

上海市饮用水中全氟化合物的污染现状及风险评估

任洋洋¹, 金玉娥², 许慧慧², 钱海雷², 郑唯韡¹, 伍晨², 郭常义²

1. 复旦大学公共卫生学院环境卫生教研室, 上海 200032

2. 上海市疾病预防控制中心, 上海 200336

摘要:

[背景] 全氟化合物 (PFAS) 具有持久性、蓄积性、迁移性和毒性, 广泛存在于各类水体中, 存在饮水途径摄入的风险。

[目的] 研究上海市饮用水中 PFAS 的污染状况, 并对其进行风险评估。

[方法] 选取长江口水源地和黄浦江上游水源地采集水源水, 分别编号为 A 和 B。以 A 为水源的水厂制水工艺有常规处理、深度处理 2 种, 分别随机抽取 1 个水厂采集出厂水; 以 B 为水源的水厂均已改为深度处理, 因此随机抽取 1 个水厂采集出厂水。于 2019 年 10 月 (平水期)、2019 年 12 月 (枯水期)、2020 年 7 月 (丰水期) 分别进行采样, 每个地点采集 2 个平行样品, 采样量为 1 L, 容器为棕色聚丙烯塑料瓶。采用固相萃取-超高效液相色谱串联质谱法, 测定水样中的 23 种全氟化合物, 运用美国环境保护署 (EPA) 推荐的非致癌物质健康风险模型进行风险评估。

[结果] 23 种目标物中, 水源水和出厂水中 100% 检出的分别为 14 种和 11 种, 检出物均包括全氟羧酸类和全氟磺酸类两类物质; 未检出的 PFAS 分别为 9 种和 12 种, 均为全氟酰胺类化合物。两类水体中 Σ PFAS (检出总浓度) 为 $15.52\sim 118.44 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 其中全氟辛酸 (PFOA) 和全氟丁酸 (PFBA) 为主要污染物, 最高浓度分别为 34.79 、 $29.99 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 且 PFOA 和全氟辛烷磺酸 (PFOS) 的浓度均未超过 EPA 规定的饮用水阈值 ($70 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$)。B 水源的 Σ PFAS 是 A 水源的 2.7 倍, 除全氟壬烷磺酸 (PFNS) 在 A 水源稍高外, B 水源的检出物浓度均高于 A 水源。A 水源的 PFAS 含量在不同时期差异较小, B 水源则表现为枯水期 > 平水期 > 丰水期。水处理工艺对 A 水源中的 PFAS 有较好的去除效果, 其中常规处理去除率 21.97%, 深度处理为 64.29%; 对 B 水源的去除效果不明显, 处理前后含量变化不大。PFOA、PFOS 的个人年超额风险均低于国际辐射防护委员会推荐的最大可接受风险 ($10^{-6}\cdot\text{年}^{-1}$)。

[结论] 上海市饮用水中存在一定程度的 PFAS 污染。PFOS 和 PFOA 经饮水途径对人体健康造成的个人年超额风险较低, 低于国际辐射防护委员会推荐的最大可接受水平。

关键词: 饮用水; 全氟化合物; 污染; 水处理工艺; 健康风险评估

Assessment of contamination and health risk of perfluoroalkyl substances in drinking water in Shanghai REN Yang-yang¹, JIN Yu-e², XU Hui-hui², QIAN Hai-lei², ZHENG Wei-wei¹, WU Chen², GUO Chang-yi² (1. Department of Environmental Health, School of Public Health, Fudan University, Shanghai 200032, China; 2. Shanghai Municipal Center for Disease Control and Prevention, Shanghai 200336, China)

Abstract:

[Background] Perfluoroalkyl substances (PFAS) with their persistence, accumulation, migration, and toxicity are widely found in various water bodies, indicating potential human exposure risk via drinking water.

[Objective] This study aims to analyze the pollution status of PFAS in drinking water in Shanghai and assess relevant human health risk.

