

风险评估

湖南省市售动物源食品中全氟及多氟烷基化合物污染现状和
膳食暴露评估

谢燕湘, 刘凤蛟, 樊柯, 林永涛, 曾小元, 谢朝梅, 李兆敏, 刘素念
(常德市疾病预防控制中心, 湖南 常德 415000)

摘要:目的 调查分析湖南省市售动物源食品中全氟及多氟烷基化合物(PFASs)的污染现状及膳食暴露风险。方法 2023—2024年随机采集湖南省市售水产类、蛋类、畜肉类、乳品类动物源食品共266份,并采用超高效液相色谱-串联质谱法测定样品中23种PFASs含量,采用点评估法对动物源性食品中PFASs的膳食暴露风险进行评估。结果 共有202份样品被检出17种PFASs,总检出率为75.9%,各类食品的总检出率从高到低分别为水产类(100%)>蛋类(91.6%)>畜肉类(80.5%)>乳品类(24.2%),差异有统计学意义($\chi^2=94.69, P<0.05$);23种PFASs含量范围为0.01~8.17 ng/g,水产类的全氟辛烷磺酸(PFOS)含量均值最高为0.42 ng/g;各类食品以全氟辛烷羧酸、全氟壬烷羧酸、全氟己烷磺酸、全氟辛烷磺酸4种PFASs总量评估得到的危害商均<1。结论 湖南省市售动物源食品中PFASs污染较为普遍,但污染程度较轻,对居民健康影响有限。

关键词:湖南省;全氟及多氟烷基化合物;动物源食品;污染状况;膳食暴露评估

中图分类号:R155 文献标识码:A 文章编号:1004-8456(2025)07-0642-07

DOI:10.13590/j.cjfh.2025.07.007

Pollution status and dietary exposure assessment of per- and polyfluoroalkyl substances in
animal-derived food sold in Hu'nan Province

XIE Yanxiang, LIU Fengjiao, FAN Ke, LIN Yongtao, ZENG Xiaoyuan, XIE Chaomei,
LI Zhaomin, LIU Sunian

(Changde District Center for Disease Control and Prevention, Hu'nan Changde 415000, China)

Abstract: Objective To investigate and analyze the pollution status and dietary exposure risk of perfluorinated and polyfluorinated alkyl compound (PFASs) in animal-derived foods sold in Hu'nan Province. **Methods** From 2023 to 2024, a total of 266 samples of animal-derived foods including aquatic products, livestock meat, eggs, dairy products were randomly collected in Hu'nan Province. The content of 23 types of PFASs in the samples was determined by UPLC-MS/MS, and the dietary exposure of PFASs in animal derived foods was evaluated by the method of point estimation. **Results** Seventeen types of PFASs were detected in 202 samples, with a total detection rate of 75.9%. The overall detection rates of various types of food were ranked from high to low as follows: aquatic products (100%)>eggs (91.6%)>livestock meat (80.5%)>dairy products (24.2%), and the difference was statistically significant ($\chi^2=94.69, P<0.05$); the content range of 23 PFASs was 0.01-8.17 ng/g, with the highest average PFOS content in aquatic products being 0.42 ng/g, the HQ evaluated from the total assessment of four PFASs including PFOA, PFNA, PFHxS, and PFOS in various foods were all less than 1. **Conclusion** The contamination of PFASs in animal derived food sold in Hu'nan Province was relatively common, but the degree of contamination was relatively light, and the impact on residents' health was limited.

Key words: Hu'nan Province; Perfluorinated and polyfluorinated alkyl compounds; animal-derived food; pollution status; dietary exposure assessment

收稿日期:2025-03-12

基金项目:常德市科技局科技发展计划(2017S185)

