

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.03.008

铁、锰颗粒物及其管网复合沉积物对PFASs的富集

张子灏^{1,2}, 鲁智礼¹, 马腾冲², 石宝友^{2,3}, 李贵伟²

(1. 华北水利水电大学 环境与市政工程学院, 河南 郑州 450045; 2. 中国科学院生态环境研究中心 饮用水科学与技术重点实验室, 北京 100085; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 饮用水系统中存在着铁、锰等金属颗粒物及管网沉积物,可能会影响微量全氟烷基和多氟烷基物质(PFASs)在水中的迁移归趋。为此,选取全氟辛酸(PFOA)、全氟辛烷磺酸(PFOS)、全氟丁酸(PFBA)和全氟丁烷磺酸(PFBS)这4种典型PFASs作为代表,探讨铁、锰等金属颗粒物对微量PFASs的富集作用。结果表明,1 mg/L的铁、锰颗粒物(以铁、锰元素计)对200 ng/L的PFOA、PFOS、PFBS均有一定富集作用,其中PFOS富集率最高。当铁颗粒物浓度达到50 mg/L时,PFOA和PFBS的富集率分别为25.6%和48.3%,但PFBA的富集率仍较低(5.6%)。考虑到PFOA在环境中浓度较高,研究了铁、锰颗粒物在不同水质条件下对PFOA的富集作用。结果发现,水质条件会明显影响PFOA的富集,自来水体系中铁、锰颗粒物(含铝)对PFOA的富集率明显高于去离子水体系。长期运行的循环管道模拟实验也表明,管壁上累积的铁、锰复合沉积物(还含有铝、生物膜等)能显著富集PFOA,且管壁沉积物中单位质量金属颗粒物对PFOA的富集量远大于去离子水体系。

关键词: 饮用水; 铁; 锰; 管网沉积物; 全氟烷基和多氟烷基物质(PFASs); 富集
中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)03-0053-06

Enrichment of Per- and Polyfluoroalkyl Substances by Iron/Manganese Particles and Pipe-scale Composite Deposits in Drinking Water Distribution System

ZHANG Zihao^{1,2}, LU Zhili¹, MA Tengchong², SHI Baoyou^{2,3}, LI Guiwei²

(1. Institute of Environmental and Municipal Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China; 2. Key Laboratory of Drinking Water Science and Technology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Iron and manganese particles, as well as other pipe-scale deposits, commonly exist in drinking water distribution systems. These substances can significantly influence the transport and fate of trace-level per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs). In this study, four representative PFASs, namely perfluorooctanoic acid (PFOA), perfluorooctanesulfonic acid (PFOS), perfluorobutyric acid (PFBA), and perfluorobutanesulfonic acid (PFBS), were selected to investigate the enrichment behavior of trace PFASs by iron and manganese particles. The results demonstrated that at both iron and manganese particles with

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52300123); 国家重点研发计划项目(2023YFC3208101)

通信作者: 李贵伟 E-mail: gwli@rcees.ac.cn

a concentration of 1 mg/L (expressed as Fe or Mn) exhibited certain enrichment effects on PFOA, PFOS, and PFBS at 200 ng/L, with PFOS showing the highest enrichment rate. When the iron particle concentration reached 50 mg/L, the enrichment rates for PFOA and PFBS were 25.6% and 48.3%, respectively, while that for PFBA remained relatively low (5.6%). Given the relatively high environmental prevalence of PFOA, its enrichment by iron and manganese particles under different water quality conditions was further examined. Water quality was found to markedly influence PFOA enrichment: iron and manganese particles (containing aluminum) in tap water showed significantly higher PFOA enrichment compared to those in deionized water. Long-term circulating pipe simulation experiments further revealed that composite pipe-scale deposits accumulated on pipe walls—containing iron, manganese, aluminum, and biofilm—could substantially enrich PFOA. Moreover, the PFOA enrichment capacity per unit mass of metal particles in these pipe-scale deposits was considerably greater than that observed in deionized water system.