[Methods] Source water samples were collected from two water sources (A and B) in Shanghai, including the Yangtze estuary water source and the Huangpu River upstream water source. According to water production process, treated water samples were collected from one routine treatment water plant and one deep treatment water plant which both used water source A,

DOI 10.13213/j.cnki.jeom.2020.20212

基金项目

上海市卫生健康委员会面上项目 (202040208)

作者简介

任洋洋 (1994—), 女, 硕士生;
E-mail: 18211020082@fudan.edu.cn

通信作者

郭常义, E-mail: guochangyi@scdc.sh.cn

利益冲突 无申报

收稿日期 2020-05-05

录用日期 2020-09-28

文章编号 2095-9982(2020)11-1089-06

中图分类号 R123.1

文献标志码 A

引用

任洋洋, 金玉娥, 许慧慧, 等. 上海市饮用水中全氟化合物的污染现状及风险评估 [J]. 环境与职业医学, 2020, 37 (11): 1089-1094.

▶ 本文链接

www.jeom.org/article/cn/10.13213/j.cnki.jeom.2020.20212

Funding

This study was funded.

Correspondence to

GUO Chang-yi, E-mail: guochangyi@scdc.sh.cn

Competing interests None declared

Received 2020-05-05

Accepted 2020-09-28

▶ To cite

REN Yang-yang, JIN Yu-e, XU Hui-hui, et al. Assessment of contamination and health risk of perfluoroalkyl substances in drinking water in Shanghai [J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2020, 37(11): 1089-1094.

▶ Link to this article

www.jeom.org/article/en/10.13213/j.cnki.jeom.2020.20212

as well as from one deep treatment water plant which used water source B. Samples were collected in October 2019 (level period), December 2019 (dry period), and July 2020 (wet period) respectively, with 2 parallel samples from each site, and stored in 1-litre brown polypropylene plastic containers. A total of 23 PFAS were determined by solid phase extraction and ultra high performance liquid chromatography tandem-mass spectrometry. Then the risks of non-carcinogenic chemicals was evaluated by US Environmental Protection Agency (EPA) health risk assessment models.

[Results] Among the 23 target substances, 14 and 11 kinds of PFAS were detected in all source water and treated water samples (100%), respectively, including perfluorinated carboxylic acid and perfluorinated sulfonic acid; 9 and 12 kinds of PFAS were not detected, respectively, and all were perfluoroamides. The total concentration of PFAS (Σ PFAS) in two types of water was 15.52 to 118.44 ng·L⁻¹, the highest concentrations of dominant perfluorooctanoic acid (PFOA) and perfluorobutanoic acid (PFBA) were 34.79 and 29.99 ng·L⁻¹, respectively, and the concentrations of PFOA and perfluorooctane sulfonate (PFOS) did not exceed the drinking water threshold (70 ng·L⁻¹) stipulated by US EPA. The Σ PFAS concentration of water source B was 2.7 times that of water source A. Except the perfluoro-1-nonanesulfonate (PFNS) slightly higher in water source A, the concentrations of detected substances in water source B were significantly higher than those in water source A. The concentration of PFAS in water source A showed little difference in different periods, while that in water source B was shown as dry period > level period > wet period. The PFAS in water source A were removed effectively by water treatment processes, as the removal rate was 21.97% by conventional treatment and 64.29% by deep treatment. The removal effect in water source B was not obvious, and the content of contaminants before and after treatment had little changes. The annual personal excess risks of PFOA and PFOS were lower than the maximum acceptable risk (10⁻⁶ per year) recommended by the International Committee of Radiological Protection (ICRP).

[Conclusion] There is slight PFAS contamination in Shanghai's drinking water. The annual personal excess risks of PFOS and PFOA via drinking water are low and below the maximum acceptable level recommended by the ICRP.

Keywords: drinking water; perfluoroalkyl substances; pollution; water treatment process; health risk assessment

全氟化合物 (perfluoroalkyl substances, PFAS) 是一类新型的持久性有机污染物, 具有疏水、疏油特性及良好的热稳定性, 自 20 世纪 50 年代起被广泛应用于炊具、离子活性剂、电镀等生活消费和工业领域。PFAS 在环境中难降解, 并可远距离迁移, 在高等生物体内蓄积^[1-2], 达到一定阈值则会产生相应的毒效应, 对健康产生影响。

