

郭风巧, 郭晶晶, 郝天, 等. 黄河流域地表水中全氟/多氟烷基化合物的分布及饮用水潜在安全风险[J]. 净水技术, 2025, 44(6): 62–70.

GUO F Q, WU J J, HAO T, et al. Analysis distribution of perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances in surface water of the Yellow River Basin and potential safety risks in drinking water [J]. Water Purification Technology, 2025, 44(6): 62–70.

黄河流域地表水中全氟/多氟烷基化合物的分布及饮用水潜在安全风险分析

郭风巧^{1,2}, 郭晶晶^{1,2}, 郝天^{1,2,*}, 孙雪梓^{1,2}

(1. 中国城市规划设计研究院, 北京 100037; 2. 住房和城乡建设部饮用水安全保障工程技术创新中心, 北京 100044)

摘要 【目的】全氟/多氟烷基化合物(PFASs)在黄河流域分布广泛, 评估其对饮用水的潜在安全风险, 对于加强黄河流域饮用水安全保障工作具有重要意义。【方法】文章调研了2016年—2024年黄河流域水体中PFASs浓度情况, 分析了上中下游主要PFASs种类及来源, 探讨了现行饮用水工艺对PFASs可处理性, 结合流域内179家地表水水厂所采用的工艺情况, 阐明了当前水源水中PFASs对饮用水的潜在安全风险。【结果】结果表明, 黄河流域地表水中PFASs质量浓度为ng/L~μg/L级别, 全氟辛酸(PFOA)、全氟辛烷磺酸(PFOS)等化合物为主要污染种类, 主要来源于工业排放、农业活动和生活污水, 氟化工、纺织、造纸、电镀、消防、皮革、冶金等行业是主要工业排放源。黄河流域地表水源水中PFOA和PFOS最高检出浓度均低于我国《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)限值规定, 采用美国饮用水标准判定时, 上游地表水水厂处理后的饮用水均能满足标准限值要求, 中、下游分别有95.2%、67.4%的地表水水厂处理后的饮用水尚不能满足标准要求, 表明黄河流域中、下游的PFASs具有潜在的饮用水安全风险。【结论】为防范上述风险, 一方面应促进企业清洁生产实现源头控制, 另一方面加强对水源水中PFASs浓度的监测, 并根据需求升级水厂处理工艺。

关键词 黄河流域 全氟/多氟烷基化合物(PFASs) 水厂工艺 可处理性 清洁生产

中图分类号: TU991 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-0177(2025)06-0062-09

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.06.008

Analysis Distribution of Perfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances in Surface Water of the Yellow River Basin and Potential Safety Risks in Drinking Water

GUO Fengqiao^{1,2}, WU Jingjing^{1,2}, HAO Tian^{1,2,*}, SUN Xuezi^{1,2}

(1. China Academy of Urban Planning & Design, Beijing 100037, China;

2. Engineering Technology Innovation Center for Drinking Water Safety and Security, Ministry of Housing and Urban-Rural Development, Beijing 100044, China)

Abstract [Objective] Perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances (PFASs) are ubiquitously distributed in the Yellow River Basin. The potential safety risks of PFASs to drinking water are of great significance to be evaluated for strengthening the safeguard of drinking water safety in the Yellow River Basin. [Methods] The concentration of PFASs in the water bodies of the Yellow River Basin from 2016 to 2024 was investigated. The main types and sources of PFASs in the upper, middle and lower reaches were analyzed. The treatability of PFASs by the current drinking water treatment processes was discussed. And in combination with the treatment processes adopted by 179 water treatment plants (WTPs) using surface water sources in the basin, the potential safety risks of PFASs in source water to drinking water were clarified. [Results] It was shown that the concentration levels of PFASs in the surface water of the Yellow River Basin were in the range of ng/L to μg/L. Compounds like perfluorooctanoic acid (PFOA) and

[收稿日期] 2024-11-12

[基金项目] 国家重点研发计划: 黄河流域高风险污染物饮用水工艺可处理性评估(2021YFC3200805-4)

[作者简介] 郭风巧(1987—), 女, 高级工程师, 研究方向为饮用水安全保障技术研究与应用, E-mail: guofq2011@163.com。

[通信作者] 郝天(1987—), 女, 高级工程师, 研究方向为饮用水安全保障, E-mail: 15901025588@126.com。

perfluorooctane sulfonate (PFOS) were identified as the main pollutants. These are mainly sourced from industrial emissions, agricultural activities and domestic sewage. Industries such as the fluorine-chemical, textile, papermaking, electroplating, fire-protection, leather and metallurgical industries were considered as the main industrial emission sources. The highest detected concentrations of PFOA and PFOS in the surface water sources of the Yellow River Basin were both lower than the limit values stipulated in *Standards for Drinking Water Quality* (GB 5749—2022) in China. When judged by the United States drinking water standards, the drinking water treated by surface waterworks in the upper reaches could all meet the standard limit requirements. While for the middle and lower reaches, 95.2% and 67.4% of the WTPs using surface water respectively had treated drinking water that could not meet the requirements. It was indicated that PFASs in the middle and lower reaches of the Yellow River Basin pose potential risks to drinking water safety. [**Conclusion**] To mitigate the aforementioned risks, on one hand, enterprises should be impelled to engage in cleaner production so as to effectuate source control. On the other hand, the monitoring of PFASs concentrations in raw water should be enhanced, and the treatment processes of WTPs should be upgraded in accordance with requirements.