Keywords: drinking water; iron; manganese; pipe-scale deposit; per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs); enrichment

在饮用水系统中,由于原水来源、混凝剂投加以及管网腐蚀物的释放,水中铁、铝浓度可高达几十 mg/L,并且输配系统中还存在着大量铁、锰、铝沉积物^[1]。金属颗粒物能富集一定的微量污染物^[2],但水力扰动等因素会导致这些污染物再释放,加剧水质安全隐患,对人体健康造成潜在风险。

全氟烷基和多氟烷基物质(PFASs)是一类广泛存在于工业和消费品中的合成有机化合物。PFASs因其高持久性和生物蓄积性,在全球水体中广泛被检出,被列为持久性有机污染物和重点关注的新污染物。已有研究证实铁、锰颗粒物对PFASs有富集作用^[3-4],但铁、锰颗粒物对不同种类的低浓度PFASs的富集作用仍不明确,关于实际管道沉积物富集PFASs的研究更是鲜有报道。为此,笔者选取全氟辛酸(PFOA)、全氟辛烷磺酸(PFOS)、全氟丁酸(PFBA)和全氟丁烷磺酸(PFBS)这4种典型PFASs作为代表(前两者为长链PFASs,后两者为短链PFASs),研究饮用水条件下Fe(II)和Mn(II)氧化形成的铁、锰颗粒物对低浓度PFASs的富集影响,并通过长期运行的供水管道模拟实验研究实际供水中锰、铁、铝等沉积物共存的情况下PFOA在管道中的富集规律,探究沉积物各组分与PFOA富集量的关系,以期为了解供水管道中金属颗粒物对PFASs的富集作用及其健康风险提供数据支撑,并为未来的水质管理和保护提供科学依据。

1 材料与amp;方法

1.1 实验材料

将MnSO₄和FeSO₄·7H₂O溶解在含有0.5%硝酸的去离子水中,配制1.0 g/L的Mn(II)和Fe(II)离子储备溶液;PFOA、PFOS、PFBA、PFBS标准品购自北京百灵威科技有限公司,内标品购自Wellington实验室,标准品分别配制2.0 mg/L浓度作为储备液。采用NaClO制备2.0 g/L(以Cl₂计)的游离氯储备溶液。用0.1 mol/L的稀盐酸和NaOH溶液调节pH。NaHCO₃、NaCl和CaCl₂购自国药集团化学试剂公司。本研究中使用去离子水均为纯水机制备,电导率>18.2 MΩ·cm。

1.2 实验方法

1.2.1 铁、锰颗粒物对PFASs的富集影响

在2 L玻璃烧杯中进行Fe(II)/Mn(II)的氧化实验,设置磁力搅拌器转速为400 r/min。分别在去离子水中加入NaCl(1 mmol/L)、CaCl₂(1 mmol/L)和NaHCO₃(0.4 mmol/L),以提供合适的离子强度并作为缓冲体系保持恒定的pH。将目标浓度的Fe(II)/Mn(II)和4种PFASs储备溶液分别投加到每组反应体系中,并通过投加NaClO启动Mn(II)的氧化过程[Fe(II)反应体系仅凭O₂即能快速氧化,无需投氯]。将反应体系的pH调节至7.7±0.1,温度控制在(22±1)℃。

为了观察氧化生成的铁、锰颗粒物对PFASs是否具有富集作用,设置了以下反应条件:游离氯初

始投加量为4.0 mg/L;4种PFASs的浓度均为200 ng/L;Fe(II)或Mn(II)的浓度均为1 mg/L;Fe(II)或Mn(II)氧化前后溶液中PFASs浓度的减少量被认为是铁、锰颗粒物对PFASs的富集量。反应4 h(铁颗粒物)或48 h(锰颗粒物)后测定溶液中剩余的PFASs浓度[48 h的反应时间是根据Mn(II)完全氧化所需时长确定的]。

1.2.2 Fe(II)浓度对铁颗粒物富集PFASs的影响

设置Fe(II)初始浓度分别为1、5和50 mg/L,PFASs初始浓度为200 ng/L,反应时间为4 h,探究Fe(II)初始浓度对铁颗粒物富集PFASs的影响。