近年来, 地表水、地下水、自来水中均检测到了 PFAS 的存在, 水体中 PFAS 主要来源于生活污水和工业废水, 尤其是大型氟工业园区和污水处理厂。研究显示, 我国境内河流湖泊 (如黄河、长江、海河、西湖、太湖等) 中均有不同程度检出^[3], 在我国东部地区 17 个城市的自来水中也检测到了 PFAS 的存在^[4], 因此饮用水中全氟化合物的污染状况也不容忽视。

本研究选取 23 种广泛应用的短、长链全氟化合物, 对以黄浦江上游、长江口为水源地的两大水源水及其不同制水工艺水厂的出厂水进行检测, 分析饮用水中全氟化合物的污染状况, 并对其暴露风险进行评价。

1 材料与方法

1.1 样品采集

根据水源来源, 选取长江口水源地和黄浦江上游水源地采集水源水 (分别为 A 和 B), 以 A 为水源的水厂制水工艺有常规处理、深度处理 2 种, 分别随机抽取 1 个水厂采集出厂水 (即 A-1、A-2); 以 B 为水源的

水厂均已改为深度处理, 因此随机抽取 1 个水厂采集出厂水 (即 B-1)。该采样过程在 2019 年 10 月 (平水期)、12 月 (枯水期) 和 2020 年 7 月 (丰水期) 各进行一次。采样量为 1 L, 容器为棕色聚丙烯塑料瓶, 样品在运输过程中需冷藏, 每个地点采集 2 个平行样品。聚丙烯塑料瓶需要提前用自来水、纯水、甲醇各冲洗 3 遍, 晾干备用。

1.2 仪器和试剂

23 种 PFAS 标准品均购自加拿大 Wellington, 分别为全氟丁酸 (perfluorobutanoic acid, PFBA)、全氟戊酸 (perfluoropentanoic acid, PFPeA)、全氟己酸 (perfluorohexanoic acid, PFHxA)、全氟庚酸 (perfluorohexanoic acid, PFHpA)、全氟辛酸 (perfluorooctanoic acid, PFOA)、全氟壬酸 (perfluorononanoic acid, PFNA)、全氟癸酸 (perfluorodecanoic acid, PFDA)、全氟十一烷酸 (perfluoroundecanoic acid, PFUnA)、全氟十二烷酸 (perfluorododecanoic acid, PFDoA)、全氟十三烷酸 (perfluorotridecanoic acid, PFTriA)、全氟十四烷酸 (perfluorotetradecanoic acid, PFTeDA)、全氟十六烷酸 (perfluorohexadecanoic acid, PFHxDA)、全氟十八烷酸 (perfluorooctadecanoic acid, PFODA)、全氟丁烷磺酸 (perfluorobutyl sulfonate, PFBS)、全氟戊烷磺酸 (perfluoro-1-pentane sulfonate, PFPeS)、全氟己烷磺酸 (perfluorohexyl sulfonate, PFHxS)、全氟庚烷磺酸 (perfluoroheptyl sulfonate, PFHpS)、全氟辛

烷磺酸 (perfluorooctane sulfonate, PFOS)、全氟壬烷磺酸 (perfluoro-1-nonanesulfonate, PFNS)、全氟癸烷磺酸 (perfluorodecyl sulfonate, PFDS)、全氟辛基磺酰胺 (perfluorooctanesulfonamide, PFOSA)、N-乙基全氟辛基磺酰胺乙酸 (N-ethyl perfluorooctane sulfonamidoacetic acid, N-EtFOSAA)、N-甲基全氟辛基磺酰胺乙酸 (N-methyl perfluorooctane sulfonamidoacetic acid, N-MeFOSAA)；内标 (14种)： $^{13}\text{C}_4$ -PFBA、 $^{13}\text{C}_5$ -PFPeA、 $^{13}\text{C}_5$ -PFHxA、 $^{13}\text{C}_4$ -PFHpA、 $^{13}\text{C}_8$ -PFOA、 $^{13}\text{C}_9$ -PFNA、 $^{13}\text{C}_6$ -PFDA、 $^{13}\text{C}_7$ -PFUnA、 $^{13}\text{C}_2$ -PFDoA、 $^{13}\text{C}_2$ -PFTeDA、 $^{13}\text{C}_2$ -PFHxDA、 $^{13}\text{C}_3$ -PFHxS、 $^{13}\text{C}_8$ -PFOS、 $^{13}\text{C}_8$ -PFOSA，均购于加拿大Wellington。