Keywords Yellow River Basin perfluoroalkyl/polyfluoroalkyl substances (PFASs) WTP process treatability clean production

全氟/多氟烷基化合物 (perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances, PFASs) 是一类由碳链组成, 烷基中的氢原子被氟原子完全或部分取代, 并链接一系列侧链基团 (如磺酸基、羧酸基、膦酸基、氨基和醚键等官能团) 的新有机化合物, 除了被广泛用于纺织品、消防泡沫、电镀等外, 用途几乎涉及所有行业分支和消费品^[1]。PFASs 在环境中具有持久性、生物累积性和潜在的毒性^[2], 长期暴露于 PFASs 中可能对人类健康产生影响, 包括损伤肝脏、形成肿瘤、损伤神经系统、女性的生殖系统造成毒性等^[3]。

2023 年 3 月 1 日,《重点管控新污染物清单 (2023 版)》正式发布, 明确全氟辛基磺酸及其盐类和全氟辛基磺酰氟 (PFOS 类)、全氟辛酸及其盐类和相关化合物 (PFOA 类) 等列入清单的新污染物, 应当按照国家有关规定采取禁止、限制、限排等环境风险管控措施。2023 年 4 月 1 日,《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)^[4] 正式实施, 标准规定 2 项 PFASs [全氟辛酸 (PFOA) 和全氟辛烷磺酸 (PFOS)] 作为饮用水参考指标, 限值分别为 80 ng/L 和 40 ng/L。2024 年 4 月 10 日, 美国国家环境保护局 (EPA) 发布首个具有法律效力的国家饮用水标准^[5], 以应对饮用水中的“永久性化学物质”污染问题。新标准对 5 种 PFASs 做出限制, 包括 PFOA、PFOS、全氟壬酸 (PFNA)、全氟烷磺酸 (PFHxS) 和六氟环氧丙烷二聚酸 (HFPO-DA), PFOS 和 PFOA: 非强制性最高污染物水平建议目标 (MLCG) 设定为 0, 强制性最高污染水平 (MCL) 设定为 4.0 ng/L。基于 3 种 PFASs 的危害标准: PFNA、PFHxS 和 HFPO-DA, 限值均为 10 ng/L, 表明国内外水质管理部门越来越重视对于水中 PFASs 的管控。

目前, PFASs 在国内外流域水环境中的检出情况较为普遍^[6-12], 也有研究^[13-15] 关注了黄河流域上中下游水环境中 PFASs 分布情况及环境风险, 为从源头到水厂探明黄河流域饮用水的 PFASs 安全风险, 总结近 20 年已有的文献, 结合对黄河流域上中下游地表水中 PFASs 污染水平、主要污染差异性和来源的全面分析, 以及 PFASs 在黄河流域水厂的可处理性统计结果, 评估黄河流域 PFASs 对饮用水的潜在安全风险, 提出相应风险管控建议。

1 黄河流域地表水中 PFASs 的分布及来源

1.1 PFASs 在黄河流域地表水中的分布

通过对 2016 年—2024 年黄河流域相关文献报道数据进行梳理分析, 得到 PFASs 在黄河流域地表水和水源水中的浓度分布情况, 如表 1 所示。黄河流域从上游到下游水体中普遍有 PFASs 检出, 质量浓度为 ng/L~ μ g/L 级别。但从现有文献的调研结果看, 黄河流域上游地表水中检出了较高浓度的 PFASs 总量, 质量浓度高达 3 207 ng/L, 湟水河处于兰州市饮用水水源地上游, 需要进一步关注; 黄河中游地表水中 PFASs 总量的质量浓度为 18.0~56.9 ng/L, 黄河下游地表水中 PFASs 总量的质量浓度为 1.00~107 ng/L。从 PFOA 的浓度水平看, 其在黄河流域下游的重要饮用水源地引黄水库检出浓度较高, 质量浓度为 0.900~37.6 ng/L。从 PFOS 的浓度水平看, 上游湟水河流域出现了较高的检出质量浓度 (3 016 ng/L), 与流域附近地毯厂排放废水有关^[15]。从黄河流域水源水浓度看, 黄河下游水源受 PFOA 和 PFOS 污染情况比上游和中游严重。此外, 黄河下游地表水源水出现比支流断面水或水库水中总 PFASs 浓度更高的情况, 应考虑排查污染来源。

表 1 PFASs 在黄河流域的浓度分布情况

Tab. 1 Concentration Distribution of PFASs in the Yellow River Basin

流域	样品类型	质量浓度/(ng·L ⁻¹)			参考文献
		PFOS	PFOA	PFASs 总量	
黄河上游	支流断面水	ND~3 016	ND~26.4	15 种;65.6~3 207	[15-16]
	地表水源水	ND	ND	—	[17]
黄河中游	干、支流断面水和水库水	2.39~16.2	0.836~10.7	28 种;18.0~56.9	[18-21]
	地表水源水	ND	平均值为 16.3	—	[17]
黄河下游	干、支流断面水和水库水	0.860~8.74	0.900~37.6	50 种;16.2~57.8	[22-24]
	地表水源水	ND~11.8	0.807~32.1	17 种;1.00~107	[17,25]

注:ND 表示未检出。

1.2 黄河流域上、中、下游地表水中 PFASs 的主要种类及来源

根据黄河流域 PFASs 文献调研,整理得到黄河流域 PFASs 的主要污染特征及来源,如表 2 所示。黄河流域支流断面水体中 PFASs 的分布受附近相关生产企业排放废水影响较大,黄河流域主要污染物为 PFOA、PFOS 和全氟己酸(PFHxA),其中上游主要污染物为 PFOA 和 PFOS,主要工业源为地毯厂、氟化工产业园区、污水处理厂等的废水排

