· 营养与食品卫生 ·

内蒙古地区典型畜产品中全氟和多氟烷基化合物污染调查与膳食暴露评估

王茜[1],王朝亮[2],张超[2],常春霞[2],侯坤[2],李嘉凝[2],商慧敏[2],蒲云霞[2]
1. 包头医学院公共卫生学院,内蒙古 包头 014010;2. 内蒙古自治区疾病预防控制中心

摘要:目的　掌握内蒙古地区液态乳与畜肉中全氟和多氟烷基化合物(perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances, PFASs)的污染状况及其分布特征,评估其人群膳食暴露健康风险,为国家开展食品安全风险评估提供科学依据,推动 PFASs 防控措施的制定与实施。**方法**　采集内蒙古地区 12 个盟市地产液态乳与畜肉样本,采用高效液色谱 - 串联质谱法对样本中 23 种全氟和多氟烷基化合物进行检测与分析,采用日均摄入量(EDI)与每周膳食暴露量(EWI)与危害商(HQ)法对内蒙古地区人群通过液态乳与畜肉摄入的全氟辛酸(Perfluorooctanoic Acid PFOA)、全氟辛烷磺酸(Perfluorooctane Sulfonate PFOS)、全氟壬酸(Perfluorononanoic Acid PFNA)、全氟己烷磺酸(Perfluorohexane Sulfonate PFHxS)总量开展暴露评估。**结果**　共采集液态乳与畜肉样本 454 份,其中液态乳样本 214 份,畜肉样本 240 份。检测结果显示液态乳样本中 23 种 PFASs 的总体检出率为 48.13%(103/214),检出率较高的为全氟丁烷羧酸(Perfluorobutanoic acid PFBA)、PFHxS、全氟戊烷羧酸(Perfluoropentanoic acid PFPeA),检出率分别为 31.31%(67/214)、13.08%(28/214)、11.21%(24/214);畜肉样本中 PFASs 的总体检出率为 59.17%(142/240),检出率较高为 PFPeA、全氟辛烷磺酸钾(Potassium perfluorooctanesulfonate PFOS)、PFBA,检出率分别为 23.75%(57/240)、20.83%(50/240)、19.58%(47/240);评估结果表明,内蒙古地区人群通过液态乳与畜肉摄入的 PFOA、PFOS、PFNA、PFHxS 的总量的危害商均 <1。**结论**　内蒙古地区液态乳与畜肉中 PFASs 污染水平较低,人群通过液态乳与畜肉摄入的 PFOA、PFOS、PFNA、PFHxS 膳食暴露风险较低。

关键词:内蒙古地区;液态乳;畜肉;调查分析;全氟和多氟烷基化合物;污染;暴露评估
中图分类号:R155.5　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**1003 - 8507(2026)10 - 1791 - 07
DOI:10.20043/j.cnki.MPM.202601346

Investigation of per - and polyfluoroalkyl substances contamination in livestock products from Inner Mongolia and dietary exposure assessment

WANG Qian*, WANG Zhao - liang, ZHANG Chao, CHANG Chun - xia, HOU Kun, LI Jia - ning, SHANG Hui - min, PU Yun - xia
* *School of Public Health, Baotou Medical College, Baotou, Inner Mongolia* 014010, *China*