作者简介:谢燕湘 女 主任技师 研究方向为卫生检验技术 E-mail: 843767823@qq.com

通信作者:刘素念 女 副主任医师 研究方向为疾病预防与控制 E-mail: 293574273@qq.com

全氟及多氟烷基化合物 (Perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances, PFASs) 是以全氟辛烷磺酸 (Perfluorooctane sulphonate, PFOS)、全氟辛烷羧酸 (Perfluorooctanoic acid, PFOA) 及其盐类为代表的**一大类人工合成有机物,其特征为碳链上全部或多个氢原子被氟原子取代而形成高能碳氟键。自 1948 年美国 3M 公司研发出 PFOS 以来,各国已先后推出相关类似化合物 4 000 多种,以其优异的热稳定性、化学稳定性、高表面活性、疏水疏油性、渗透性和润滑性而广泛地应用于各种生产和生活领域,如化工、纺织、消防、不粘锅涂层、食物包装等,并经废水排放、空气沉降、生物链蓄积等多种方式在环境中持续扩散和远距离迁移,可通过呼吸道、皮肤、食物、饮水等多种途径进入人体,因其疏水疏油的特点在脂质/水界面之间架起桥梁,能穿过胎盘和血脑屏障,与蛋白质结合后分布在细胞膜、细胞核等界面,影响细胞的物质交换、氨基酸合成、基因表达等,导致肝毒性、心血管毒性、神经毒性、免疫毒性及生殖和发育毒性等危害^[1-7]。2009 年和 2019 年《斯德哥尔摩公约》分别将 PFOS 和 PFOA 及其盐类列入持久性有机污染物名单,在全球范围内限制其生产和使用^[6],2024 年 12 月 31 日起美国夏威夷州对食品包装中 PFASs 的限制生效^[8]。2019 年我国规定禁止 PFOS 及其盐类除可接受用途外的生产、流通、使用 and 进出口^[9],2022 年我国生态环境部印发《重点管控新污染物清单(2023 年版)》于 2023 年 3 月 1 日起施行,将 PFOA 和全氟己基磺酸 (PFHxS) 等相关化合物纳入重点管控新污染物^[8],但目前尚未制定食品及其包装材料中 PFASs 限量要求。PFASs 的危险性与环境暴露量有关,目前普遍认为,对于非职业暴露人群,膳食摄入是 PFASs 的主要来源,且主要来源为鱼类和其他海产品^[9]。湖南省历来为鱼米之乡,省内河流湖泊密布,水产品丰富,畜牧业发达,改革开放以来各地工业产业园也蓬勃发展,不可避免存在环境污染风险。因此,对湖南省市售动物源食品中 PFASs 含量开展抽样调查和风险评估,能为合理制定限量要求提供数据支持,具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 样品来源

依据湖南省卫生健康委员会 2023—2024 年发布的《湖南省食品安全风险监测实施细则》,2023—2024 年 7~8 月在湖南省岳阳市、衡阳市、湘西土家族苗族自治州、常德市、长沙市 5 个地级市(州)的农贸市场、超市、路边摊等消费场所随机采集本地产

市售动物源性食品总计 266 份,包括水产类 68 份、蛋类 83 份、畜肉类 82 份、乳品类 33 份。

1.2 方法

1.2.1 监测项目及方法

参照《国家食品污染物和有害因素风险监测工作手册》,采用超高效液相色谱-串联质谱法对动物源性食品中 23 种全氟及多氟烷基化合物进行检测,详细信息见表 1。当信噪比 $S/N=3$ 时,确定目标化合物全氟丁烷羧酸 (Perfluorobutanecarboxylic acid, PFBA) 和全氟戊烷羧酸 (Perfluoropentane carboxylic acid, PFPeA) 的检出限 (Limit of detection, LOD) 为 0.02 ng/g,定量限 (Limit of quantitation, LOQ) 为 0.06 ng/g,其他 21 种 PFASs 的 LOD 为 0.01 ng/g,LOQ 为 0.03 ng/g。

1.2.2 暴露评估与风险特征描述

本研究采用危害商 (Hazard quotient, HQ) 评估当地居民通过市售动物源性食品摄入 PFASs 而面临的潜在健康风险。HQ ≥ 1 表示人体暴露于污染物具有潜在健康风险, HQ < 1 表示人体暴露的潜在健康风险较低,计算公式如式(1)、式(2)所示:

$$EDI = C \times IR / BW \quad (1)$$

$$HQ = EDI \times 7 / TWI \quad (2)$$

式中,EDI (Estimated daily intake) 为当地居民通过食物摄入 PFASs 估算的日均摄入量, ng/(kg·d); C 为食物中 PFASs 的平均含量, ng/g; IR 为食物的日均消费量, g/d,依据中国统计年鉴 2024 数据(表 6-22),湖南省 2023 年居民家庭人均食物年消费量分别为水产品 14.6 kg、蛋类 12.3 kg、畜肉 46.4 kg、乳品类 7.9 kg^[10],换算成日均消费量分别为水产类 40 g/d、蛋类 33.7 g/d、畜肉类 127 g/d、乳品类 21.6 g/d; BW 代表人群的体质量,取值为我国成年人平均体质量 60.6 kg^[7]; TWI (Tolerable weekly intake) 为每周容许摄入量,参考欧洲食品安全局 (European Food Safety Authority, EFSA) 2020 年确定 PFOA、PFNA、PFHxS、PFOS 的 4 种组合 PFASs 每周容许摄入量合计为 4.4 ng/kg·BW/week^[9]评估其健康危害。

