及风险评价[J]. *环境科学*, 2021, 42 (8): 3682–3694.
- WU Q Q, WU Q, SONG S, et al. Distribution, sources, and risk assessment of polyfluoroalkyl substances in main rivers and soils of Tianjin [J]. *Environmental Science*, 2021, 42 (8): 3682–3694.
- [6] 温祥洁, 陈朝辉, 徐维新, 等. 青藏高原东北部地区表层土壤中全氟化合物的分布特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2022, 43(6): 3253–3261.
- WEN X J, CHEN Z H, XU W X, et al. Distribution characteristics and source apportionment of perfluoroalkyl substances in surface soils of the northeast Tibetan Plateau[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(6): 3253–3261.
- [7] 宋彦敏, 周连宁, 郝文龙, 等. 全氟化合物的污染现状及国内外研究进展[J]. *环境工程*, 2017, 35(10): 82–86.
- SONG Y M, ZHOU L N, HAO W L, et al. Pollution status and related research progress of perfluorinated compounds [J]. *Environmental Engineering*, 2017, 35(10): 82–86.
- [8] LIU L, LIU Y, GAO B, et al. Removal of perfluorooctanoic acid (PFOA) and perfluorooctane sulfonate (PFOS) from water by carbonaceous nanomaterials: A review[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2020, 50(22): 2379–2414.
- [9] 孙博, 马军. 离子交换树脂对水中全氟羧酸的吸附去除[J]. *水处理技术*, 2017, 43(1): 22–26.
- SUN B, MA J. Adsorption and removal of perfluorocarboxylic acid in water by ion exchange resin [J]. *Technology of Water Treatment*, 2017, 43(1): 22–26.
- [10] MENG P P, F X L, MAIMAITI A, et al. Efficient removal of perfluorinated compounds from water using a regenerable magnetic activated carbon[J]. *Chemosphere*, 2019, 224: 187–194. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.02.132.
- [11] JIN Q, MENG M S, WANG P, et al. Perfluorooctane sulfonate adsorption on powder activated carbon: Effect of phosphate (P) competition, pH, and temperature[J]. *Chemosphere*, 2017, 182: 215–222. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2017.05.033.
- [12] 洪雷, 丁倩云, 亓祥坤, 等. 吸附法去除水中全氟化合物的研究进展[J]. *环境化学*, 2021, 40(7): 2193–2203.
- HONG L, DING Q Y, QI X K, et al. The research progress of removing perfluoroalkyl substances by adsorption in water [J]. *Environmental Chemistry*, 2021, 40(7): 2193–2203.
- [13] 闫妮. 碳纳米管在水环境中的悬浮稳定性及对典型全氟化合物的吸附[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2021.
- YAN N. Suspension stability of carbon nanotubes in water environment and adsorption of typical perfluorinated compounds [D]. Xianyang: Northwest A&F University, 2021.
- [14] 张晓旭, 季永利, 秦旭东, 等. 碳纳米管在水处理中的应用进展研究[J]. *现代工业经济和信息化*, 2017, 7(10): 29–30.
- ZHANG X X, JI Y L, QIN X D, et al. Study on the application of carbon nanotubes in water treatment [J]. *Modern Industrial Economy and Informationization*, 2017, 7(10): 29–30.
- [15] 张全兴, 张政朴, 李爱民, 等. 我国离子交换与吸附树脂的发展历程回顾与展望[J]. *高分子学报*, 2018(7): 814–828.
- ZHANG Q X, ZHANG Z P, LI A M, et al. Review and prospect of the development of ion exchange and adsorption resins in China [J]. *Acta Polymerica Sinica*, 2018(7): 814–828.
- [16] 李木. 纳滤膜去除水中全氟化合物的效能与机制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- LI M. Study on the efficiency and mechanism of nanofiltration membrane in removing perfluorocarbons from water [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [17] 王佳璇, 胡御宁, 岳向雷, 等. 溶液特性及共存物对纳滤膜去除水中全氟辛酸的影响[J]. *中国环境科学*, 2022, 42 (2): 665–671.
- WANG J X, HU Y N, YUE X L, et al. Effects of solution characteristics and coexisted substances on the removal of perfluorooctanoic acid from water by nanofiltration membrane [J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(2): 665–671.
- [18] STEINLE-DARLING E, REINHARD M. Nanofiltration for trace organic contaminant removal: Structure, solution, and membrane fouling effects on the rejection of perfluorochemicals [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42 (14): 5292–5297.