放^[15-16];中游主要污染物为 PFOA、PFOS 和 PFHxA^[18-22],主要工业源为造纸、纺织、皮革、冶金等行业的废水排放;下游主要污染物为 PFOA 和 PFOS^[23-24],大部分来源于工业、农业、生活及大气沉降等,其主要工业源包括造纸、纺织、皮革、冶金等行业的废水排放。黄河流域地表水样品与上海附近^[10]和南黄海^[11]等流域水样中的主要 PFASs 种类有所不同,后者主要污染物还包括 PFPeA 和全氟丁烷磺酸(PFBS),但 PFHxA 不是主要污染物。

表 2 PFASs 在黄河流域的主要污染特征及来源

Tab. 2 Main Pollution Characteristics and Sources of PFASs in the Yellow River Basin

流域	支流	主要污染物	污染物主要来源	参考文献
黄河上游支流	湟水河	PFOA、PFOS、全氟丁酸(PFBA)	污水处理厂和地毯厂排放的废水	[15]
	大黑河	PFOA、PFHxA、PFHxS、PFOS	处理或未处理的污水、水成膜泡沫、前体降解和氟化工产业	[16]
黄河中游干支流及水库	汾河	PFOA、PFOS	地毯制造业和污水处理厂的废水排放,纺织、皮革和地毯工业的表面保护材料、泡沫灭火剂、防水和防油纸等产品的生产过程中的直接排放,农业活动和生活污水	[18-19]
	北洛河、清涧河		氟化工产业园区、石油开采活动、工业废水、农业和生活污水排放	[20]
	渭南~郑州段	PFHxA	造纸、纺织、皮革、冶金等行业的废水排放,农业活动和生活污水	[21-22]
黄河下游干支流	七里铺~利津段	PFOA、PFOS	消防、金属电镀等	[25]
	黄河口		纺织、造纸、化工和灭火剂等生产领域	[26]

2 水厂处理工艺对 PFASs 的处理效果评估

分析水厂常用处理工艺对 PFASs 处理效果,以水厂或水厂中试装置为研究对象,选取常规工艺、强化常规处理工艺、深度处理工艺(吸附工艺、臭氧-生物活性炭工艺、高级氧化工艺和膜处理工艺)等 6 种工艺进行处理效果评估,PFASs 在不同水厂工艺下的去除率如表 3 所示。

2.1 常规及强化常规处理工艺

常规处理工艺(含混凝-沉淀-过滤-消毒等工

艺)通常仅能去除 11.0%~21.6%的 PFASs^[27-28],各种 PFASs 的去除率为 29.5%~100%^[29],表明常规处理工艺对 PFASs 的去除效果有限,不同物质的去除率波动较大,各工艺段对 PFASs 的去除作用也差异较大,混凝沉淀对 PFASs 的去除率大于砂滤过程,消毒工艺对 PFASs 去除率不稳定,部分使用常规处理的水厂用氯消毒后总 PFASs 浓度反而增加,可能将长链 PFASs 氧化为短链 PFASs 或将前体物氧化为 PFASs。

强化常规处理主要包括强化混凝和强化过滤,通过增加可吸附的活性点位,增强对 PFASs 的吸附效果,实验室小试对 PFOS 和 PFOA 的去除率可达到 50% 左右^[30],但实际水厂中的去除率达不到该水平。目前强化常规工艺提高 PFASs 吸附效果的主要方式有增加助凝剂^[31]、调节溶液 pH、使用新型混凝剂[如聚合氯化铝铁(PAFC)]^[32]、聚合硫酸铁(PFS)等。

2.2 深度处理工艺

2.2.1 吸附工艺

活性炭和离子交换树脂等吸附工艺在水厂中具有较为成熟的应用,中试试验^[33]对于 PFASs 的去除率可达 40%,也有研究^[34-35]的去除率在 90.0% 以上。研究表明,活性炭和离子交换树脂受吸附容量限制,其改性材料的研究也主要集中在改变材料表面电荷、表面官能团和孔径等途径,且改性材料表现出更佳的吸附效果。采用吸附法过程中,需要根据 PFASs 中长链和短链物质情况,选择相应的吸附材料,通常颗粒活性炭材料更倾向于去除长链物质,离子交换材料可通过调节溶液 pH 等条件选择性地去除长链或短链 PFASs。

2.2.2 臭氧-生物活性炭工艺

实验室研究中臭氧-生物活性炭工艺对短链 PFASs 的去除率可以达到 70.0%~90.0%^[36],在太湖为水源的 2 个水厂和上海某水厂的运行过程中,PFASs 去除率仅为 20.7%~37.3%^[37-40]。对比得到,臭氧水厂工艺运行效果很难稳定达到实验室效果,臭氧阶段受臭氧剂量、接触时间、臭氧投加点位、其他有机质竞争的影响,生物活性炭的吸附性能和微生物活性也会受到水质、水温等因素的影响,考

虑臭氧氧化会将长链物质或前体物氧化为短链物质,活性炭也更易吸附长链物质,对于短链物质的去除,主要还是靠生物降解作用,因此要保持臭氧-生物活性炭对短链 PFASs 的持续去除效果,应注意活性炭对短链 PFASs 的及时解吸^[40]以及水质和水温的稳定。