1.2.3 铁锰铝共存形成的颗粒物对PFOA的富集

分别采用去离子水和自来水作为实验背景体系,PFOA初始浓度为200 ng/L,加入饮用水国标限值浓度即0.3 mg/L的Fe(II)、0.1 mg/L的Mn(II)、0.2 mg/L的Al(III),或者10倍饮用水国标限值浓度即3 mg/L的Fe(II)、1 mg/L的Mn(II)、2 mg/L的Al(III),再加入5.0 mg/L的游离氯,反应时间均为48 h,探究不同水质条件及不同离子浓度对PFOA富集的影响。

1.2.4 循环管道模拟实验

考虑到PFOA是水中最为常见的一种PFASs,采用聚氯乙烯(PVC)材质的矩形循环管道(长50 cm,宽20 cm),使用南方某市某水厂滤后水探究锰、铁、铝等复杂管道沉积物对PFOA的富集作用。循环管道分为氯消毒管道(添加NaClO)和未消毒管道(不添加NaClO)两组,各自设置两根管道作为平行实验,以此探究化学锰氧化作用和微生物锰氧化作用对PFOA富集的差异性;各管道中分别通入17 L水厂滤后水(未消毒),PFOA初始浓度为200 ng/L,Mn(II)浓度为100 μg/L,游离氯浓度为1.0 mg/L,然后间隔1 d重复投入相同浓度的PFOA、Mn(II)和游离氯,实验共进行218 d,药剂总计投加109次,平均流速为0.2 m/s,温度为(24±1)℃。在两组管道中嵌入管片来探究管道沉积物差异,以供后续对管道沉积物组分和质量进行检测^[5]。

实验结束后,取下管片放入100 mL去离子水中,加入1%的浓硝酸和6 mmol/L的盐酸羟胺,使复杂的锰、铁沉积物完全消解,随后用0.22 μm过滤器过滤,检测水样中PFOA和锰、铁、铝等离子浓度。

1.3 分析方法

采用电感耦合等离子体质谱法测定溶液中的

铁、锰、铝浓度,仪器检测限为0.1 μg/L;采用DPD方法测量溶液中残留的游离氯,结果以Cl₂计;采用pH计测量溶液pH。

PFASs水样的前处理方法:将100 mL水样通过0.22 μm水相针式聚醚砜过滤器过滤后,加入5 ng内标,摇匀。选用Oasis WAX SPE小柱通过固相萃取法富集样品中的PFASs,富集前对小柱进行活化。

PFASs使用Agilent 1290 Infinity HPLC系统与Agilent 6460三重四极杆质谱系统联用的高效液相色谱串联质谱仪(HPLC-MS/MS)进行检测,采用电喷雾离子源负离子模式(ESI⁻),质谱检测条件和仪器运行参数参考文献[6]。

2 结果与讨论

2.1 铁、锰颗粒物对PFASs的富集作用

当Fe(II)或Mn(II)浓度为1 mg/L,铁、锰颗粒物对PFOA、PFOS、PFBS均具有一定的富集作用,但对PFBA的富集不显著,具体如图1所示[0 h为初始PFASs浓度,4 h-对照为不加铁、锰放置4 h后的对照浓度,24 h-Mn为加入Mn(II)和氯反应24 h后的PFASs浓度,4 h-Fe为加入Fe(II)反应4 h后的PFASs浓度]。铁、锰氧化实验分别进行4 h和24 h,经检测反应后滤液中Fe(II)和Mn(II)浓度仅为0.002 9和0.001 3 mg/L,可判定Fe(II)、Mn(II)完全氧化为铁、锰颗粒物。