Abstract: Objective　To investigate the contamination status and distribution characteristics of perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in liquid milk and livestock meat in Inner Mongolia, to assess the health risks of dietary exposure in the population, to provide a scientific basis for national food safety risk assessment, and to promote the formulation and implementation of PFASs prevention and control measures. **Methods**　Samples of locally produced liquid milk and livestock meat were collected from 12 leagues and cities in Inner Mongolia. High - performance liquid chromatography - tandem mass spectrometry (HPLC - MS/MS) was used to detect and analyze 23 PFASs in the samples. The estimated daily intake (EDI), estimated weekly intake (EWI), and hazard quotient (HQ) methods were applied to conduct an exposure assessment on the total intake of perfluorooctanoic acid (PFOA), perfluorooctane sulfonate (PFOS), perfluorononanoic acid (PFNA), and perfluorohexane sulfonate (PFHxS) through liquid milk and livestock meat consumption among the population in Inner Mongolia. **Results**　A total of 454 liquid milk and livestock meat samples were collected, including 214 liquid milk samples and 240 livestock meat samples. The detection results showed that the overall detection rate of 23 PFASs in liquid milk samples was 48.13% (103/214). The predominant compounds detected were perfluorobutanoic acid (PFBA), PFHxS, and perfluoropentanoic acid (PFPeA), with detection rates of 31.31% (67/214), 13.08% (28/214), and 11.21% (24/214), respectively. The overall detection rate of PFASs in livestock meat samples was 59.17% (142/240). The compounds with higher detection rates were PFPeA, potassium perfluorooctanesulfonate (PFOS), and PFBA, with detection rates of 23.75%

基金项目:内蒙古自治区科技计划项目(2021GG0119)
作者简介:王茜(2000—),女,硕士在读,研究方向:食品安全风险监测与评估
通信作者:蒲云霞,E - mail:btlisa2008@163.com

(57/240), 20.83% (50/240), and 19.58% (47/240), respectively. The assessment results indicated that the HQs for the total intake of PFOA, PFOS, PFNA, and PFHxS through liquid milk and livestock meat in the Inner Mongolia population were all < 1. **Conclusion** The contamination level of PFASs in liquid milk and livestock meat in Inner Mongolia is relatively low, and the dietary exposure risk of total PFOA, PFOS, PFNA, and PFHxS through liquid milk and livestock meat consumption is low.

Keywords: Inner Mongolia region; Liquid milk; Livestock meat; Investigation and analysis; Polyfluoroalkyl and perfluoroalkyl substances; Risk assessment

全氟和多氟烷基化合物(perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances, PFASs)是一类人工合成的有机化合物,被广泛用于消防泡沫、不粘涂层、食品包装及化妆品等工业与消费品中[1-4]。由于 PFASs 耐高温、抗降解,因此在环境中持久存在,广泛分布在大气、土壤、水体等介质[5-12]。毒理学研究表明,PFASs 暴露与发育、神经、肝脏、生殖、免疫等多系统毒性密切相关[13-17]。PFASs 的暴露途径主要通过膳食摄入、空气颗粒物吸入及皮肤接触,其中膳食是最主要的暴露途径,通常情况下,PFAS 会通过受污染的水源、食品包装材料以及食品加工环节进入食物链[18],食物链的富集效应使液态乳和畜肉可能成为潜在的风险食品。此外研究还发现,由于 PFAS 极易与蛋白质发生结合,导致肉类、蛋类和乳类等动物源性食品成为此类物质的高频检出基质[19]。2023 年 11 月,国际官方分析化学家协会(AOAC)发布的 PFASs 的标准方法性能要求(SMPR 2023.003),规定在农产品、饮料、乳制品、鸡蛋、海产品、肉类及饲料中检测 30 种 PFASs 的方法开发与验证要求[20];欧盟委员会(EU)亦在 2022/1431 建议中提出食品中 PFASs 的监测要求[21]。截至目前,欧盟(2023/915)仅对 PFOS、PFOA、PFNA、PFHxS 四种 PFASs 设定限量值,其他全氟和多氟烷基化合物尚无统一标准[22]。欧洲食品安全局(EFSA)在其发布的科学意见中建议,应严格监控食品中的 PFAS 含量,以保护消费者健康[23]。中国生态环境部在《重点管控新污染物清单(2023 年版)》中规定,禁止生产、加工和使用全氟辛基磺酸及其盐类(PFOS 类)、全氟辛酸及其盐类(PFOA 类)以及全氟己基磺酸及其盐类(PFHxS 类)[24]。我国现有 PFASs 的监测数据多集中于东部沿海和中部地区的动物源性食品以及海产品等。内蒙古作为液态乳与畜肉的重要生产大省,缺乏系统的污染调查研究。本研究主要对内蒙古地产的液态乳和畜肉进行采样,采用液相色谱-串联质谱法(LC-MS/MS)对 23 种常见 PFASs 进行定量检测与分析,旨在掌握内蒙古地区液态乳与畜肉中 PFASs 的污染状况与分布特征,评估我区人群通过液态乳与畜肉摄入的 PFOS、PFOA、PFNA、PFHxS 四种 PFASs 的健康风险,为国家开展食品安全风险评估提供科学依据,推动 PFASs 防控措施的制定与实施。