超高效液相色谱仪 (Agilent 1290, 美国 Agilent)，三重四级杆串联质谱仪 (QTRAP 6500⁺, 美国 Sciex)，BEH C18 色谱柱 (2.1×50 mm, 填料粒径 1.7 μm)，Agilent C18 柱 (4.6×50 mm)，固相萃取装置 (VisiprepTM DL, 美国 Supelco)，氮吹仪 (MultivapTM 118, 美国 Organomation Associates)，超纯水机 (MilliQ, 美国 Millipore)，离心机 (TGL-20M, 美国 Bioridge)，Oasis[®] WAX 固相萃取小柱 (6CC, 150 mg, 美国 Waters)，甲醇 (色谱级, 德国 Merck)，氨水 (分析纯, 中国国药集团化学试剂有限公司)，乙酸铵 (质谱级, 德国 CNW)，水 (质谱级, 德国 CNW)。

1.3 样品处理和分析

量筒量取 200 mL 水样，加入 0.925 g 乙酸铵，调节水样 pH 至 6.8~7.0，每份水样中加入 20 μL 100 μg·L⁻¹ PFAS 的内标混合溶液，混匀，原水水样经滤膜过滤后进行以上操作。水样经固相萃取装置进行富集和浓缩，洗脱后经 40°C 氮吹浓缩，用 60% 甲醇水溶液定容至 200 μL，离心后上机检测。

采用超高效液相色谱-三重四级杆串联质谱仪进行检测，具体参数如下：(1) 液相色谱条件。流动相：A 相——5 mmol·L⁻¹ 乙酸铵水溶液，B 相——5 mmol·L⁻¹ 乙酸铵 (95% 甲醇)；柱温：40°C；流速：0.4 mL·min⁻¹；梯度洗脱程序：0~0.5 min，B 为 30%；0.5~14 min，B 升至 95%，维持 2 min；16.0~16.5 min，B 降至 30%，维持 3.5 min。进样体积：10 μL；样品室温度：10°C。(2) 质谱条件。监测模式：负离子模式；扫描模式：多反应监测；气帘气：35.0 psi；碰撞活化参数：Medium；离子喷雾电压：-4 500 V；离子源温度：450°C；雾化气：50 L·h⁻¹；辅助气：50 L·h⁻¹。

1.4 质量控制

实验采用内标法进行定量分析。为减少背景值，

样品采集过程中严格避免含氟材料的使用，采样时戴手套，同时设立运输空白和流程空白，实验中使用的容器均用纯水、甲醇进行清洗。另外，实验中对空白样品进行加标以计算回收率，目标化合物回收率范围为 55.35%~156.8%。

1.5 饮用水中全氟化合物的风险评估

采用美国环境保护署 (United States Environmental Protection Agency, US EPA) 推荐的非致癌物质健康风险模型^[5]进行评估，计算公式如下： $R_{pv}=R/70$ ， $R=V_{LADD}\times 10^{-6}/V_{RFD}$ ， $V_{LADD}=C\times V_{IR}/V_{BW}$ 。R_{pv} 为个人平均年超额风险度；R 为经饮水途径的个人终生超额风险度；V_{LADD} 为单位体重日均暴露量，单位为 mg·kg⁻¹·d⁻¹；V_{RFD} 为非致癌物健康效应的参考剂量，单位为 mg·kg⁻¹·d⁻¹；C 为水中污染物的质量浓度 (下称浓度)，单位为 g·L⁻¹；V_{IR} 为饮水摄入量，单位为 mL·d⁻¹；V_{BW} 为体重，单位为 kg。人类平均寿命为 70 岁。US EPA 规定，PFOS 的 V_{RFD} 为 2.5×10⁻⁵ mg·kg⁻¹·d⁻¹，PFOA 的 V_{RFD} 为 3.33×10⁻⁴ mg·kg⁻¹·d⁻¹。

查阅中国人群暴露参数手册，获得上海市的相关参数，饮水摄入量为 2 025 mL·d⁻¹，体重为 62.2 kg，对 PFOA、PFOS 进行风险评估。所得结果与国际辐射防护委员会推荐的最大可接受风险 10⁻⁶·年⁻¹ 进行比较，以评估其健康风险。