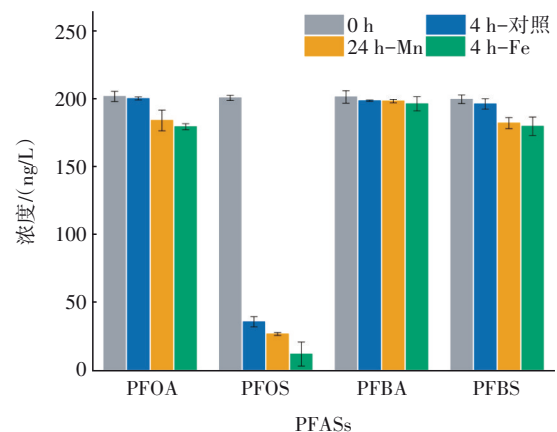


图1 1 mg/L的铁、锰颗粒物对PFASs的富集作用

Fig.1 Effect of 1 mg/L Fe and Mn particles on enrichment of PFASs

由于反应和PFASs的结构性质不同,铁、锰颗粒物与不同PFASs的相互作用存在差异。静电和疏水作用是影响富集的主要因素,对于短链PFASs来说,静电相互作用占主导地位,而长链PFASs则主要通

过疏水作用被吸附^[6]。本实验探究的4种PFASs均为阴离子型,而且疏水作用会随着C—F链长的增加而增强^[7],所以铁、锰颗粒物对长链PFOA和PFOS的富集作用更强。尽管同属于短链PFASs,相较于PFBA,PFBS多一个C—F键,空间结构更大,疏水性更强,且磺酸基团静电作用更强,故PFBS的富集量多于PFBA^[8]。

对于初始浓度为200 ng/L的PFOS,实验发现,仅通过一次聚醚砜针式过滤器过滤其浓度即损耗32%。Sörensén等人的研究也发现,0.22 μm聚醚砜过滤器会导致PFOS浓度损耗约29%,且该过滤器相比其他材料过滤器对PFASs的损耗是最低的^[9]。另外,Zenobio等人研究发现容器壁也会对PFOS产生吸附作用,本实验所用的容器为玻璃烧杯,玻璃能吸附约17%的PFOS(200 μg/L)^[10]。而本实验中PFOS初始浓度仅为200 ng/L,处于较低浓度,推测PFOS在反应过程中被玻璃烧杯壁吸附和过滤器截留,加之铁、锰颗粒物的吸附,反应结束后溶液中的PFOS浓度仅剩12.69和27.46 ng/L。

2.2 Fe(II)浓度对铁颗粒物富集PFASs的影响

无论是在饮用水处理系统还是输配系统中,铁颗粒物都广泛存在,铁混凝剂投加或管网输配过程都可能导致水中出现更高浓度的铁。因此,进一步探究了铁颗粒物浓度对PFASs的富集影响,结果见图2。随着Fe(II)初始浓度的增加,Fe(II)氧化-水解形成的铁颗粒物对4种PFASs的富集率也相应增加。将Fe(II)浓度由1 mg/L提升至5 mg/L,反应4 h后Fe(II)完全氧化形成铁颗粒物,PFOA的最终浓度从180.0 ng/L降至176.0 ng/L,富集率为12.0%;PFOS的最终浓度从12.7 ng/L降至2.4 ng/L,富集率为98.8%;PFBS的最终浓度从180.3 ng/L降至167.0 ng/L,富集率为16.5%。考虑到铁颗粒物对PFASs有富集作用,故将Fe(II)初始浓度继续提升至50 mg/L,探究较高浓度铁对PFASs的富集影响。结果发现,50 mg/L的Fe(II)完全氧化为铁颗粒物后,PFOA浓度下降至148.9 ng/L,富集率提升至25.6%;PFBS浓度下降至103.5 ng/L,富集率提升至48.3%;而PFBA浓度降至188.9 ng/L,富集率仅为5.6%。故随着铁颗粒物浓度的升高,其对PFOA和PFBS的富集作用大幅增加,而对PFBA的富集作用仅小幅增加。

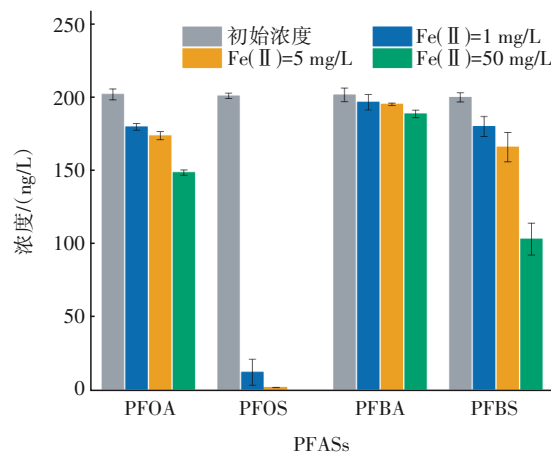


图2 不同浓度铁颗粒物对PFASs的富集影响

Fig.2 Effects of different concentrations of iron particles on enrichment of PFASs