2.2.3 高级氧化工艺

高级氧化技术主要是由于自由基对 PFASs 氧化,以解离“—CF₂”单元的方式分级实现对 PFASs 的去除^[41],根据小试试验结果,高级氧化技术对 PFASs 的去除率和脱氟率不稳定,去除率为 5.0%~100%,脱氟率为 10.0%~82.0%^[42],实际水厂中高级氧化工艺对于 PFASs 的去除率情况暂未查明。近年来基于紫外的高级氧化工艺是 PFASs 去除的研究热点^[43],大多数高级氧化工艺在酸性条件下表现出更优的 PFASs 去除效率,主要是由于酸性条件下自由基的生成量最大,当水源水中的前体物含量较高时,工艺容易造成消毒副产物的产生和 PFASs 去除率的不稳定。

2.2.4 膜处理工艺

膜工艺目前已被大量用于 PFASs 的去除,常见的膜处理技术有超滤(UF)、纳滤(NF)^[44-45]和反渗透(RO)^[46]。据文献^[47-48]报道,超滤膜对 PFASs 的去除效果较差,纳滤膜和反渗透膜对 PFASs 的去除能力较强,去除率可达到 90.0% 以上,美国某水厂采用常规工艺+反渗透膜,对 PFASs 的去除率可达到 47.0%~99.0%^[49]。膜污染是膜工艺中常见的问题,会导致 PFASs 的去除效果明显降低,工艺运行中需定期对膜清洗,不断优化运行参数。

表 3 PFASs 在不同水厂工艺下的去除率

Tab. 3 Removal Rates of PFASs under Different Treatment Processes in WTPs

工艺类型	研究对象或规模	主要处理工艺	初始质量浓度/(ng·L ⁻¹)	平均去除率	参考文献
常规处理	天津、成都等水厂	混凝-沉淀-过滤-消毒	2.22~28.0	11.0%~21.6%	[27-28]
	瑞典乌普萨拉市饮用水处理厂中试试验	颗粒活性炭	10.0~85.0	90.0%	[35]
臭氧-生物活性炭	上海某水厂	常规处理+臭氧-生物活性炭	57.6	37.3%	[38]
	太湖水源水厂		127	20.7%	[39]
	太湖水源水厂		215	35.0%	[40]
膜处理	美国某地表水水厂	常规处理+反渗透	220	47.0%~99.0%	[49]

结果表明,常规处理工艺对 PFASs 的去除效果

有限,且不同物质的去除率波动较大;对于深度处理

工艺,颗粒活性炭对 PFASs 具有较好的处理效果,但需要注意 PFASs 解吸易产生二次污染,离子交换工艺吸附效率较高,可针对性地去除长链或短链 PFASs;臭氧-生物活性炭对短链 PFASs 具有较好的处理效果;基于紫外的高级氧化工艺对 PFASs 具有较好的处理效果,实际使用过程中应同时关注脱氟率;膜处理工艺对 PFASs 的去除存在选择性,不同的膜处理效果差异很大。在研究工艺对水源水的处理效果时,应考虑模拟水源中其他有机质产生的竞争作用,以及实际水样中 PFASs 的浓度,并防止二次污染对饮用水的影响。为达到理想处理效果,有些水厂开始采用超滤+纳滤“双膜”工艺、臭氧-生物活性炭+沉浸式超滤膜、粉末活性炭工艺+常规处理+沉浸式膜处理等不同组合的深度处理工艺,建议进一步考察组合工艺对 PFASs 的可处理性。

3 黄河流域使用地表水为水源的水厂工艺情况及饮用水中 PFASs 风险分析

对黄河流域水厂水源、处理工艺情况进行调研,收集了 8 个省、59 个城市、427 家水厂信息数据,信息为水质抽样调查时各地水司提供。统计得到地下水水厂为 230 家,地表地下混合水水厂为 20 家,地表水水厂为 177 家,其中 18 家地表水水厂的水源未分布于黄河流域,主要为南水北调水,对黄河流域采用地表水和地表地下混合水源的 179 家水厂进行工艺情况分析。

3.1 黄河流域地表水厂工艺情况

黄河流域上中下游水厂处理工艺统计如图 1 所示。黄河流域上游青海、甘肃、宁夏、内蒙古 4 省(自治区)21 市(自治州)的 70 家水厂中,采用常规处理工艺的占比最大,为 62.9%,其次为简易处理工艺,占比为 28.6%,深度处理(含膜处理)工艺和强化常规处理工艺占比较低,分别为 5.7% 和 2.8%;黄河流域中游陕西、山西、河南 3 省 14 市的 63 家水厂中,使用常规处理工艺的占比最大,为 85.6%,简易处理、强化常规处理和深度处理(含膜处理)工艺占比均为 4.8%;黄河流域下游河南和山东 2 省 13 市的 46 家水厂中,使用常规处理工艺的占比最大,为 34.8%,其次是深度处理工艺,占比为 32.6%,强化常规处理工艺占比为 28.3%,简易处理工艺占比最低,为 4.3%。总体看来,黄河流域水厂采用常规处理工艺居多,占比为 63.7%,简易处理

工艺、深度处理工艺、强化常规处理工艺占比依次减小,分别占比为 14.0%、12.3%、10.0%;相比上游和中游的水厂,下游使用深度处理工艺和强化常规处理工艺的水厂较多。