2 结果

2.1 不同水源水、出厂水中 PFAS 的分布情况

水源水和出厂水中 PFAS 的浓度见表 1。水源水中检出率 100% 的物质为 14 种，包括 9 种全氟羧酸类和 5 种全氟磺酸类，PFTriA、PFTeDA、PFHxDA 等 9 种 PFAS 均未检出。水源水中，PFOA 为主要污染物，在 B 水源中浓度最高 (35.34 ng·L⁻¹)。B 水源的总浓度较高，是 A 水源的 2.7 倍。所有检出物中，PFNS 仅在 A 水源检出且浓度仅略高于检测限，浓度较低。除此之外，B 水源检出物浓度均显著高于 A，其中差异较大的物质包括 PFDA、PFHxS、PFPeA，分别是 A 水源的 20.13 倍、15.87 倍、6.88 倍，但 PFDA 和 PFPeA 在 B 水源均低于 5 ng·L⁻¹。出厂水中 100% 检出的物质有 11 种，包括 7 种全氟羧酸类和 4 种全氟磺酸类，与水源水相比，未检出物质多了 PFDA、PFUnA、PFDS 三种物质。出厂水的检出物中，PFOA 仍为主要污染物，其次为 PFBA，B 水源供应的水厂 B-1 中 PFOA 的浓度最高 (34.79 ng·L⁻¹)，与 B 水源水相比仅下降 1.6%。以 B 水源供应原水的出厂水中检出的 PFAS 均高于以 A 水源供应原水的出厂水。两类水体

的全部水样中, 检出的PFAS包括全氟羧酸类和全氟磺酸类, 全氟酰胺类物质均未检出, 其中全氟羧酸类检出浓度较高, 总浓度范围为13.78~91 ng·L⁻¹, 全氟磺酸类浓度相对较低, 总浓度范围为1.74~28.29 ng·L⁻¹。另外, PFOA、PFOS的浓度均低于美国EPA规定的饮用水阈值 (PFOA: 70 ng·L⁻¹; PFOS: 70 ng·L⁻¹) [6]。

另外, A的水源水经水厂净化处理后, 出厂水中PFAS的总浓度显著降低, 其中深度处理后总浓度降至15.52 ng·L⁻¹, 去除率达64.29%; 而常规处理效果稍差, 去除率仅21.97%, 且个别化合物 (PFOA和PFBA) 浓度仍在10 ng·L⁻¹以上。与A水源相比, B的水源水经深度处理后, 出厂水中的PFAS检出总浓度稍高于水源水, 单个检出物的浓度较水源水变化不大。

表1 水源水、出厂水中全氟化合物的浓度

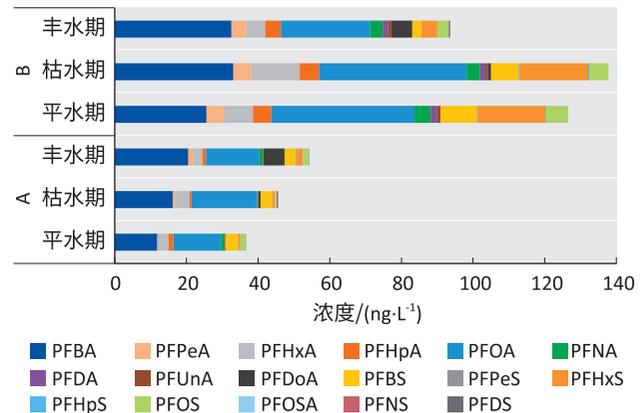
Table 1 The concentrations of PFAS in source water and treated water samples