1.3 统计学分析

数据结果使用 SPSS 20.0 软件进行统计分析,对低于检出限的数据均用 0 代替进行数据统计。采用 χ^2 检验对各指标的检出率进行统计分析,以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果与分析

2.1 湖南省市售动物源食品中 PFASs 污染状况

2023—2024 年随机抽检湖南省 4 类 266 份市售动物源食品中 23 种 PFASs,总计有 202 份样品共检出 17 种 PFASs,总检出率为 75.9%。其中水产

表 1 23 种全氟及多氟烷基化合物详细信息
Table 1 Detailed information on 23 per- and polyfluoroalkyl substances

中文名称	英文名称	缩略语	CSA 号	分子式
全氟丁烷羧酸	Perfluorobutanoic acid	PFBA	375-22-4	C ₄ HF ₇ O ₂
全氟戊烷羧酸	Perfluoropentanoic acid	PFPeA	2706-90-3	C ₅ HF ₉ O ₂
全氟己烷羧酸	Perfluorohexanoic acid	PFHxA	307-24-4	C ₆ HF ₁₁ O ₂
全氟庚烷羧酸	Perfluoroheptanoic acid	PFHpA	375-85-9	C ₇ HF ₁₃ O ₂
全氟辛烷羧酸	Perfluorooctanoic acid	PFOA	335-67-1	C ₈ HF ₁₅ O ₂
全氟壬烷羧酸	Perfluorononanoic acid	PFNA	375-95-1	C ₉ HF ₁₇ O ₂
全氟癸烷羧酸	Perfluorodecanoic acid	PFDA	335-76-2	C ₁₀ HF ₁₉ O ₂
全氟十一烷羧酸	Perfluoroundecanoic acid	PFuDA	2058-94-8	C ₁₁ HF ₂₁ O ₂
全氟十二烷羧酸	Perfluorododecanoic acid	PFDoA	307-55-1	C ₁₂ HF ₂₃ O ₂
全氟十三烷羧酸	Perfluorotridecanoic acid	PFTrDA	72629-94-8	C ₁₃ HF ₂₅ O ₂
全氟十四烷羧酸	Perfluorotetradecanoic acid	PFTeDA	376-06-7	C ₁₄ HF ₂₇ O ₂
全氟十六烷羧酸	Perfluorohexadecanoic acid	PFHxDA	67905-19-5	C ₁₆ HF ₃₁ O ₂
全氟十八烷羧酸	Perfluorooctadecanoic acid	PFODA	16517-11-6	C ₁₈ HF ₃₅ O ₂
全氟丁烷磺酸	Nonafluorobutane-1-sulfonic acid	PFBS	375-73-5	C ₄ HF ₉ O ₃ S
全氟戊烷磺酸	Perfluoropentane sulfonic acid	PFPeS	2706-91-4	C ₅ HF ₁₁ O ₃ S
全氟己烷磺酸	Perfluorohexane sulfonic acid	PFHxS	355-46-4	C ₆ HF ₁₃ O ₃ S
全氟庚烷磺酸	Perfluoroheptane sulfonic acid	PFHpS	375-92-8	C ₇ HF ₁₅ O ₃ S
全氟辛烷磺酸	Perfluorooctane sulfonic acid	PFOS	1763-23-1	C ₈ HF ₁₇ O ₃ S
全氟壬烷磺酸	perfluorononane sulfonic acid	PFNS	68259-12-1	C ₉ HF ₁₉ O ₃ S
全氟癸烷磺酸	Perfluorodecane sulfonic acid	PFDS	335-77-3	C ₁₀ HF ₂₁ O ₃ S
9-氯十六氟-3-氧烷酮-1-磺酸	9-Chlorohexadecafluoro-3-oxanone-1-sulfonic acid	6:2Cl-PFESA	756426-58-1	C ₈ HClF ₁₆ O ₄ S
11-氯二十氟-3-氧代十一烷-1-磺酸	11-chloroeicosafluoro-3-oxaundecane-1-sulfonic acid	8:2Cl-PFESA	763051-92-9	C ₁₀ HClF ₂₀ O ₄ S
4,8-二氧杂-3H-全氟壬酸	4,8-Dioxa-3H- perfluorononanoic acid	DONA	919005-14-4	C ₇ H ₂ F ₁₂ O ₄