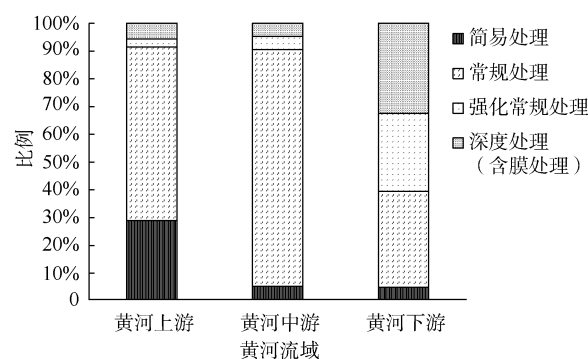


图1 黄河流域上中下游水厂处理工艺统计

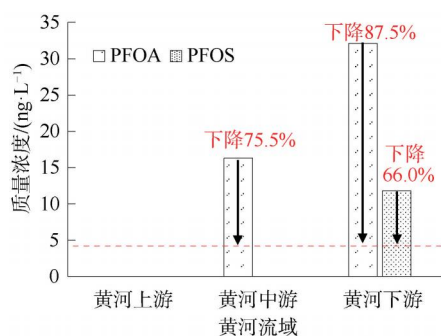
Fig. 1 Statistics of Treatment Processes of WTPs in the Upper, Middle and Lower Reaches of the Yellow River Basin

3.2 饮用水中 PFASs 的安全风险分析

从水源水浓度水平看,经黄河流域水厂工艺处理后饮用水中 PFOA 和 PFOS 均可满足我国《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)的限值要求。参考美国饮用水标准中 PFOA 和 PFOS 的限值,对黄河流域地表水水厂的 PFOA 和 PFOS 的理论去除率以及可处理达标地表水厂占比情况进行分析,可知黄河流域上中下游面临着不同程度的饮用水安全风险。

黄河流域水源水中 PFOA、PFOS 的浓度水平及饮用水达到美国饮用水标准的理论去除率如图 2 所示。黄河上游水源水中未检出 PFOA 和 PFOS,上游水体污染未涉及饮用水源地;黄河中游水源水中 PFOA 质量浓度平均值为 16.3 ng/L,若要处理后饮用水中 PFOA 浓度低于美国饮用水标准限值 4.0 ng/L,水厂工艺对其去除率应至少达到 75.5%;黄河下游水源水中 PFOA 和 PFOS 最高质量浓度分别为 32.1 ng/L 和 11.8 ng/L,若要达到美国饮用水标准限值,水厂工艺对其去除率应至少达到 87.5% 和 66.0%。

黄河流域地表水水厂可将 PFASs 处理至满足美国饮用水标准要求的占比如图 3 所示。简易处理、常规处理、强化常规、臭氧-生物活性炭等工艺均无法满足去除要求,因深度处理工艺中各工艺类型占比情况未明确,经计算,黄河中游至少 95.2% 的地表水水厂无法有效去除 PFOA,黄河下



注：美国饮用水标准中PFOA、PFOS限值均为4.0 ng/L。

图2 黄河流域水源水中 PFOA、PFOS 的浓度水平及饮用水达到美国饮用水标准的理论去除率
Fig. 2 Concentration levels of PFOA, PFOS in Water Sources of the Yellow River Basin and the Theoretical Removal Rates for Drinking Water Compared with the United States Drinking Water Standards

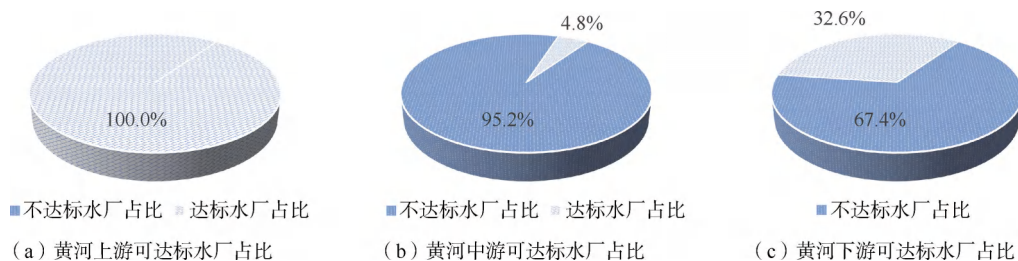


图3 黄河流域地表水厂可将 PFASs 处理至满足美国饮用水标准要求的占比

Fig. 3 Proportion of PFASs Removal WTPs of Surface Water Source in the Yellow River Basin Compared with the American Drinking Water Standards

PFOS 等长链化合物,主要来源为工业排放、农业活动和生活污水,氟化工、纺织、造纸、电镀、消防、皮革、冶金等行业是主要工业排放源。

(2)传统水处理工艺对 PFASs 的处理效果较差,黄河流域饮用水中 PFASs 存在潜在安全风险。PFASs 属于净水工艺难处理的一类污染物,研究表明,常规处理工艺对 PFASs 的去除效果有限,深度处理工艺(含膜处理)对 PFASs 有一定的去除效果,需工艺精确调控。黄河流域地表水源水中的 PFOA 和 PFOS 均满足我国《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)中相应限值规定,但中游和下游分别有至少 95.2%和 67.4%的地表水水厂无法将水源水处理到满足美国饮用水标准限值要求,其居民面临着潜在的饮用水安全风险。

(3)加强源头控制是降低饮用水中 PFASs 安全风险的主要方式。PFASs 应用广泛且难以降解,水中 PFASs 持续存在,末端治理成本高、难度大^[50],建议以加强源头控制、促进清洁生产^[51]为主要手段控

制黄河流域水体的 PFASs 污染问题,通过跨部门、跨地区的合作,共同推动黄河流域的生态保护和可持续发展。此外,相关部门应加强对水源水中 PFASs 浓度的监测,并根据需求升级水厂处理工艺。