1 材料与方法

1.1 样品 2024 年 3 月至 2025 年 6 月,在内蒙古地区 12 个盟市共采集畜产品样本 454 份,包括液态乳 214 份(调制乳样本 56 份,巴氏杀菌乳样本 35 份,灭菌乳样本 69 份,发酵乳样本 54 份)和畜肉样本 240 份(羊肉样本 127 份,牛肉样本 113 份)。样本采自内蒙古 12 个盟市的超市、商店、农贸市场和网店,覆盖了主要人群消费的主要环节。保证了样本的代表性。

1.2 方法

1.2.1 样品检测 根据《2024 年国家食品污染物和有害因素风险监测工作手册》,液态乳与畜肉样品中的 PFASs 均采用液相色谱-串联质谱法测定样品中 23 种 PFASs。定量限与检出限见表 1。

表 1 23 种 PFASs 定量限与检出限的详细信息

Table 1 Detailed information on the limits of quantification and detection for 23 PFASs

中文名称	英文名称	缩略语	CAS 登录号	检出限(LOD, μg/kg)	定量限(LOQ, μg/kg)
全氟丁烷羧酸	Perfluorobutanoic acid	PFBA	375-22-4	0.02	0.06
全氟戊烷羧酸	Perfluoropentanoic acid	PFPeA	2706-90-3	0.02	0.06
全氟己烷羧酸	Perfluorohexanoic acid	PFHxA	307-24-4	0.01	0.03
全氟庚烷羧酸	Perfluoro heptanoic acid	PFHpA	375-85-9	0.01	0.03
全氟辛烷羧酸	Perfluorooctanoic acid	PFOA	335-67-1	0.01	0.03
全氟壬烷羧酸	Perfluorononanoic acid	PFNA	375-95-1	0.01	0.03
全氟癸烷羧酸	Perfluorodecanoic acid	PFDA	335-76-2	0.01	0.03
全氟十一烷羧酸	Perfluoroundecanoic acid	PFUdA	2058-94-8	0.01	0.03
全氟十二烷羧酸	Perfluorododecanoic acid	PFDoA	307-55-1	0.01	0.03
全氟十三烷羧酸	Perfluorotridecanoic acid	PFTrDA	72629-94-8	0.01	0.03

（续表）

中文名称	英文名称	缩略语	CAS 登录号	检出限（LOD，μg/kg）	定量限（LOQ，μg/kg）
全氟十四烷羧酸	Perfluorotetradecanoic acid	PFTeDA	376－06－7	0.01	0.03
全氟十六烷羧酸	Perfluorohexadecanoic acid	PFHx DA	67905－19－5	0.01	0.03
全氟十八烷羧酸	Perfluorooctadecanoic acid	PFODA	16517－11－6	0.01	0.03
全氟丁烷磺酸钾	Potassium Perfluorobutanesulfonate acid	PFBS	29420－49－3	0.01	0.03
全氟己烷磺酸钠	Sodium Perfluorohexanesulfonate	PFHxS	82382－12－5	0.01	0.03
全氟辛烷磺酸钾	Potassium perfluorooctanesulfonate	PFOS	2795－39－3	0.01	0.03
全氟癸烷磺酸钠	Sodium perfluorodecanesulfonate	PFDS	2806－15－7	0.01	0.03
全氟戊烷磺酸	Perfluoropentanesulfonic acid	PFPeS	2706－91－4	0.01	0.03
全氟庚烷磺酸	Perfluoroheptanesulfonic acid	PFHpS	375－92－8	0.01	0.03
全氟壬烷磺酸	perfluorononanesulfonic acid	PFNS	98789－57－2	0.01	0.03
4.8－二氧杂－3H－全氟壬酸	4,8－Dioxa－3H－perfluorononanoic acid	ADONA	919005－14－4	0.01	0.03
6：2 氯代多氟烷基醚磺酸盐	6：2 chlorinated polyfluorinated ether sulfonate	6:2Cl－PFESA	73606－19－6	0.01	0.03
8：2 氯代多氟烷基醚磺酸盐	8：2 chlorinated polyfluorinated ether sulfonate	8:2Cl－PFESA	83329－89－9	0.01	0.03