类检出 16 种,蛋类和畜肉类各检出 9 种,乳品类仅检出 2 种,各类食品的总检出率从高到低分别为水产类(100%)>蛋类(91.6%)>畜肉类(80.5%)>乳品类(24.2%),差异有统计学意义($\chi^2=94.69, P<0.05$)。水产类中有多种全氟羧酸被普遍检出,其中 PFuDA(98.5%)、PFDA(97.1%)、PFTrDA(95.6%),检出率均>95%,PFNA(85.3%)、PFDoA(85.3%)、PFTeDA(64.7%)、PFBA(63.2%)、PFOA(51.5%)检出率也>50%,9 种全氟磺酸中仅 PFOS 检出率为 50%,其他均少量检出或未检出;蛋类和畜肉类中的 PFBA 检出率超过 50%,而乳品类仅 PFBA(24.2%)和 PFOS(6.1%)有少量检出。各类食品中的 Σ PFASs 含量范围为<0.02~11.1 ng/g,水产类中 Σ PFASs 含量最高为 11.1 ng/g。 Σ PFASs 含量均值从高到低分别为水产品(1.52 ng/g)>蛋类(0.27 ng/g)>乳品类(0.20 ng/g)>畜肉类(0.13 ng/g)。各类食品中 23 种 PFASs 污染水平及检出率详见表 2。

23 种 PFASs 含量范围为 0.01~8.17 ng/g,不同食品中各单体 PFAS 均值相差较大,水产类以 PFOS 均值最高为 0.42 ng/g,蛋类、畜肉类及乳品类以 PFBA 均值最高分别为 0.10、0.06、0.17 ng/g,各类食品中 23 种 PFASs 含量均值比较见图 1。

2.2 湖南省市售动物源食品中 PFASs 暴露评估结果

依据中国统计年鉴 2024 数据(表 6-22)给出的湖南省 2023 年居民家庭人均食物年消费量,结合

4 种组合 PFASs 的每周容许摄入量,评估湖南省居民经各类动物源食品暴露于 PFASs 的 HQ,结果显示各类食品中 4 种 PFASs 导致的 HQ 均<1,其中水产类导致的 HQ 最高,为 0.514,其次为畜肉类,HQ 为 0.267;由水产类评估得到的 HQ 占 4 类动物源食品总 HQ 的 60.3%,见表 3。

3 讨论

本次研究中湖南省市售水产类中 23 种 PFASs 总检出率达 100%,与 2020 年辽宁省鱼类 100% 的总检出率一致^[11],高于 2010—2012 年四川省鱼肉(20.83%)和 2016 年北京市水产品(70%)的总检出率^[9,13],蛋类和畜肉类中 23 种 PFASs 总检出率分别为 91.6% 和 80.5%,远高于 2010—2012 年四川省猪肉(4.17%)和 2016 年北京市蛋类(26.70%)、畜肉类(66.70%)的总检出率^[9,13],可能与本次检测的 PFASs 品种更多及检出限更低有关;水产类中 Σ PFASs 含量最高为 11.1 ng/g,高于 2020 年辽宁省鱼类(3.671 ng/g)的水平^[11],低于 2016 年北京市水产品(20.73 ng/g)和 2020 年湖北某典型地区水产品(75.114 ng/g)水平^[12-13],蛋类和畜肉类中 Σ PFASs 含量最高分别为 2.21、0.86 ng/g,均低于 2016 年北京市(9.29、3.68 ng/g)和 2020 年湖北某典型地区(7.581、2.512 ng/g)的水平^[12-13],可能由各地区环境污染水平差异导致,表明目前湖南省市售动物源性食品受 PFASs 污染较为普遍,但 Σ PFASs 含量在国

表2 湖南省市售动物源食品中23种PFASs污染水平/(ng/g)
Table 2 The pollution level of 23 PFASs in animal-derived food sold in Hu'nan Province