检测物	单位 (Unit) : ng·L ⁻¹				
	A	A-1	A-2	B	B-1
全氟羧酸类化合物					
PFBA	16.21	12	6.14	30.44	29.99
PFPeA	0.67	0.27	0.08	4.61	4.57
PFHxA	3.29	3.02	1.81	8.98	8.89
PFHpA	0.96	0.74	0.36	4.97	4.88
PFOA	15.4	12.34	4.63	35.34	34.79
PFNA	0.72	0.5	0.31	3.92	4.06
PFDA	0.08	ND	ND	1.61	1.93
PFUnA	0.1	0.06	ND	0.83	0.91
PFDoA	0.3	0.13	0.14	0.3	0.13
PFTriA	ND	ND	ND	ND	ND
PFTeDA	ND	ND	ND	ND	ND
PFHxDA	ND	0.26	0.31	ND	ND
PFODA	ND	ND	ND	ND	ND
全氟磺酸类化合物					
PFBS	3.38	3.11	1.33	6.83	6.57
PFPeS	0.15	0.12	0.02	0.18	0.17
PFHxS	0.89	0.7	0.17	14.12	15.11
PFHpS	ND	ND	ND	0.16	0.16
PFOS	1.2	0.67	0.22	4.87	6.16
PFNS	0.06	ND	ND	ND	ND
PFDS	0.06	ND	ND	0.05	0.09
全氟酰胺类化合物					
PFOSA	ND	ND	ND	ND	0.03
N-EtFOSAA	ND	ND	ND	ND	ND
N-MeFOSAA	ND	ND	ND	ND	ND
合计	43.47	33.92	15.52	117.21	118.44

[注] A、B分别为长江口、黄浦江上游的水源水。A-1、A-2分别是对A采取常规处理、深度处理的出厂水; B-1为对B水源采取深度处理的出厂水。ND: 未检出。

2.2 不同时期各水源中PFAS的污染状况

两水源在不同时期的PFAS浓度差异见图1, 可发现A水源在平水期时水体中PFAS最低, 为36.67 ng·L⁻¹, 枯水期和丰水期时出现小幅度上升, 分别为45.59、48.23 ng·L⁻¹。B水源则相反, 水体中PFAS的浓度表现为枯水期>平水期>丰水期, 并且丰水期的PFAS含量降至90 ng·L⁻¹以下, 与前两个时期相比下降较为明显, 但该最低浓度仍明显高于A水源的最高浓度。另外, A、B两水源不同时期的水体中PFAS的组成成分也有所差异。A水源的构成成分在不同时期比较稳定, 主要成分为PFOA和PFBA两种PFAS; B水源的枯水期和平水期的构成相似, 主要为PFOA、PFBA、PFHxS三种, 而丰水期时水体中主要是前两种, PFHxS的浓度则降至5 ng·L⁻¹以下。



[注] A、B分别为长江口、黄浦江上游的水源水。

图1 不同时期的水源水中PFAS浓度比较

Figure 1 Comparison of PFAS concentrations in source water in different periods

2.3 水体中全氟化合物的风险评估

以上海市的人均每日饮水量推荐值计算的结果见表2。可见PFOA、PFOS的R_{pv}低于国际辐射防护委员会推荐的最大可接受风险 (10⁻⁶·年⁻¹)。以B水源供应的出厂水为饮用水的居民, 其日均暴露量和风险均较A水源供应的出厂水稍高, 并且PFOS的风险值高于PFOA。另外, 以两水源供应的出厂水为饮用水的居民, 均表现为LADD_{PFOA}>LADD_{PFOS}。

表2 不同区域全氟化合物的日均暴露量和风险值

Table 2 Lifetime average daily dose and excess risk of PFOS in different regions

水样	日均暴露量 / (LADD, mg·kg ⁻¹ ·d ⁻¹)		超额危险度 / 年 ⁻¹	
	PFOA	PFOS	PFOA	PFOS
A-1	4.0×10 ⁻⁷	2.2×10 ⁻⁸	1.7×10 ⁻¹¹	1.2×10 ⁻¹¹
A-2	1.5×10 ⁻⁷	2.2×10 ⁻⁸	6.5×10 ⁻¹²	1.2×10 ⁻¹¹
B-1	1.1×10 ⁻⁶	2.0×10 ⁻⁷	4.9×10 ⁻¹¹	1.1×10 ⁻¹⁰