1.2.2　质量控制　（1）样本采集过程中的质量控制：随机抽样，要采集内蒙古地区 12 个盟市生产的液态乳与畜肉，采集的样本类别包括液态乳与畜肉（牛肉、羊肉），采样环节要覆盖流通环节、收购环节。（2）检测过程中的质量控制：检测 PFASs 时，采用全过程空白试验、平行双样测定、样本加标回收率及有证标准物质等方法进行质量控制。

1.2.3　数据处理　本研究使用 Excel 2007 软件和 R 4.3.1 语言软件进行检测数据统计分析，运用秩和检验和 χ^2 检验对平均含量与率进行比较分析，检验水准 $\alpha=0.05$。

本研究按照世界卫生组织（World Health Organization，WHO）对食品中低水平污染物可信评价的要求，当样本中 PFASs 含量低于 LOD，则存在两种情况的处理方式。当检出率≥60% 时，使用 LOD 来替代未检出的值。当检出率低 <60%，采用 LOD 值的一半（1/2LOD）来替代未检出值[25]。

1.2.4　暴露评估　本研究采用危害商（Hazard quotient，HQ）评估方法对内蒙古地区居民通过畜产品摄入 PFASs 而面临的潜在健康风险，当 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）、式（3）所示。

$$EDI=\frac{C\times IR}{BW} \quad (1)$$

$$EWI=EDI\times 7 \quad (2)$$

$$HQ=\frac{EWI}{TWI} \quad (3)$$

其中，EDI（Estimated Daily Intake）代表估算的日均摄入量[ng/（kg · d）]，C 为食品中 PFASs 的平均残留浓度（ng/g），IR 为日均消费量（g/d）（依据国家食品安全风险评估中心（CFSA）2020 年开展的中国居民食物消费量调查数据库计算得出的内蒙古地区居民日均消费量），BW 为人群平均体重。2020 年，欧洲食品安全局（EFSA）发布了关于全氟化合物的风险评估报告。鉴于四种全氟烷基物质（PFOS、PFOA、PFNA 和 PFHxS）对动物的影响、毒代动力学特征以及在人血中的浓度均类似，EFSA 的食品污染物评估专家组（CONTAM 小组）决定对这四种 PFASs 进行联合评估。根据现有的动物和人类研究，对免疫系统的影响被认为是风险评估的关键效应。在两项人体研究中，1 岁和 5 岁儿童血清中四种 PFASs 总和的未观察到有害作用浓度分别为 31.9 ng/ml 和 27.0 ng/ml。使用 PBTK 模型估计，1 岁儿童 31.9 ng/ml 的血清水平相当于母体的长期暴露剂量为 1.16 ng/（kg · d）。由于这四种 PFASs 存在随时间的累积效应，CONTAM 小组确定这四种 PFASs（PFOA、PFNA、PFHxS 和 PFOS）的 TWI 为 4.4 ng/（kg · week）[26]。该 TWI 可保护人体免受其他潜在的不良反应，并以此作为评估健康危害的基准。