化合物	水产类(n=68)				蛋类(n=83)				畜肉类(n=82)				乳品类(n=33)			
	分布范围	检出率/%	检出份数	$\bar{x}\pm s$	分布范围	检出率/%	检出份数	$\bar{x}\pm s$	分布范围	检出率/%	检出份数	$\bar{x}\pm s$	分布范围	检出率/%	检出份数	$\bar{x}\pm s$
PFBA	<0.02~0.24	63.2	43	0.05±0.05	<0.02~0.30	81.9	68	0.10±0.06	<0.02~0.33	0.06±0.06	49	59.8	<0.02~1.75	0.17±0.46	8	24.2
PFPeA	<0.02~0.16	27.9	19	0.02±0.03	<0.02	0	0	<0.01±0.00	<0.02	<0.02±0.00	0	0	<0.02	<0.02±0.00	0	0
PFHxA	<0.01~0.02	1.5	1	<0.01±0.00	<0.01	0	0	<0.01±0.00	<0.01	<0.01±0.00	0	0	<0.01	<0.01±0.00	0	0
PFHpA	<0.01~0.02	4.4	3	<0.01±0.00	<0.01	0	0	<0.01±0.00	<0.01	<0.01±0.00	0	0	<0.01	<0.01±0.00	0	0
PFOA	<0.01~0.53	51.5	35	0.05±0.11	<0.01~0.12	21.7	18	0.01±0.02	<0.01~0.04	<0.01±0.02	2	2.4	<0.01	<0.01±0.00	0	0
PFNA	<0.01~0.63	85.3	58	0.11±0.11	<0.01~0.34	22.9	19	0.03±0.07	<0.01~0.16	0.01±0.06	6	7.3	<0.01	<0.01±0.00	0	0
PFDA	<0.01~1.78	97.1	66	0.14±0.23	<0.01~0.30	31.3	26	0.03±0.05	<0.01~0.04	<0.01±0.01	4	4.9	<0.01	<0.01±0.00	0	0
PFUdA	<0.01~2.93	98.5	67	0.37±0.46	<0.01~0.75	37.3	31	0.04±0.10	<0.01~0.05	<0.01±0.02	3	3.7	<0.01	<0.01±0.00	0	0
PFDoA	<0.01~0.49	85.3	58	0.08±0.09	<0.01~0.17	9.6	8	0.01±0.03	<0.01	<0.01±0.00	0	0	<0.01	<0.01±0.00	0	0
PFTtDA	<0.01~1.43	95.6	65	0.26±0.30	<0.01~1.03	30.1	25	0.05±0.13	<0.01~0.03	<0.01±0.01	4	4.9	<0.01	<0.01±0.00	0	0
PFTeDA	<0.01~0.19	64.7	44	0.04±0.05	<0.01~0.16	14.5	12	0.01±0.02	<0.01	<0.01±0.00	0	0	<0.01	<0.01±0.00	0	0
PFHxDA	<0.01	0	0	<0.01±0.00	<0.01	0	0	<0.01±0.00	<0.01	<0.01±0.00	0	0	<0.01	<0.01±0.00	0	0
PFODA	<0.01	0	0	<0.01±0.00	<0.01	0	0	<0.01±0.00	<0.01	<0.01±0.00	0	0	<0.01	<0.01±0.00	0	0
PFBS	<0.01~0.27	1.5	1	<0.01±0.03	<0.01	0	0	<0.01±0.00	<0.01~0.07	<0.01±0.01	1	1.2	<0.01	<0.01±0.00	0	0
PFPeS	<0.01	0	0	<0.01±0.00	<0.01	0	0	<0.01±0.00	<0.01	<0.01±0.00	0	0	<0.01	<0.01±0.00	0	0
PFHxS	<0.01	0	0	<0.01±0.00	<0.01	0	0	<0.01±0.00	<0.01	<0.01±0.00	0	0	<0.01	<0.01±0.00	0	0
PFHpS	<0.01	0	0	<0.01±0.00	<0.01	0	0	<0.01±0.00	<0.01	<0.01±0.00	0	0	<0.01	<0.01±0.00	0	0
PFOS	<0.01~8.17	50	34	0.42±1.11	<0.01	0	0	<0.01±0.00	<0.01~0.68	0.06±0.18	21	25.6	<0.01~0.50	0.03±0.10	2	6.1
PFNS	<0.01	0	0	<0.01±0.00	<0.01	0	0	<0.01±0.00	<0.01	<0.01±0.00	0	0	<0.01	<0.01±0.00	0	0
PFDS	<0.01~0.05	1.5	1	<0.01±0.01	<0.01	0	0	<0.01±0.00	<0.01	<0.01±0.00	0	0	<0.01	<0.01±0.00	0	0
6:2Cl-PFESA	<0.01	0	0	<0.01±0.00	<0.01~0.24	1.2	1	0.01±0.03	<0.01~0.06	<0.01±0.01	1	1.2	<0.01	<0.01±0.00	0	0
8:2Cl-PFESA	<0.01~0.04	1.5	1	<0.01±0.00	<0.01	0	0	<0.01±0.00	<0.01	<0.01±0.00	0	0	<0.01	<0.01±0.00	0	0
DONA	<0.01~0.06	2.9	2	<0.01±0.03	<0.01	0	0	<0.01±0.00	<0.01	<0.01±0.00	0	0	<0.01	<0.01±0.00	0	0
Σ PFASs	0.07~11.1	100	68	1.52±1.68	<0.02~2.21	91.6	76	0.27±0.38	<0.02~0.86	0.13±0.14	66	80.5	<0.02~1.75	0.20±0.46	8	24.2