2.3 铁锰铝共存形成的颗粒物对PFOA的富集

前述实验均采用去离子水配制的溶液进行,但实际的供水管网系统中存在各种各样的物质,如铝离子、有机物等,都会影响铁、锰颗粒物对PFASs的富集,故利用实际自来水探究金属颗粒物对PFOA的富集作用(已扣除自来水中的PFOA背景值)。

分别用去离子水和自来水作为实验水体,探究多金属共存对PFOA的富集作用,即饮用水国标限值的铁、锰、铝浓度及10倍国标限值浓度下对PFOA的富集。溶液中PFOA的初始浓度为200 ng/L,待Fe(II)和Mn(II)完全氧化形成颗粒物后[Al(III)并未完全形成颗粒物,还有部分为溶解态铝],对于去离子水体系,颗粒物浓度提高9倍后,PFOA浓度由192.1 ng/L降至174.8 ng/L,富集率由4.0%提升至12.6%;对于自来水体系,颗粒物浓度提高9倍后,PFOA浓度由175.9 ng/L降至142.8 ng/L,富集率由12.1%提升至28.6%,证实更高浓度的金属颗粒物更容易富集PFOA。对比两种水质,自来水体系中铁、锰颗粒物对PFOA的富集作用高于去离子水体系,这可能是由于自来水中存在的其他成分(如天然有机物、微生物、矿物质等)促进了金属颗粒物对PFOA的富集^[11]。

2.4 管道沉积物对PFOA的富集作用

通过长期运行循环管道模拟实验发现,未消毒管道中形成的颗粒物沉积量比氯消毒管道中形成的颗粒物沉积量要多,且沉积物是由铁、锰、铝等金属及生物膜构成的复合沉积物。在氯消毒管道中,Mn(II)主要是由于化学氧化形成锰颗粒物在管壁

上逐渐累积;而在未消毒管道中,Mn(II)被含锰氧化细菌的生物膜氧化成颗粒态 MnO_x ,从而使锰沉积在管道内壁。两组管道中锰和铝的沉积量存在显著差异,未消毒管道中锰和铝的沉积量均大于氯消毒管道,其中锰沉积量分别为298.6和164.7 mg/m^2 ,铝沉积量分别为204.5和115.7 mg/m^2 ;两组管道的铁沉积量差异较小,分别为42.7和48.1 mg/m^2 ;锰、铁、铝的总沉积量差异显著,分别为545.8和328.5 mg/m^2 。

对管道管片上的沉积物进行消解,得到未消毒管道中积累的PFOA量为89.37 $\mu g/m^2$,而氯消毒管道中积累的PFOA量为51.20 $\mu g/m^2$ 。对比两组管道,发现未消毒管道和氯消毒管道中1 mg 锰沉积物分别对应0.299和0.165 μg 的PFOA富集量,而烧杯实验体系中1 mg 锰颗粒物对应的PFOA富集量仅为0.02 μg 。模拟管道中单位质量锰富集的PFOA量远大于烧杯体系,这可能是由管道中铁、铝等其他颗粒物和生物膜的存在共同导致的,相关机理还需进一步研究。

为进一步研究管道内沉积物组分与PFOA富集量的关系,分别取未消毒管道和氯消毒管道的上、中、下部管片(两组管道分别有9个管片)进行消解和定量,并对各个管片上金属沉积量与沉积物中积累的PFOA进行线性拟合分析,结果见图3。可知,PFOA的积累量和铁、锰、铝的沉积量均呈显著正相关,锰、铁、铝的颗粒物/沉积物对PFOA的富集均有贡献。氯消毒管道中PFOA积累量和锰沉积量的线性拟合系数 R^2 高达0.7560,而在微生物作用下的未消毒管道中PFOA积累量和锰沉积量的线性拟合系数 R^2 为0.4347,表明在氯消毒管道中锰沉积物可能是影响PFOA积累量的一个主要因素。