4 结论和建议

(1)黄河流域上中下游水体中 PFASs 广泛检出,其质量浓度水平在 ng/L~μg/L 级别。上游支流出现较高的总 PFASs 检出浓度,下游地表水源水出现比支流断面水或水库水总 PFASs 浓度更高的情况。黄河流域 PFASs 主要污染种类为 PFOA 和

参考文献

- [1] GLÜGE J, SCHERINGER M, COUSINS I T, et al. An overview of the uses of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) [J]. Environmental Science: Processes & Impacts, 2020, 22(12): 2345–2373.
- [2] ZHANG D Q, ZHANG W L, LIANG Y N. Adsorption of perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances (PFASs) from aqueous solution-A review [J]. Science of the Total Environment, 2019, 694: 133606. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.133606.
- [3] SUJA F, PRAMANIK B K, ZAIN S M. Contamination, bioaccumulation and toxic effects of perfluorinated chemicals (PFCs) in the water environment: A review paper [J]. Water Science and Technology, 2009, 60(6): 1533–1544.
- [4] 中华人民共和国国家市场监督管理总局, 中华人民共和国国

- 家标准化管理委员会. 生活饮用水卫生标准: GB 5749—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- State Administration for Market Regulation of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Standards for drinking water quality: GB 5749—2022 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2022.
- [5] United States Environmental Protection Agency. Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS): Final PFAS national primary drinking water regulation [R/OL]. (2024-4-10) [2024-11-12]. <https://www.epa.gov/sdwa/and-polyfluoroalkyl-substances-pfas>.
- [6] LI Y, FENG X, ZHOU J, et al. Occurrence and source apportionment of novel and legacy poly/perfluoroalkyl substances in Hai River basin in China using receptor models and isomeric fingerprints[J]. Water Research, 2020, 168: 115145. DOI: 10.1016/j.watres.2019.115145.
- [7] CLARA M, GANS O, WEISS S, et al. Perfluorinated alkylated substances in the aquatic environment: An Austrian case study [J]. Water Research, 2009, 43(18): 4760–4768.
- [8] NAILE J E, KHIM J S, WANG T, et al. Perfluorinated compounds in water, sediment, soil and biota from estuarine and coastal areas of Korea[J]. Environmental Pollution, 2010, 158(5): 1237–1244.
- [9] MENG J, WANG T, WANG P, et al. Perfluoroalkyl substances in daling river adjacent to fluorine industrial parks: Implication from industrial emission [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2015, 94(1): 34–40.
- [10] CHAI J F, LEI P H, XIA X Y, et al. Pollution patterns and characteristics of perfluorinated compounds in surface water adjacent potential industrial emission categories of Shanghai, China[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2017, 145: 659–664. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2017.08.011.
- [11] FENG X M, YE M Q, LI Y, et al. Potential sources and sediment-pore water partitioning behaviors of emerging per/polyfluoroalkyl substances in the South Yellow Sea[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 389: 122124. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.122124.
- [12] YAO S, ZHANG H, ZHANG J, et al. Microbial adaptation and biodegradation mechanisms of perfluorinated compounds in different functional zones of the Yellow River Delta, China[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2024, 187: 1037–1046. DOI: 10.1016/j.psep.2024.04.142.
- [13] MAK Y L, TANIYASU S, YEUNG L W Y, et al. Perfluorinated compounds in tap water from China and several other countries [J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43(13): 4824–4829.
- [14] 周健. 新型全氟化合物在黄土高原水环境中的污染特征及在植物中富集转化机制研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2021.
- ZHOU J. The pollution characteristics of emerging per- and polyfluoroalkyl substances in water environment in the loess plateau and mechanism of bioaccumulation and transformation in plants [D]. Xianyang: Northwest A&F University, 2021.
- [15] ZHANG F, WANG Y, WEI Z, et al. Perfluorinated compounds in a river basin from Qinghai-Tibet Plateau: Occurrence, sources and key factors [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2021, 228: 113043. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2021.113043.
- [16] LI J, LI X L, AN R, et al. Occurrence, source apportionment, and ecological risk of legacy and emerging per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in the Dahei River Basin of a typical arid region in China[J]. Environmental Research, 2024, 246: 118111. DOI: 10.1016/j.envres.2024.118111.
- [17] 温馨. 我国重点流域和重点地区饮用水中全氟化合物污染水平调查研究[D]. 北京: 中国疾病预防控制中心, 2020.
- WEN X. Investigation on the pollution level of perfluorinated compounds in drinking water in key river basins and regions in China [D]. Beijing: Chinese Center for Disease Control and Prevention, 2020.
- [18] ZHAO P J, XIA X H, DONG J W, et al. Short- and long-chain perfluoroalkyl substances in the water, suspended particulate matter, and surface sediment of a turbid river[J]. Science of the Total Environment, 2016, 568: 57–65. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.05.221.
- [19] 东口朋宽, 史江红, 张晖, 等. 汾河流域太原段河水及沉积物中PFOS和PFOA的浓度分布特征[J]. 环境科学, 2013(11): 4211–4217.
- DONG K P K, SHI J H, ZHANG H, et al. Distribution of perfluorooctanesulfonate and perfluorooctanoate in water and the sediment in Fenhe River, Shanxi Province [J]. Environmental Science, 2013(11): 4211–4217.
- [20] 乔昊安, 白平, 高磊, 等. 黄河流域北洛河与清涧河水环境中全氟/多氟化合物的污染特征[J/OL]. 环境化学, 44: 1–11 [2025-04-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1844.x.20240813.1244.018.html>.
- QIAO H A, BAI P, GAO L, et al. Pollution characteristics of per/polyfluoroalkyl substances in waters of Beiluo River and Qingjian River, Yellow River Basins [J/OL]. Environmental Chemistry, 44: 1–11 [2025-04-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1844.x.20240813.1244.018.html>.
- [21] 李琦路, 程相会, 赵祯, 等. 黄河中游(渭南—郑州段)全/多氟烷基化合物的分布及通量[J]. 环境科学, 2019, 40(1): 228–238.
- LI Q L, CHENG X H, ZHAO Z, et al. Distribution and fluxes of perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances in the middle reaches of the Yellow River (Weinan-Zhengzhou Section) [J]. Environmental Science, 2019, 40(1): 228–238.
- [22] 程相会. 黄河河南段多氯萘、氯化石蜡及全/多氟烷基化合物