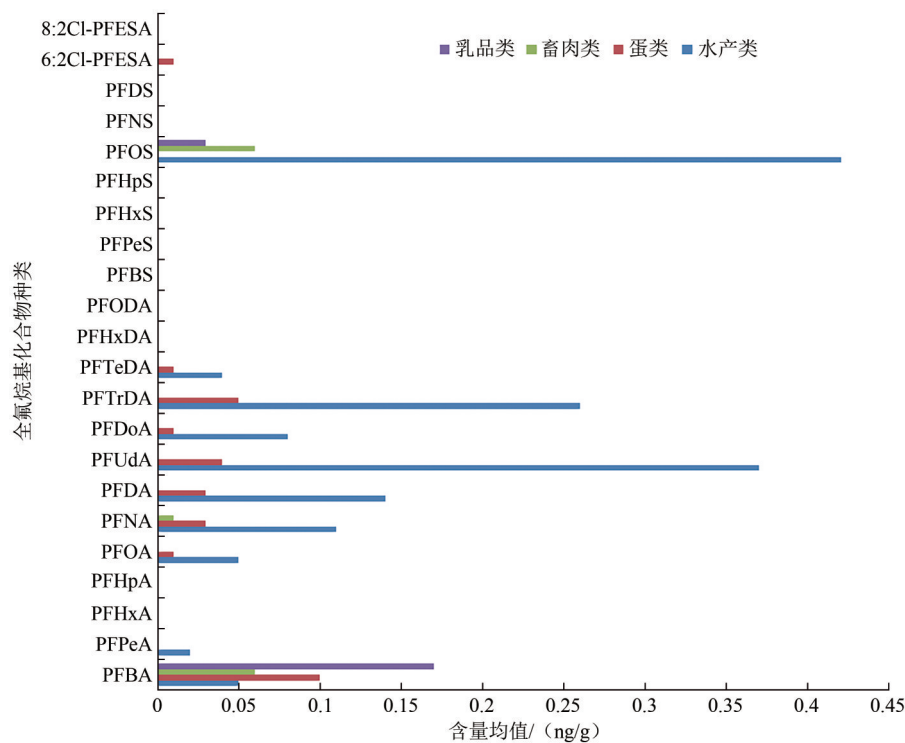


图1 湖南省市售动物源食品中23种PFASs含量均值比较

Figure 1 Comparison of the average content of 23 PFASs in animal-derived foods sold in Hu'nan Province

表3 湖南省市售动物源食品中PFASs危害商(HQ)

Table 3 Hazard quotient (HQ) of PFASs in animal-derived foods sold in Hu'nan Province			
食品种类	日均消费量/(g/d)	\sum_4 PFASs(PFOA+PFNA+PFHxS+PFOS)	HQ 所占比例/%
水产类(n=68)	40	0.514	60.3
蛋类(n=83)	33.7	0.045	5.3
畜肉类(n=82)	127	0.267	31.3
乳品类(n=33)	21.6	0.026	3.1
总计(n=266)	222.3	0.852	100

内处于相对较低的水平。既往研究显示,经济发展较为发达地区较经济发展较为落后地区,以及工业污染区较非工业污染区的环境中,PFASs 检出浓度更高,居民暴露于 PFASs 导致的危险比也更高^[14]。湖南省内罕有大型氟化工业园,经济发展水平在全国排名居中,落后于北京及湖北,略高于辽宁,本次调查结果显示湖南省 4 类动物源食品中以 4 种 PFASs (PFOA+PFNA+PFHxS+PFOS) 限量评估得到的 HQ 均<1,其中水产类食品 HQ 最高仅为 0.514,远低于 2020 年湖北某典型地区水产类食品中以 PFOS 限量评估的 HQ(2.462)^[12],与 2020 年辽宁省水产类食品中以 PFOS 限量评估的 HQ(0.0196~0.587)接近^[11],提示湖南省市售动物源食品中全氟及多氟烷基化合物污染程度较轻,对居民健康影响有限。

一般认为,长链 PFASs 的毒性强于短链 PFASs^[12],且动物体内 PFASs 的碳原子数量在 7~11 时,富集效应随着碳链的增长而增强,但碳原子数量>11 之后,由于分子体积增大,难以通过生物体的细胞膜,降

低了细胞对 PFASs 的摄入能力,富集效应随着碳链的增长而减弱^[6,14]。本次调查的 23 种 PFASs 在水产类中以 PFUdA(98.5%)、PFDA(97.1%)、PFTrDA(95.6%)3 种中长链单体检出率最高,中链 PFOS 含量均值最高,而蛋类、畜肉类和乳品类中检出率及含量均值最高的单体 PFAS 均为短链 PFBA,显示随着食物链延伸,低等的水产动物普遍富集环境中各种 PFASs 污染,而较高等的禽类和哺乳动物则主要富集中短链 PFASs,且富集程度相对较弱,提示消费者食用蛋类、畜肉类和乳品类较食用水产类摄入的全氟化合物毒性更低。2018 年欧洲食品安全局估算消费者通过膳食接触到的全氟化合物有 86% 来自鱼类和其他海产品,本次研究中湖南省市售水产类中 \sum PFASs 含量均值达 1.52 ng/g,是同期湖南省市售蛋类(0.27 ng/g)、畜肉类(0.13 ng/g)及乳品类(0.20 ng/g) \sum PFASs 含量均值之和的 2.5 倍,由水产类中 4 种组合 PFASs 均值评估得到的 HQ 占 4 类动物源食品总 HQ 的 60.3%,说明湖南省消费者通过动物源食品暴露于全氟化合物的健康风险主要