2　结　果

2.1　液态乳与畜肉中全氟和多氟烷基化合物的检测结果分析　内蒙古地区液态乳与畜肉中 PFASs 总体检出率较低，为 53.96%（245/454）。其中，214 份液态乳中 23 种 PFASs 的总体检出率为 48.13%，检出率较高的为 PFBA、PFHxS、PFPeA，检出率分别为 31.31%（67/214）、13.08%（28/214）、11.21%（24/214）；240 份畜肉中 PFASs 的总体检出率为 59.17%（142/240），检出率较高的为 PFPeA、PFOS、PFBA，检出率分别为 23.75%（57/240）、20.83%（50/240）、19.58%（47/240）。采用两独立样本秩和检验对液态乳与畜肉中的含量均值（不满足正态性）进行统计学分析（检验水准 $\alpha=0.05$），结果表明，PFBA（$P<0.001$）、PFPeA（$P<0.001$）、PFNA（$P=0.011$）、PFDA（$P<0.001$）、6:2Cl－PFESA（$P<0.001$）与 PFOS（$P<0.001$）在畜肉与液态乳中的平均含量差异有统计

学意义。此外,牛肉与羊肉 PFASs 检出率分别为 61.94%(70/113)和 56.69%(72/127),两组差异无统计学意义(χ^2 = 0.683, P = 0.409);对同一种 PFASs,采用两独立样本秩和检验比较不同畜肉品种的平均含量(检验水准 α = 0.05),结果表明,仅有 PFOS 在牛肉和羊肉中的平均含量差异具有统计学意义(P = 0.006)。

表 2 液态乳与畜肉中 PFASs 的检测结果与统计分析表

Table 2 Detection results and statistical analysis table of PFASs in livestock meat and liquid milk

化合物类别	液态乳				牛肉				羊肉			
	均值(μg/kg)	P95(μg/kg)	最大值(μg/kg)	检出率(%)	均值(μg/kg)	P95(μg/kg)	最大值(μg/kg)	检出率(%)	均值(μg/kg)	P95(μg/kg)	最大值(μg/kg)	检出率(%)
ADONA	0.005 3	0.005 0	0.035 0	0.94	0.005 0	0.005 0	0.005 0	0.00	0.005 0	0.005 0	0.005 0	0.00
6:2Cl - PFESA	0.007 8	0.039 0	0.043 0	8.41	0.005 3	0.005 0	0.039 0	0.88	0.005 5	0.005 0	0.040 0	1.57
8:2Cl - PFESA	0.005 1	0.005 0	0.018 0	0.94	0.005 0	0.005 0	0.005 0	0.00	0.005 0	0.005 0	0.005 0	0.00
PFBS	0.005 1	0.005 0	0.019 0	0.47	0.005 0	0.005 0	0.005 0	0.00	0.005 8	0.005 0	0.112 0	0.79
PFHpS	0.005 1	0.005 0	0.022 0	0.94	0.005 3	0.005 0	0.025 0	1.77	0.005 0	0.005 0	0.005 0	0.00
PFHpA	0.005 0	0.005 0	0.011 0	0.47	0.005 1	0.005 0	0.013 0	1.77	0.005 0	0.005 0	0.005 0	0.00
PFDS	0.005 1	0.005 0	0.031 0	0.94	0.005 8	0.005 0	0.068 0	2.66	0.005 0	0.005 0	0.005 0	0.00
PFDA	0.005 1	0.005 0	0.024 0	0.47	0.006 2	0.015 0	0.032 0	7.97	0.005 9	0.005 0	0.055 0	3.94
PFHxS	0.005 7	0.011 0	0.016 0	13.08	0.006 8	0.014 0	0.044 0	13.27	0.008 9	0.029 0	0.082 0	18.11
PFHxA	0.007 6	0.005 0	0.472 0	4.21	0.005 4	0.005 0	0.021 0	3.54	0.006 7	0.010 0	0.149 0	6.30
PFNS	0.005 1	0.005 0	0.018 0	0.94	0.005 1	0.005 0	0.018 0	0.88	0.005 1	0.005 0	0.011 0	0.79
PFNA	0.005 1	0.005 0	0.027 0	0.47	0.007 3	0.005 0	0.006 0	6.20	0.005 2	0.005 0	0.023 0	1.57
PFOdA	0.005 0	0.005 0	0.005 0	0.00	0.005 0	0.005 0	0.005 0	0.00	0.005 0	0.005 0	0.005 0	0.00
PFDoA	0.005 3	0.005 0	0.065 0	0.94	0.005 0	0.005 0	0.005 0	0.00	0.005 0	0.005 0	0.005 0	0.00
PFHxDA	0.005 7	0.005 0	0.101 0	1.40	0.005 0	0.005 0	0.005 0	0.00	0.005 0	0.005 0	0.005 0	0.00
PFTrDA	0.005 0	0.005 0	0.005 0	0.00	0.005 0	0.005 0	0.005 0	0.00	0.005 0	0.005 0	0.005 0	0.00
PFTeDA	0.005 2	0.005 0	0.028 0	1.40	0.005 0	0.005 0	0.005 0	0.00	0.005 0	0.005 0	0.005 0	0.00
PFUdA	0.005 1	0.005 0	0.028 0	0.47	0.005 0	0.005 0	0.005 0	0.00	0.006 4	0.005 0	0.091 0	3.15
PFPeS	0.005 1	0.005 0	0.020 4	0.94	0.005 1	0.005 0	0.017 0	0.88	0.006 4	0.005 0	0.102 0	2.36
PFPeA	0.034 0	0.008 0	1.060 0	11.22	0.112 0	0.377 0	4.160 0	21.24	0.081 2	0.354 0	2.360 0	26.98
PFOS	0.005 5	0.005 0	0.031 0	5.14	0.018 7	0.094 0	0.176 0	28.32	0.010 0	0.035 0	0.114 0	14.17
PFOA	0.005 6	0.005 0	0.118 0	0.94	0.005 8	0.005 0	0.047 0	2.66	0.005 7	0.005 0	0.037 0	3.94
PFBA	0.070 2	0.247 0	4.220 0	31.31	0.040 0	0.260 0	0.428 0	19.47	0.044 0	0.135 0	1.220 0	19.68
总计	-		-	48.13	-		-	61.94	-		-	56.69