进一步对两组管道中铁、锰、铝总沉积量和PFOA积累量进行线性拟合,发现两组管道中PFOA积累量与金属总沉积量呈线性正相关性。相比未消毒管道($R^2=0.4484$),氯消毒管道中PFOA积累量与金属总沉积量的线性关系更强($R^2=0.8872$),这可能是由于未消毒管道中生物膜的大量生长也对PFOA的富集有所贡献,从而导致锰、铁、铝总沉积量并不能完全反映对PFOA的富集潜力。以上结果也再次表明,相较于配制的去离子水体系,实际管道中PFOA的富集是沉积物中铁、锰、铝等复合颗粒物组分以及生物膜共同作用的结果。

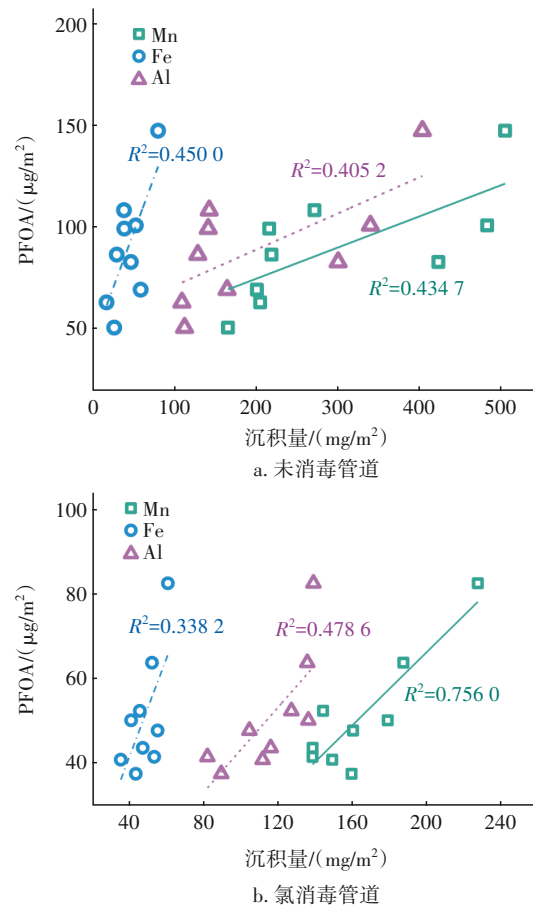


图3 管道中金属沉积量与PFOA积累量的线性拟合分析

Fig.3 Linear fitting analysis of metal deposition to accumulated PFOA in different pipes

2.5 饮用水管道中PFASs的释放风险

本研究表明,管道中的金属沉积物和微生物组分会明显富集常见的PFASs。Chen等人^[12]研究发现,相较于出厂水,管网水的PFASs浓度有升高的情况,并推测是管壁累积的PFASs释放所致。在本研究中,当管道中的沉积物完全释放进入水体,即两组管道实验中管壁(0.8 m^2)积累的PFOA量(未消毒管道为65.77 μg ,氯消毒管道为40.96 μg)全部释放进入管道水中(17 L),则水中PFOA浓度可以达到0.00387和0.00241 mg/L 。两组管道中积累的PFOA若完全释放,管网水中的PFOA浓度会显著高于我国《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)限值(0.00008 mg/L);即使仅释放1%,也远超美国环保署(USEPA)于2024年规定的4 ng/L 的PFOA最新限值。在这种情况下,即使出厂水完全达标,由于管网中积累的PFOA的释放,也可能会造成自来水中的PFOA浓度持续超标。饮用水管道中沉积物富

集及再释放 PFASs 所带来的超标风险和健康风险不容忽视。因此,建议采取有效措施控制管网沉积物的形成(如定期对饮用水管道进行清洗和维护),以减少沉积物和 PFASs 的积累。