- 的污染特征及环境行为研究[D]. 新乡: 河南师范大学, 2020.
- CHENG X H. Pollution characteristics and environmental behavior of PCNS, CPS and PFASs in Henan section of Yellow River[D]. Xinxiang: Henan Normal University, 2020.
- [23] 路国慧, 沈亚婷, 何俊, 等. 高效液相色谱-串联质谱法测定黄河河口段水中全氟化合物的初步研究[J]. 岩矿测试, 2012, 31(1): 147-153.
- LU G H, SHEN Y T, HE J, et al. Preliminary study on perfluorinated compounds in waters from the Yellow River estuary area by utilizing liquid chromatography-mass spectrometry/mass spectrometry [J]. Rock and Mineral Analysis, 2012, 31(1): 147-153.
- [24] 辛晓东, 刘红, 孙韶华, 等. 黄河下游地区引黄水库表层水中全氟烷基酸的分布特征与风险评估[J]. 环境化学, 2023, 42(12): 4327-4337.
- XIN X D, LIU H, SUN S H, et al. Distribution and risk assessment of perfluoroalkyl acid in surface water of diversion reservoirs from the lower Yellow River [J]. Environmental Chemistry, 2023, 42(12): 4327-4337.
- [25] 吕明, 朱有长, 潘保柱, 等. 黄河下游水体中全氟及多氟烷基化合物的分布特征[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2022, 58(3): 575-586.
- LÜ M, ZHU Y C, PAN B Z, et al. Distribution of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in lower reach of Yellow River, China [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2022, 58(3): 575-586.
- [26] 张慧. 黄河三角洲湿地水和沉积环境中典型全氟化合物的空间分布及陆海迁徙特征[D]. 济宁: 曲阜师范大学, 2021.
- ZHANG H. Spatial distribution and land-sea migration characteristics of typical perfluorinated compounds in the water and sediment environments of the Yellow River Delta Wetland [D]. Jinan: Qufu Normal University, 2021.
- [27] 李玉娜. 全氟和多氟化合物在自来水中的污染特征及净水工艺的去除影响研究[D]. 天津: 南开大学, 2020.
- LI Y N. Study on the contamination profile of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in drinking water and the removal efficiency of water treatment process [D]. Tianjin: Nankai University, 2020.
- [28] 雷梦真, 方淑红, 王若男. 自来水厂不同水处理工艺环节对全氟化合物浓度的影响[J]. 三峡生态环境监测, 2024, 9(1): 19-27.
- LEI M Z, FANG S H, WANG R N. Influence of different water treatment processes on the concentration of perfluoroalkyl substances in waterworks [J]. Ecology and Environmental Monitoring of Three Gorges, 2024, 9(1): 19-27.
- [29] 温馨, 吕佳, 王园媛, 等. 常规处理工艺对饮用水中全氟化合物的去除效果研究[J]. 环境卫生学杂志, 2022, 12(7): 526-532.
- WEN X, LÜ J, WANG Y Y, et al. Removal efficiency of perfluorinated compounds in drinking water by conventional treatment process [J]. Journal of Environmental Hygiene, 2022, 12(7): 526-532.
- [30] XIAO F, SIMCIK M F, GULLIVER J S. Mechanisms for removal of perfluorooctane sulfonate (PFOS) and perfluorooctanoate (PFOA) from drinking water by conventional and enhanced coagulation[J]. Water Research, 2013, 47(1): 49-56.
- [31] 贾旭日. 强化混凝去除再生水中典型 PFCs 的研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2018.
- JIA X R. Research of typical PFCs from reclaimed water by enhanced coagulation [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2018.
- [32] 赵莉, 杨柳, 常青, 等. PAFC 对水体中持久性有机污染物 PFOA 的混凝效果[J]. 环境工程学报, 2013(7): 2437-2442.
- ZHAO L, YANG L, CHANG Q, et al. Coagulation effects of persistent organic pollutant PFOA in water by PAFC [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2013(7): 2437-2442.
- [33] LIU C J, WERNER D, BELLONA C. Removal of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) from contaminated groundwater using granular activated carbon: A pilot-scale study with breakthrough modeling[J]. Environmental Science: Water Research & Technology, 2019, 5(11): 1844-1853.
- [34] ZHANG K, SUMITA, LI C, et al. A Review of the treatment process of perfluorooctane compounds in the waters: Adsorption, flocculation, and advanced oxidative Process[J]. Water, 2022, 14(17): 2692.
- [35] BELKOUTEB N, FRANKE V, MCCLEAF P, et al. Removal of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in a full-scale drinking water treatment plant: Long-term performance of granular activated carbon (GAC) and influence of flow-rate[J]. Water Research, 2020, 182: 115913. DOI: 10.1016/j.watres.2020.115913.
- [36] 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.
- [37] 钟婷婷, 林涛, 刘威. 饮用水处理过程中全氟化合物的分布、转化及去向[J]. 环境科学, 2023, 44(5): 2613-2621.
- ZHONG T T, LIN T, LIU W. Distribution, transformation, and fate of per-and polyfluoroalkyl substances in drinking water treatment [J]. Environmental Science, 2023, 44(5): 2613-2621.
- [38] 张振秀. 黄浦江微污染源水臭生物活性炭深度处理及功能菌群解析[D]. 上海: 华东理工大学, 2015.
- ZHANG Z X. Advanced treatment of micro-polluted source water