注:- 表示无数值。

2.2 液态乳与畜肉中全氟和多氟烷基化合物的暴露评估

2.2.1 不同畜产品 PFASs 的暴露评估 依据内蒙古地区居民液态乳与畜肉的消费量,结合 4 种 PFASs 的总量每周容许摄入量,评估内蒙古地区居民液态乳与畜肉暴露于 PFASs 的 EDI、EWI 与 HQ。结果显示内蒙古地区居民通过液态乳与畜肉摄入 4 种 PFASs(PFOA + PFNA + PFHxS + PFOS)的 HQ 均 < 1,全人群液态乳与畜肉总 HQ 为 0.246,其中液态乳 HQ 为 0.038,羊肉 HQ 为 0.020,牛肉 HQ 为 0.012。表明内蒙古地区居民通过液态乳与畜肉暴露于 PFASs 导致的风险较低。见表 3。

2.2.2 不同年龄组(岁)液态乳与畜肉 PFASs 的暴露评估 依据不同年龄组(3 ~ 14、15 ~ 44、45 ~ 59、60 ~ 74、≥75 岁)液态乳与畜肉的日均消费量,对摄入 PFASs 的风险进行暴露评估。结果显示,HQ 均 < 1(0.199 ~ 0.476)。见表 4。

表 3 液态乳与畜肉中 PFASs(PFOA + PFNA + PFHxS + PFOS)的暴露评估结果

Table 3 The assessment results of PFASs (PFOA + PFNA + PFHxS + PFOS) exposure in liquid milk and livestock meat

食品种类	日均消费量(g/d)	EDI [ng/(kg·d)]	EWI [ng/(kg·d)]	HQ
液态乳	65.67	0.024	0.168	0.038
牛肉	12.00	0.008	0.056	0.012
羊肉	25.23	0.012	0.084	0.020
合计	102.90	0.044	0.308	0.070

3 讨 论

全氟和多氟烷基化合物在液态乳与畜肉中均有检出,样本总检出率分别为 48.13% 与 59.17%。液态乳中检出率较高的为 PFBA、PFHxS、PFPeA,检出率分别为 31.31%(67/214)、13.08%(28/214)、