- [19] 赵长伟, 唐文晶, 贾文娟, 等. 纳滤去除水中新兴污染物的研究进展[J]. *膜科学与技术*, 2021, 41(1): 144–151.
- ZHAO C W, TANG W J, JIA W J, et al. Research progress of nanofiltration for removal of emerging pollutants in water [J]. *Membrane Science and Technology*, 2021, 41(1): 144–151.

- [20] 张祥波. 新型纳滤膜的制备及其在水处理中的应用[D]. 济南: 济南大学, 2014.
ZHANG X B. Preparation of new nanofiltration membrane and its application in water treatment[D]. Jinan: University of Jinan, 2014.
- [21] 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): 7343-7349.
- [22] 张春晖, 刘育, 唐佳伟, 等. 典型工业废水中全氟化合物处理技术研究进展[J]. *中国环境科学*, 2021, 41(3): 1109-1118.
ZHANG C H, LIU Y, TANG J W, et al. Progress of research on treatment technology of perfluorinated compounds in typical industrial wastewater[J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(3): 1109-1118.
- [23] WANG Z, SU W, ZHANG Y. Reverse osmosis membrane design for reclamation and removal of perfluorooctanoic acid[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2021, 237: 32-36. DOI: 10.5004/dwt.2021.27745.
- [24] 金海洋, 余婵, 张为, 等. 改性正渗透膜去除水中全氟化合物研究[J/OL]. *长江科学院院报*: 1-9. (2022-09-07) [2023-01-08]. <https://kns-cnki-net.webvpn.sdjzu.edu.cn/kcms/detail/42.1171.TV.20220907.1552.008.html>.
JIN H Y, YU C, ZHANG W, et al. Removal of perfluorinated compounds from water by modified forward osmosis membrane[J/OL]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*: 1-9. (2022-09-07) [2023-01-08]. <https://kns-cnki-net.webvpn.sdjzu.edu.cn/kcms/detail/42.1171.TV.20220907.1552.008.html>.
- [25] WANG Y, YAN J N, LI Z Y, et al. The mechanism of removing the organic matter in heavy oil sewage by the electric flocculation method[J]. *Petroleum Science and Technology*, 2014, 32(13): 1529-1536.
- [26] YANG B, HAN Y N, YU G, et al. Efficient removal of perfluoroalkyl acids (PFAAs) from aqueous solution by electrocoagulation using iron electrode[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 303: 384-390. DOI: 10.1016/j.cej.2016.06.011.
- [27] BAO J, YU W, LIU Y, et al. Removal of perfluoroalkane-sulfonic acids (PFSAs) from synthetic and natural groundwater by electrocoagulation[J]. *Chemosphere*, 2020, 248: 125951. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.125951.
- [28] KIM M K, KIM T, KIM T K, et al. Degradation mechanism of perfluorooctanoic acid (PFOA) during electrocoagulation using Fe electrode[J]. *Separation and Purification Technology*, 2020, 247: 116911. DOI: 10.1016/j.seppur.2020.116911.
- [29] PENSINI E, DINARDO A, LAMONT K, et al. Effect of salts and pH on the removal of perfluorooctanoic acid (PFOA) from aqueous solutions through precipitation and electroflocculation[J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2019, 46(10): 881-886.
- [30] 王双瑀. 电增强碳纳米管/活性炭纤维吸附 PFOA、PFOS 的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
WANG S Y. Study on the adsorption of PFOA and PFOS on electrically enhanced carbon nanotubes/activated carbon fibers[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
- [31] HU Z, SONG X, WEI C, et al. Behavior and mechanisms for sorptive removal of perfluorooctane sulfonate by layered double hydroxides[J]. *Chemosphere*, 2017, 187: 196-205. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2017.08.082.
- [32] DU Z, DENG S, CHEN Y, et al. Removal of perfluorinated carboxylates from washing wastewater of perfluorooctanesulfonyl fluoride using activated carbons and resins[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, 286: 136-143. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2014.12.037.
- [33] LIU G, LI C, STEWART B A, et al. Enhanced thermal activation of peroxymonosulfate by activated carbon for efficient removal of perfluorooctanoic acid[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 399: 125722. DOI: 10.1016/j.cej.2020.125722.
- [34] 鲍佳, 聂青宇, 马嘉川, 等. 水中全氟和多氟化合物的去除技术最新研究进展[J]. *江西农业学报*, 2019, 31(11): 58-65.