3 讨论

近年来, PFAS在我国水体中不断被检出^[3, 7], 并多呈现出短链>中链>长链的现象。由于产量大、用途广泛, PFOA和PFOS是全氟化合物中最常被研究和报道的物质, 一直以来都是环境中存在的主要污染物。鉴于其对生物体的潜在毒性, 逐渐被世界上多数国家限制生产及使用。有研究者调查了2018年上海市地表水中PFAS的污染状况^[8], PFOA和PFBS为主要污染物, 且浓度均值分别为56.27、38.61 ng·L⁻¹, 相比之下, 本研究的水源水和出厂水中PFOA和PFBA为主要污染物, PFOA的浓度明显降低, 而PFBA则相对升高(地表水: 5.46 ng·L⁻¹; 本研究: 6.14~30.44 ng·L⁻¹); PFOS的差别较小, 均处于较低水平。另外多个研究^[4, 9-10]表明, 近年来水体中的PFOS显著减少, 浓度多降低至10 ng·L⁻¹以下, 而PFBS在环境中的含量逐渐增加, 这可能是短链的PFBS在工业上逐步代替PFOS使用的结果。本研究饮用水中PFBS浓度(1.33~6.83 ng·L⁻¹)也高于PFOS(0.22~6.16 ng·L⁻¹)。

本研究发现, 饮用水中的全氟羧酸类(PFCAs)浓度明显高于全氟磺酸类(PFSAs)。这与Mak等^[11]的调查相似, Mark还发现北京、沈阳、南京等也有类似情况, 而深圳、香港、澳门、武汉等与之相反, PFSAs浓度明显高于PFCAs。另外, PFAS在其他国家和地区的饮用水中也有检出, 如日本东京^[12](0.72~95 ng·L⁻¹)、泰国^[13](0.58~1.15 ng·L⁻¹), 均低于上海市的浓度(15.52~118.44 ng·L⁻¹); 法国^[14]的 Σ PFAS达199 ng·L⁻¹, 浓度相对较高。

上海市共有四大水源地, 分别由长江供水和黄浦江上游供水, 其中A水源由长江供水, 占上海原水供应规模的50%以上; B水源以黄浦江上游为水源, 供应范围为西南五区。黄浦江上游的太浦河是太湖流域的重要河道之一, 起到沟通太湖和黄浦江的作用, 同时太浦河两岸坐着众多的乡镇和企业, 其中工业的污染负荷占比较大, 理论上其水体中会存在较高浓度的PFAS。B水源是由黄浦江上游的太浦河供水的水源, 其 Σ PFAS是由长江水供水的A水源的2.7倍, 并且检出物中近90%的PFAS浓度明显高于A, 可见在全氟化合物污染程度方面, 长江水的水质要优于黄浦江, 这与Sun等^[15]的研究相符。

水源水在水厂经净化、过滤、消毒后形成出厂水, 供居民生产和生活使用。图1中显示, 不同水源的PFAS经水厂的去除效果有差别, A的水源水经深度

处理后, 水体中PFAS的去除率(64.29%)显著高于B(-1.05%), 考虑到两者之间 Σ PFAS及各检出物的浓度差异, 推测水体中PFAS的浓度对水处理的去除效果有一定影响, 只有处于某一浓度范围时, 现有的水处理技术才可以更有效地去除PFAS, 这就需要对PFAS建立合理的水质标准, 以保证饮用水的安全、无污染。

降雨量会对地表径流量产生一定影响, 进而影响水体中的污染物浓度。以B水源为例, 其水源会受到上游太湖水质的影响, 由图1可知, 丰水期PFAS的浓度较枯水期和平水期时分别下降了36.6%、30.9%, 这种季节性的差异主要是由于丰水期的降雨量大, 河流及湖泊中的PFAS受到稀释, 从而导致浓度降低。A水源的丰枯水期PFAS浓度变化不大, 可能原因是长江入海口处相对于湖泊、河流的水量更大, 降雨量对其中污染物的稀释作用不明显。另外, 降雨可能会将沿岸的生活、农业垃圾冲刷进流域内, 可能会在一定程度上增加水体中污染物的含量。

尽管上海饮用水中仍存在一定浓度的PFAS, 但结合风险评估的结果来看, 通过饮水途径摄入PFOA和PFOS的健康风险低于国际辐射防护委员会推荐的最大可接受风险, 这与汉江^[7]、北京部分地下水^[16]等结果相符。需要注意的是, 人体除了饮水途径, 还可通过食物、呼吸摄入PFAS, 其综合风险需要进一步研究。