表 4　不同年龄组(岁)液态乳与畜肉中的 PFASs(PFOA + PFNA + PFHxS + PFOS)的暴露评估结果

Table 4　Exposure assessment results of PFASs (PFOA + PFNA + PFHxS + PFOS) in liquid milk and livestock meat across different age groups

组别	日均消费量 (g/d)	EDI (ng/(kg · d))	EWI (ng/(kg · d))	HQ	HQ 所占比例(%)
3 ~ 14	111.01	0.299	2.093	0.476	32
15 ~ 44	93.84	0.125	0.875	0.199	14
45 ~ 59	94.71	0.127	0.889	0.202	14
60 ~ 74	127.46	0.173	1.211	0.276	19
≥75 岁	138.46	0.198	1.386	0.315	21

注:此年龄分段沿用 2000—2001 年《全球疾病负担(GBD)技术报告》提出的"统计用年龄组"框架[27]。

11.21%(24/214);畜肉中检出率较高的为 PFPeA、PFOS、PFBA,检出率分别为 23.75%(57/240)、20.83%(50/240)、19.58%(47/240)。液态乳与畜肉中的全氟和多氟烷基化合物主要来自受污染的饲料和水,导致 PFASs 在其血液和组织中发生富集[28]。

本研究在液态乳中主要检出 PFBA、PFHxS、PFPeA,检出值范围分别为 ND(低于检出限)~4.220 μg/kg、LOD ~ 0.016 μg/kg、LOD ~ 1.060 μg/kg。2016 年北京[3]市售液态乳的 PFASs 研究中仅检测了 7 种化合物,且仅检出了国内外高度关注的 PFOA,检出率为 23.3%,高于本研究中 PFOA 的检出率(0.94%);2018 年成都[29]地区针对 17 种 PFASs 的研究中,检出率较高的为 PFOA、PFHpA 和 PFHxA,其中液态乳中 PFOA(0.377 ~ 3.870 μg/kg)的检出值高于本研究(ND ~ 0.118 0 μg/kg);2025 年重庆市[30]对动物源食品中 PFASs 的检测发现,液态乳样本中主要检出 PFBA 与 PFPeA 两种 PFASs,与本研究的检出情况一致;波兰[31]一项关于液态乳中 PFASs 的研究显示,液态乳检出率较高的为 PFOS(100.0%)、PFOA(100.0%)、PFHxS(93.3%)、PFBA(80.0%),分别高于本研究中这 4 种物质的检出率(5.14%、0.94%、13.08%、31.31%);瑞典[32]的液态乳 PFASs 检测研究中,检出率较高的为 PFOS、PFOA、PFHxS,检出率均为 100.0%,均高于本研究。

畜肉中 PFASs 的总体检出率为 59.17%(142/240),检出率较高的为 PFPeA、PFOS、PFBA,检出率分别为 23.75%(57/240)、20.83%(50/240)、19.58%(47/240)。对比国内其他省市,北京[3]市售畜肉 PFASs 检测研究中,畜肉样本 PFASs 总检出率为 66.7%,高于本研究,且牛肉与羊肉中 PFHxA 含量水平(ND ~ 0.54 ng/g、ND ~ 0.28 ng/g)均高于本研究中 PFHxA 的含量水平(牛肉 ND ~ 0.021 0 μg/kg;羊肉 ND ~ 0.149 0 μg/kg);湖南省的研究[33]表明,畜肉中 PFASs 检出率(80.5%)高于本研究(59.2%),且 PFOS 检出率为 25.6%,也高于本研究(20.83%);2025 年上海市[34]的研究中,畜肉主要检出 PFBA(54.0%)、PFOA(20.8%)和 PFOS(18.3%),其中 PFOS 低于本研究检出率(20.83%)。2010 年挪威[35]针对畜肉中 PFASs 检测的研究表明,PFOS 与 PFOA 的检出率均为 100.0%,均高于本研究,检出值范围为 0.022 ~ 0.100 μg/kg,略低于本研究(ND ~ 0.176 0 μg/kg)。