BAO J, NIE Q Y, MA J C, et al. Recent research progress in removal technology of perfluorinated and polyfluorinated compounds in water[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2019, 31(11): 58-65.
- [35] LIN H, NIU J, DING S, et al. Electrochemical degradation of perfluorooctanoic acid (PFOA) by Ti/SnO₂-Sb, Ti/SnO₂-Sb/PbO₂ and Ti/SnO₂-Sb/MnO₂ anodes[J]. *Water Research*, 2012, 46(7): 2281-2289.
- [36] ZHANG C, WANG L, LI J, et al. Removal of perfluorinated compounds in wastewater treatment plant effluents by electrochemical oxidation[J]. *Water Science and Technology*, 2015, 71(12): 1783-1789.
- [37] NIU Z J, WANG Y J, LIN H, et al. Electrochemically enhanced removal of perfluorinated compounds (PFCs) from aqueous solution by CNTs-graphene composite electrode[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 328: 228-235. DOI: 10.1016/j.cej.2017.07.033.
- [38] HWANG J H, LI S Y Y, KIM K T, et al. Nanoparticle-embedded hydrogel synthesized electrodes for electrochemical oxidation of perfluorooctanoic acid (PFOA) and perfluorooctane-sulfonic acid (PFOS)[J]. *Chemosphere*, 2022, 296: 134001. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.134001.
- [39] LIN H, NIU J F, XU J L, et al. Highly efficient and mild electrochemical mineralization of long-chain perfluorocarboxylic

- acids (C₉-C₁₀) by Ti/SnO₂-Sb-Ce, Ti/SnO₂-Sb/Ce-PbO₂, and Ti/BDD electrodes [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(22): 13039-13046.
- [40] 李垣皓, 林秋风, 罗峰, 等. 全氟有机化合物污染近况及去除技术探讨[J]. *水处理技术*, 2018, 44(9): 7-11.
LI Y H, LIN Q F, LUO F, et al. Recent situation of perfluoride pollution and its removal technology [J]. *Technology of Water Treatment*, 2018, 44(9): 7-11.
- [41] 赵德明, 丁成, 徐新华, 等. 超声波降解全氟辛酸磺酸和全氟辛酸的动力学[J]. *化工学报*, 2011, 62(3): 829-835.
ZHAO D M, DING C, XU X H, et al. Kinetics of perfluorooctane sulfonate and perfluorooctanoate degradation by ultrasound irradiation [J]. *CIESC Journal*, 2011, 62(3): 829-835.
- [42] 顾玉蓉, 陈鑫焯, 董紫君, 等. 碱性条件下的高频超声降解全氟辛酸[J]. *净水技术*, 2021, 40(12): 116-121.
GU Y R, CHEN X Y, DONG Z J, et al. Degradation of perfluorooctanoic acid by high-frequency ultrasound in alkaline solution [J]. *Water Purification Technology*, 2021, 40(12): 116-121.
- [43] 王子朝, 张迪, 盛丽丽, 等. 超声降解影响多糖理化特性和生物活性研究进展[J]. *河南工业大学学报(自然科学版)*, 2021, 42(6): 121-126.
WANG Z Z, ZHANG D, SHENG L L, et al. Research advances of ultrasound degradation on physicochemical property and biological activity of polysaccharides [J]. *Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition)*, 2021, 42(6): 121-126.
- [44] LIN A Y, PANCHANGAM S C, CHANG C, 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.
- [45] 惠海涛. 臭氧氧化技术在水处理中的应用进展[J]. *工业用水与废水*, 2019, 50(2): 6-9.
HUI H T. Application progress of ozone oxidation technology in water treatment [J]. *Industry Water & Wastewater*, 2019, 50(2): 6-9.
- [46] LEE S, CHO Y, LEE M, et al. Detection and treatment methods for perfluorinated compounds in wastewater treatment plants [J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(12): 2500. DOI: 10.3390/app9122500.
- [47] 李来胜, 黄继业. TiO₂ 光催化臭氧氧化降解全氟辛酸的研究 [J]. *华南师范大学学报(自然科学版)*, 2016, 48(6): 106-110.
LI L S, HUANG J Y. Efficient degradation of perfluorooctanoic acid by TiO₂-mediated photocatalytic ozonation [J]. *Journal of South China Normal University (Natural Science Edition)*, 2016, 48(6): 106-110.