来源于水产类,与欧洲食品安全局的研究结论基本一致。

2009年以来各国先后对 PFOA、PFOS 及其盐类进行限制和控制,许多新型氟化合物开始生产和使用并用作替代品,包括 PFBA 等短链 PFASs 和含有官能团的全氟聚醚,如各种全氟聚醚羧酸(PFECAs)和磺酸(PFESAs)逐渐被广泛使用^[11]。既往调查中,2015年北京密云水库鱼肉中12种PFASs全部检出,以长链PFUdA含量均值最高为1.68 ng/g^[15],2020年湖北某典型地区水产类中14种PFASs全部检出,以中链PFOS含量均值最高为7.316 ng/g^[12],同期辽宁省鱼类中16种PFASs全部检出,以短链PFBA含量均值最高为1.354 ng/g^[11],本次湖南水产类中23种PFASs检出16种,以中链PFOS含量均值最高仅为0.42 ng/g,各种单体的含量均值较往年其他地区有大幅下降,说明PFASs各组分在不同地区及不同时期的污染程度存在极大差异,可能与各地工农业生产导致的环境污染有关,也显示近年来我国对PFASs等持久性有机污染物的管控政策初见成效。值得注意的是本次调查在水产类、蛋类和畜肉类食品中都不同程度检出了6:2Cl-PFESA、8:2Cl-PFESA和DONA等新型PFASs,其生物累积性及毒性效应目前还不明确,可能与PFOS相当或更强^[11],其健康风险有待进一步研究。

本研究调查了湖南省市售水产、畜肉、乳品、蛋类4类食品中23种PFASs含量,对其他市售食品如蔬菜、水果、粮食等暂未涉及,也未考虑食物包装材料可能的迁移及烹饪方式的影响等因素,因此本研究对PFASs的暴露评估还存在不确定性,未来还需要进行更全面的风险评估。

综上所述,湖南省市售动物源食品中全氟及多氟烷基化合物污染较为普遍,但污染程度较轻,对居民健康影响有限,湖南省消费者食用市售蛋类、畜肉类和乳品类较市售水产类的健康风险更低。部分新型氟化合物在水产类、蛋类和畜肉类中有不同程度检出,其健康风险还需要持续关注。鉴于本次抽样调查样品种类偏少,未能覆盖湖南省所有地市,评估结果存在不确定性,且本次评估暂未考虑儿童和孕妇等生长发育的特殊性,今后有必要完善调查方法,进一步开展相关研究。

参考文献

- [1] 刘晓晖,胡宏,李双月,等.全氟辛烷磺酸神经发育毒性机制研究进展[J].生态毒理学报,2013,8(5):643-649.
LIU X H, HU H, LI S Y, et al. Research progress on mechanisms in the developmental neurotoxicity of PFOS[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2013, 8(5): 643-649.