- in Huangpu River by ozone-biological activated carbon and analysis of functional microbial communities [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2015.
- [39] 杨宁, 许咏穗, 侯英娜, 等. 水厂臭氧-生物活性炭工艺对短链 PFCs 及 DOM 去除特性的中试[J]. 净水技术, 2024, 43(5): 80-91, 142.
- YANG N, XU Y S, HOU Y N, et al. Pilot test of O₃-BAC process for characteristics of short-chain PFCs and DOM removal in WTP[J]. Water Purification Technology, 2024, 43(5): 80-91, 142.
- [40] 葛鑫燃, 林涛, 张雪. 太湖流域某水厂水源水至龙头水过程中全氟化合物(PFCs)变化规律及健康评估研究[J]. 环境科学学报, 2023, 43(4): 350-358.
- GE X R, LIN T, ZHANG X. Study on the variation and health assessment of perfluorinated compounds(PFCs) from source water to tap water of a waterworks in Taihu Lake [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2023, 43(4): 350-358.
- [41] 周浩, 孙敏. 净水厂中全氟化合物分布特征及 UV/SO₃²⁻ 的去除机理[J]. 中国给水排水, 2017, 33(19): 6-10, 15.
- ZHOU H, SUN M. Distribution of perfluorinated compounds in water supply plant and its reductive degradation by UV/SO₃²⁻ [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(19): 6-10, 15.
- [42] WANG X L, CHEN Z Y, WANG Y L, et al. A review on degradation of perfluorinated compounds based on ultraviolet advanced oxidation [J]. Environmental Pollution, 2021, 291: 118014. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.118014.
- [43] CAO M H, WANG B B, YU H S, et al. Photochemical decomposition of perfluorooctanoic acid in aqueous periodate with VUV and UV light irradiation [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 179(1/2/3): 1143-1146. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2010.02.030.
- [44] ZHI Y, ZHAO X, QIAN S, et al. Removing emerging perfluoroalkyl ether acids and fluorotelomer sulfonates from water by nanofiltration membranes: Insights into performance and underlying mechanisms [J]. Separation and Purification Technology, 2022, 298: 121648. DOI: 10.1016/j.seppur.2022.121648.
- [45] LI M, SUN F Y, SHANG W T, et al. Removal mechanisms of perfluorinated compounds (PFCs) by nanofiltration: Roles of membrane-contaminant interactions [J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 406: 126814. DOI: 10.1016/j.cej.2020.126814.
- [46] MASTROPIETRO T F, BRUNO R, PARDO E, et al. Reverse osmosis and nanofiltration membranes for highly efficient PFASs removal: Overview, challenges and future perspectives [J]. Dalton Transactions, 2021, 50(16): 5398-5410.
- [47] FRANKE V, ULLBERG M, MCCLEAF P, et al. The price of really clean water: Combining nanofiltration with granular activated carbon and anion exchange resins for the removal of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in drinking water production[J]. ACS ES&T Water, 2021, 1(4): 782-795.
- [48] SAFULKO A, CATH T, LI F, et al. Rejection of perfluoroalkyl acids by nanofiltration and reverse osmosis in a high-recovery closed-circuit membrane filtration system [J]. Separation and Purification Technology, 2023, 326: 124867. DOI: 10.1016/j.seppur.2023.124867.
- [49] APPLEMAN T D, HIGGINS C P, QUIÑONES O, et al. Treatment of poly- and perfluoroalkyl substances in U. S. full-scale water treatment systems[J]. Water Research, 2014, 51: 246-255. DOI: 10.1016/j.watres.2013.10.067.
- [50] 滕玥. 加快推进氟化工行业新污染物治理[J]. 环境经济, 2023(17): 18-21.
- TENG Y. Accelerate the new pollutant treatment in the fluorine chemical industry [J]. Environmental Economy, 2023(17): 18-21.
- [51] 李嘉旭, 徐娇, 张建君, 等. 氟化工清洁生产评价指标体系的构建与探索[J]. 有机氟工业, 2023(4): 54-58.
- LI J X, XU J, ZHANG J J, et al. Add to favorite clean production evaluation index system for fluorine chemical industry [J]. Organo-Fluorine Industry, 2023(4): 54-58.

(上接第 37 页)

- [64] CHEN C H, GABBAI F P. Exploiting the strong hydrogen bond donor properties of aborinic acid functionality for fluoride anion recognition [J]. Angewandte Chemie International Edition, 2018, 57(2): 521-525.
- [65] 陈缙缙. 诱导结晶除氟方法及新型纳米除氟滤料的构筑与机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
- CHEN Z Z. Construction and mechanism of induced crystallization method to remove fluoride and new nano filter materials for defluorination [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.