- [48] 李明洁, 喻泽斌, 陈颖, 等. TiO₂ 光催化降解 PFOA 的反应动力学及机制研究 [J]. *环境科学*, 2014, 35(7): 2612-2619.
LI M J, YU Z B, CHEN Y, et al. Photocatalytic degradation kinetics of perfluorooctanoic acid (PFOA) in TiO₂ dispersion and its mechanism [J]. *Environmental Science*, 2014, 35(7): 2612-2619.
- [49] 李章良, 黄建辉. Fenton 试剂氧化机理及难降解有机工业废水处理研究进展 [J]. *韶关学院学报*, 2010, 31(3): 66-72.
LI Z L, HUANG J H. Research progress on oxidation mechanism of Fenton reagent and treatment of refractory organic industrial wastewater [J]. *Journal of Shaoguan University*, 2010, 31(3): 66-72.
- [50] 胡俊生, 郭金彤. Fenton 高级氧化技术在印染废水处理上的研究进展 [J]. *当代化工研究*, 2021(9): 98-99.
HU J S, GUO J T. Research progress of Fenton advanced oxidation technology in printing and dyeing wastewater treatment [J]. *Modern Chemical Research*, 2021(9): 98-99.
- [51] 李秀玲, 邓丽霞, 黄静梅, 等. 光催化过氧化氢对甲基橙废水的脱色性能研究 [J]. *环境科技*, 2020, 33(5): 35-39.
LI X L, DENG L X, HUANG J M, et al. Study on decolorization of methyl orange wastewater by photocatalytic hydrogen peroxide [J]. *Environmental Science and Technology*, 2020, 33(5): 35-39.
- [52] 侯俊伟, 王德民, 林涛. 城市给水厂沉淀池排泥水 UV/H₂O₂ 处理回用技术研究 [J]. *环境科技*, 2021, 34(5): 42-46.
HOU B W, WANG D M, LIN T. The UV/H₂O₂ pretreatment reuse technology research on tank platoon sludge of urban drinking water treatment [J]. *Environmental Science and Technology*, 2021, 34(5): 42-46.
- [53] 王翔, 夏金雨, 陈三兵, 等. UV/Fenton 法处理含镍高浓度有机废水的研究 [J]. *山东化工*, 2021, 50(21): 231-233.
WANG X, XIA J Y, CHEN S B, et al. Treatment of industrial wastewater containing heavy metals and high concentrations of organic pollutants by UV/Fenton technology [J]. *Shandong Chemical Industry*, 2021, 50(21): 231-233.
- [54] 刘泽. UV 光催化氧化体系降解几种全氟有机化合物研究 [D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2016.
LIU Z. Study on degradation of perfluorinated organic compounds by UV photocatalytic oxidation system [D]. Xianyang: Northwest A&F University, 2016.
- [55] 杨洁, 储海蓉, 胡俊, 等. 光/电 Fenton 耦合处理退浆废水中聚乙烯醇 [J]. *南京工业大学学报(自然科学版)*, 2013, 35(3): 66-69.
YANG J, CHU H R, HU J, et al. Treatment of polyvinylalcohol by photo-electro-Fenton oxidation in desizing wastewater [J]. *Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science Edition)*, 2013, 35(3): 66-69.

(下转第 172 页)

参考文献

- [1] 朱圆圆, 杜平, 徐百龙, 等. AAO-MBR 工艺在大型地下式污水处理厂中的应用[J]. 净水技术, 2022, 41(s1): 274-278.
ZHU Y Y, DU P, XU B L, et al. Application of AAO-MBR process in large underground WWTP [J]. Water Purification Technology, 2022, 41(s1): 274-278.
- [2] 李一龙, 包宇. UCT-MBR 工艺在北京市某污水处理厂提标扩容改造中的设计及运行[J]. 净水技术, 2022, 41(1): 147-152.
LI Y L, BAO Y. Design and operation of UCT-MBR process in upgrading and expansion project of a WWTP in Beijing City[J]. Water Purification Technology, 2022, 41(1): 147-152.
- [3] 于翔, 李捷, 罗凡. AAOA-MBR 工艺在工程中的应用分析[J]. 水处理技术, 2021, 47(3): 133-136.
YU X, LI J, LUO F. Applied analysis of AAOA-MBR process in actual wastewater treatment project [J]. Technology of Water Treatment, 2021, 47(3): 133-136.