3 结论

① 1 mg/L 的铁、锰颗粒物对 200 ng/L 的 PFOA、PFOS、PFBS 均有一定的富集作用,但是对 PFBA 的富集作用不显著,这和铁、锰颗粒物与 PFASs 的静电及疏水作用程度有关。除颗粒物外,PFOS 还易被过滤器和容器壁吸附。

② 颗粒物浓度是影响 PFASs 富集的重要因素,当铁颗粒物浓度达到 50 mg/L 时,PFOA 和 PFBS 的富集率分别为 25.6% 和 48.3%,但 PFBA 的富集率仍较低(5.6%)。

③ 相较于去离子水,在实际自来水中铁、锰、铝颗粒物对 PFOA 的富集作用更强。在以上两种水质条件下,3 mg/L Fe(II)、1 mg/L Mn(II)、2 mg/L Al(III)共存形成的复合颗粒物对 PFOA 的富集率分别为 12.6% 和 28.6%。

④ 利用实际水厂滤后水进行的循环管道模拟实验表明,铁、锰、铝等复合金属沉积物能显著富集 PFOA,且管壁沉积物中单位质量金属颗粒物对 PFOA 的富集量远大于去离子水实验体系,未来需要继续深入研究沉积物多组分复合作用下对 PFASs 的富集行为。

参考文献:

- [1] LI G W, MA X, CHEN R Y, et al. Field studies of manganese deposition and release in drinking water distribution systems: insight into deposit control [J]. *Water Research*, 2019, 163: 114897.
- [2] QI Z G, YU Y, LI G W, et al. Reduced formation of brominated trihalomethanes during chlorination of bromide-containing waters in the presence of Mn(II) [J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 920: 171001.
- [3] CHEN R Y, ZHUANG Y, YU Y, et al. Enhanced perfluorooctanoic acid (PFOA) accumulation by combination with in-situ formed Mn oxides under drinking water conditions [J]. *Water Research*, 2021, 190: 116660.
- [4] ZHANG J H, PANG H J, GRAY S, et al. PFAS

removal from wastewater by in-situ formed ferric nanoparticles: solid phase loading and removal efficiency [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021, 9: 105452.

- [5] LI G W, SU Y L, WU B, et al. Initial formation and accumulation of manganese deposits in drinking water pipes: investigating the role of microbial-mediated processes [J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, 56: 5497-5507.
- [6] GAGLIANO E, SGROI M, FALCIGLIA P P, et al. Removal of poly- and perfluoroalkyl substances (PFAS) from water by adsorption: role of PFAS chain length, effect of organic matter and challenges in adsorbent regeneration [J]. *Water Research*, 2020, 171: 115381.
- [7] MCCLEAF P, ENGLUND S, ÖSTLUND A, et al. Removal efficiency of multiple poly- and perfluoroalkyl substances (PFASs) in drinking water using granular activated carbon (GAC) and anion exchange (AE) column tests [J]. *Water Research*, 2017, 120: 77-87.
- [8] CHEN H T, REINHARD M, NGUYEN V T, et al. Reversible and irreversible sorption of perfluorinated compounds (PFCs) by sediments of an urban reservoir [J]. *Chemosphere*, 2016, 144: 1747-1753.
- [9] SÖRENGÅRD M, FRANKE V, TRÖGER R, et al. Losses of poly- and perfluoroalkyl substances to syringe filter materials [J]. *Journal of Chromatography A*, 2020, 1609: 460430.
- [10] ZENOBIO J E, SALAWU O A, HAN Z, et al. Adsorption of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) to containers [J]. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 2022, 7: 100130.
- [11] ZHANG Z M, SARKAR D, BISWAS J K, et al. Biodegradation of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS): a review [J]. *Bioresource Technology*, 2022, 344: 126223.
- [12] CHEN R Y, LI G W, YU Y, et al. Occurrence and transport behaviors of perfluoroalkyl acids in drinking water distribution systems [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 697: 134162.

作者简介:张子灏(1999—),女,河南荥阳人,硕士研究生,主要研究方向为饮用水系统中铁、锰颗粒物对微量有机/无机污染物的富集。

E-mail: 1213237032@qq.com

收稿日期:2024-10-10

修回日期:2024-11-15

(编辑:刘贵春)