参考文献

- [1] FANG S, CHEN X, ZHAO S, et al. Trophic magnification and isomer fractionation of perfluoroalkyl substances in the food web of Taihu Lake, China [J]. *Environ Sci Technol*, 2014, 48 (4): 2173-2182.
- [2] FANG S, ZHANG Y, ZHAO S, et al. Bioaccumulation of perfluoroalkyl acids including the isomers of perfluorooctane sulfonate in carp (*Cyprinus carpio*) in a sediment/water microcosm [J]. *Environ Toxicol Chem*, 2016, 35 (12): 3005-3013.
- [3] 王鑫璇, 张鸿, 王艳萍, 等. 中国七大流域全氟烷基酸污染水平与饮水暴露风险 [J]. *环境科学*, 2018, 39 (2): 703-710.
- [4] TAN KY, LU GH, PIAO HT, et al. Current contamination status of perfluoroalkyl substances in tapwater from 17 cities in the eastern China and their correlations with surface waters [J]. *Bull Environ Contam Toxicol*, 2017, 99 (2): 224-231.

- [5] U.S. Environmental Protection Agency. Guidelines for exposure assessment [R]. Washington, DC : U.S. Environmental Protection Agency, 1992.
- [6] U.S. Environmental Protection Agency. Drinking Water Health Advisories for PFOA and PFOS [R]. Washington, DC : U.S. EPA, 2016.
- [7] 李杰, 高月, 王之芬, 等. 汉江水体和沉积物中全氟化化合物的风险评估 [J]. 北京大学学报 (自然科学版), 2017, 53 (5) : 913-920.
- [8] SUN R, WU M, TANG L, et al. Perfluorinated compounds in surface waters of Shanghai, China : source analysis and risk assessment [J]. Ecotoxicol Environ Saf, 2018, 149 : 88-95.
- [9] SHAO M, DING G, ZHANG J, et al. Occurrence and distribution of perfluoroalkyl substances (PFASs) in surface water and bottom water of the Shuangtaizi Estuary, China [J]. Environ Pollut, 2016, 216 : 675-681.
- [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]. Ecotoxicol Environ Saf, 2017, 145 : 659-664.
- [11] MAK Y L, TANIYASU S, YEUNG L W Y, et al. Perfluorinated compounds in tap water from China and several other countries [J]. Environ Sci Technol, 2009, 43 (13) : 4824-4829.
- [12] Imai S, Kawanaka Y, Tsuchiya Y, et al. Concentrations and isomer profiles of perfluorinated organic compounds in tap water in Tokyo [J]. J Jpn Soc Water Environ, 2012, 35 : 57-64.
- [13] TABTONG W, BOONTANON S K, BOONTANON N. Fate and risk assessment of perfluoroalkyl substances (PFASs) in water treatment plants and tap water in Bangkok, Thailand [J]. Proced Environ Sci, 2015, 28 : 750-757.
- [14] BOITEUX V, DAUCHY X, ROSIN C, et al. National screening study on 10 perfluorinated compounds in raw and treated tap water in France [J]. Arch Environ Contam Toxicol, 2012, 63 (1) : 1-12.
- [15] SUN Z, ZHANG C, YAN H, et al. Spatiotemporal distribution and potential sources of perfluoroalkyl acids in Huangpu River, Shanghai, China [J]. Chemosphere, 2017, 174 : 127-135.
- [16] 高杰, 李文超, 李广贺, 等. 北京部分地区地下水中全氟化合物的污染水平初探 [J]. 生态毒理学报, 2016, 11 (2) : 355-363.

(英文编辑: 汪源; 责任编辑: 陈姣)

· 告知栏 ·

关于假冒《环境与职业医学》编辑的声明

近期发现有个人或机构通过电子邮件和微信冒用《环境与职业医学》编辑身份, 以组稿或确认稿件信息的名义, 请求添加作者的微信。

特此郑重声明: 本刊编辑不会以私人微信添加作者账号, 所有编辑均使用以 scdc.sh.cn 为后缀的邮箱, 请作者务必注意甄别。

本刊网址: www.jeom.org; 微信公众号: 环境与职业医学; E-mail: jeom@scdc.sh.cn; 电话: 021-62084529。

提醒: 不要轻易点开网址链接, 不要扫码或添加来路不明的微信号, 不要向假冒个人或机构转账或发送稿件。

如有疑问, 请及时与本刊编辑部联系确认。

《环境与职业医学》编辑部