- [4] 周华, 夏海波, 张和英. 水解酸化-MBR-臭氧工艺在印染废水处理中的应用[J]. 给水排水, 2021, 47(9): 81-84.
ZHOU H, XIA H B, ZHANG H Y. Treatment of dyeing wastewater by combination of hydrolysis acidification-MBR-O₃ [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(9): 81-84.
- [5] 高伟楠. A²O+MBR 工艺用于北方某再生水厂提标扩建工程[J]. 中国给水排水, 2020, 36(12): 91-95.
GAO W N. Application of A²O+MBR process in the upgrading and expansion project of a water reclamation plant in north China [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(12): 91-95.
- [6] 高术波. 多级 AO+MBR 工艺在污水厂提标改造中的应用——以北京某污水厂为例[J]. 净水技术, 2020, 39(8): 28-31.
GAO S B. Application of multilevel AO+MBR process in upgrading and reconstruction project—Case study of a WWTP in Beijing [J]. Water Purification Technology, 2020, 39(8): 28-31.
- [7] 胡杰. 西安市某县污水处理厂提标改造的技术研究[D]. 西安: 西北大学, 2019.
HU J. Technical research on bidding improvement of sewage treatment plant in a county of Xi'an City [D]. Xi'an: Northwest University, 2019.
- [8] 许忠凤, 戴海平, 孙磊, 等. 多级 A/O-MBR 工艺对生活污水脱氮除磷的工艺研究[J]. 水处理技术, 2019, 45(11): 117-126.
XU Z F, DAI H P, SUN L, et al. Study on multistage A/O-MBR process for nitrogen and phosphorus removal from domestic sewage [J]. Technology of Water Treatment, 2019, 45(11): 117-126.
- [9] 马旭蛟. A/O/A-MBR 工艺处理低 C/N 污水与膜污染初步研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
MA X J. The preliminary study on low C/N wastewater treatment and membrane fouling of A/O/A-MBR process [D]. Harbin: Harbin University of Technology, 2021.
- [10] 杨宇星, 吴迪, 宋美芹, 等. 新型 MBBR 用于类地表 IV 类水排放标准升级改造[J]. 中国给水排水, 2017, 33(14): 93-98.
YANG Y X, WU D, SONG M Q, et al. Application of new MBBR in WWTP upgrading to meet class IV surface water standard [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(14): 93-98.
- [11] 常尧枫, 谢嘉玮, 谢军祥, 等. 城镇污水处理厂提标改造技术研究进展[J]. 中国给水排水, 2022, 38(6): 20-28.
CHANG Y F, XIE J W, XIE J X, et al. Research progress on upgrading and reconstruction technology of urban sewage treatment plants [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(6): 20-28.
- [12] 范亚骏, 张森, 季俊杰, 等. A²/O-BCO 系统中碳源类型对反硝化除磷及菌群结构的影响[J]. 中国环境科学, 2022, 42(1): 172-182.
FAN Y J, ZHANG M, JI J J, et al. Effect of carbon source types on denitrifying phosphorus removal and microbial community in the A²/O-BCO process [J]. China Environmental Science, 2022, 42(1): 172-182.
- [13] 卞晓峥, 闫阁, 黄健平, 等. 双污泥系统反硝化除磷新工艺研究进展[J]. 水处理技术, 2021, 47(7): 19-24.
BIAN X Z, YAN G, HUANG J P, et al. Progress of new process of two-sludge denitrification phosphorus removal [J]. Technology of Water Treatment, 2021, 47(7): 19-24.

(上接第 45 页)

- [56] WANG Y, ZHAO M, HOU C, et al. Efficient degradation of perfluorooctanoic acid by solar photo-electro-Fenton like system fabricated by MOFs/carbon nanofibers composite membrane [J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 414: 128940. DOI: 10.1016/j.cej.2021.128940.
- [57] 李炳智, 朱江. 超声活化过硫酸盐氧化降解水溶液中的全氟辛酸磺酸盐[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(4): 912-920.
LI B Z, ZHU J. Oxidative degradation of perfluorooctane sulfonate by a sono-activated persulfate system in an aqueous solution [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, 38(4): 912-920.
- [58] SHANA W. Photocatalytic degradation of perfluorooctanoic acid and perfluorooctane sulfonate in water: A critical review [J]. Chemical Engineering Journal, 2017, 328: 927-942. DOI: 10.1016/j.cej.2017.07.076.