- [2] 林乐诗,李文娟,滕胜,等.长沙市孕妇妊娠早期血清全氟化合物暴露水平及影响因素研究[J].湖南师范大学学报(医学版),2024,21(1):135-147.
LIN L S, LI W J, TEN S, et al. Serum levels of per-and polyfluoroalkyl substances and their determinants in early pregnant women in Changsha city[J]. Journal of Hunan Normal University (Medical Science), 2024, 21(1): 135-147.
- [3] 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.
REN Y Y, JIN Y E, XU H H, 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.
- [4] 李冰洁,陈金媛,刘铮铮,等.浙江省大气颗粒物PM_{2.5}中全氟化合物污染特征分析及健康风险评估[J].环境科学,2022,43(2):639-648.
LI B J, CHEN J Y, LIU Z Z, et al. Pollution characteristics and health risk assessment of perfluorinated compounds in PM_{2.5} in Zhejiang province[J]. Environmental Science, 2022, 43(2): 639-648.
- [5] 方淑红,朱和祥,叶芝祥,等.成都市道路积尘中全氟化合物的污染特征及暴露风险评估[J].环境科学,2019,40(12):5265-5271.
FANG S H, ZHU H X, YE Z X, et al. Pollution characteristics and exposure risk assessment of perfluoroalkyl substances in road dust, Chengdu[J]. Environmental Science, 2019, 40(12): 5265-5271.
- [6] 朱永乐,汤家喜,李梦雪,等.全氟化合物污染现状及与有机污染物联合毒性研究进展[J].生态毒理学报,2021,16(2):86-99.
ZHU Y L, TANG J X, LI M X, et al. Contamination status of perfluorinated compounds and its combined effects with organic pollutants[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2021, 16(2): 86-99.
- [7] 国家疾病预防控制中心.中华人民共和国卫生行业标准 环境化学污染物参考剂量推导技术指南:WS/T 10006—2023[EB/OL].(2023-12-27),[2025-03-10].https://www.ndcpa.gov.cn/jbkzzx/c100201/common/content/content_1813493780939911168.html.
National Disease Control and Prevention Administration. Standard of Health Industry of the People's Republic of China Technical guidance for deriving reference dose of environmental chemical pollutants: WS/T 10006—2023[EB/OL].(2023-12-27),[2025-03-10].https://www.ndcpa.gov.cn/jbkzzx/c100201/common/content/content_1813493780939911168.html.
- [8] 中华人民共和国北京海关.2024年全球PFAS管控法规盘点及应对[EB/OL].(2024-06-27)[2025-03-10].http://beijing.customs.gov.cn/beijing_customs/ztzl1/jgjmzl/gzld43/5956421/index.html.
Beijing Customs of the People's Republic of China. Inventory of global PFAS control regulations in 2024 and its countermeasures[EB/OL].(2024-06-27)[2025-03-10].http://beijing.customs.gov.cn/beijing_customs/ztzl1/jgjmzl/gzld43/5956421/index.html.
- [9] 田洛嘉,张誉,张静,等.四川省猪肉与鱼肉全氟化合物污

- 染水平和膳食暴露评估[J]. 毒理学杂志, 2024, 38(3): 215-220, 226.
- TIAN L J, ZHANG Y, ZHANG J, et al. Perfluorinated compounds pollution levels and dietary exposure assessment of pork and fish in Sichuan province[J]. Journal of Toxicology, 2024, 38(3): 215-220, 226.
- [10] 国家统计局. 中国统计年鉴 2024. [EB/OL]. (2024-07-12) [2025-03-10]. <https://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/2024/indexch.htm>.
- National Bureau of Statistics. Statistical Yearbook of China in 2024. [EB/OL]. (2024-07-12) [2025-03-10]. <https://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/2024/indexch.htm>.
- [11] 张敏, 蔡丹, 陈小霞, 等. 辽宁省鱼类水产品中全氟化合物及其替代品的污染特征与健康风险评估[J]. 环境科学, 2024, 43(7): 2224-2235.
- ZHANG M, CAI D, CHEN X X, et al. Contamination characteristics and health risk assessment of poly-and perfluoroalkyl substances and alternatives in fish from Liaoning province[J]. Environmental Chemistry, 2024, 43(7): 2224-2235.
- [12] 张恣意, 曹文成, 周妍, 等. 湖北某典型地区动物源食品中全氟及多氟烷基化合物的污染现状和膳食暴露评估[J]. 食品工业科技, 2021, 42(20): 214-222.
- ZHANG Z Y, CAO W C, ZHOU Y, et al. Pollution status and dietary exposure assessments of per- and polyfluoroalkyl substances in animal food from a typical area in Hubei province[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(20): 214-222.
- [13] 刘逸飞, 李阳, 赵楠楠, 等. 北京市售动物源性食品中全氟化合物赋存及居民摄入风险评估[J]. 环境化学, 2021, 40(11): 3360-3367.
- LIU Y F, LI Y, ZHAO N N, et al. Occurrence of perfluoroalkyl substances in animal-derived food in Beijing and risk assessment of residents' intake[J]. Environmental Chemistry, 2021, 40(11): 3360-3367.
- [14] 张恣意, 龚艳, 曹文成, 等. 我国主要食品中全氟烷基化合物的污染现状及膳食暴露评估研究进展[J]. 食品工业科技, 2021, 42(8): 410-416.
- ZHANG Z Y, GONG Y, CAO W C, et al. Research progress of concentrations and exposure assessment of perfluorinated alkyl substances in main food in China[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(8): 410-416.
- [15] 柳思帆, 王铁宇, 薛科社, 等. 北京水源地鱼体全氟化合物的暴露水平及其健康风险[J]. 生态毒理学报, 2017, 12(1): 111-118.
- LIU S F, WANG T Y, XUE K S, et al. Occurrence and human health risk of PFASs in fishes from drinking water sources of Beijing[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2017, 12(1): 111-118.