评估结果表明,内蒙古地区人群通过液态乳与畜肉暴露于 PFASs 的 HQ < 1,表明该地区人群暴露风险处于可接受水平,提示内蒙古地区液态乳与畜肉中 PFASs 的污染较轻。

液态乳和畜肉作为内蒙古居民膳食蛋白的主要来源,其 PFASs 污染水平为当地食品安全监管提供了重要的基线数据。这些数据可用于制定区域性限值、开展人群膳食暴露评估,以及针对饮用水、空气、饲料、牧草等关键介质的纵向监测,为源头治理和政策制定提供科学依据。

本次研究的不确定性包括:(1)仅研究了内蒙古地区液态乳与畜肉两类动物源食品,未纳入蔬菜、水果、谷物及饮用水等潜在暴露途径,可能低估人群总摄入量;(2)消费量数据源自《中国居民食物消费状况调查(2020)》,后续工作将扩大食品类别覆盖范围,动态更新数据库,以提高暴露评估的时空代表性。

利益冲突声明　本研究不存在任何利益冲突

参考文献

[1]　王洪萍,李博文,李思蒙,等. 植物源性食品中全氟烷基化合物的污染现状及行为研究进展[J]. 农产品质量与安全,2025(5):5 - 13.
Wang HP, Li BW, Li SM, et al. Research progress on pollution status and behavior of perfluoroalkyl substances in plant - derived food[J]. Quality and Safety of Agro - Products, 2025(5): 5 - 13. (In Chinese)

[2]　Torres FG, De - La - torre GE. Per - and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in consumable species and food products[J]. Journal of Food Science and Technology, 2023, 60(9): 2319 - 2336.

[3]　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 YF, Li Y, Zhao NN, 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. (In Chinese)

[4] Kurwadkar S, Dane J, Kanel SR, et al. Per - and polyfluoroalkyl substances in water and wastewater: A critical review of their global occurrence and distribution[J]. Science of the Total Environment, 2022, 809: 151003.

[5] 庄意如,吴婧,董冰琦,等. 大气中部分全氟和多氟烷基化合物的污染特征、大气来源区域及健康影响[J]. 环境化学,2025,44(4):1254 - 1263.
Zhuang YR, Wu J, Dong BQ, et al. Pollution characteristics, atmospheric source regions, and health risk of partial perfluorinated and polyfluoroalkyl substances in the atmosphere[J]. Environmental Chemistry, 2025, 44(4): 1254 - 1263. (In Chinese)

[6] 梁杰生. 大气中全氟化合物的污染现状及检测技术[J]. 广州化工,2025,53(23):139 - 142.
Liang JS. Per - and polyfluoroalkyl substances pollution status in the atmosphere and its detection methods[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2025, 53(23): 139 - 142. (In Chinese)

[7] Hu HF, Zeng X, Zheng KY, et al. Risk assessment and partitioning behavior of PFASs in environmental matrices from an e - waste recycling area[J]. Science of the Total Environment, 2023, 905: 167707.

[8] 刘浩然,邢静怡,任文杰. 中国土壤中全氟和多氟烷基物质的分布、迁移及管控研究进展[J]. 环境科学,2024,45(1):376 - 385.
Liu HR, Xing JY, Ren WJ. Research progress on distribution, transportation, and control of per - and polyfluoroalkyl substances in Chinese soils[J]. Environmental Science, 2024, 45(1): 376 - 385. (In Chinese)

[9] 伍雅婧,付亦临,符杰,等. 全氟和多氟烷基物质(PFAS)对土壤微生物群落的影响及作用机制[J]. 生态毒理学报,2026,21(1):19 - 33.
Wu YJ, Fu YL, Fu J, et al. Effects and mechanistic insights of per - and polyfluoroalkyl substances (PFAS) on Soil microbial communities[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2026, 21(1): 19 - 33. (In Chinese)

[10] Li J, Xi BD, Zhu GH, et al. A critical review of the occurrence, fate and treatment of per - and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in landfills[J]. Environmental Research, 2023, 218: 114980.

[11] 许诗滢,谢月清,强郁城,等. 河流 - 地下水交互带全氟和多氟烷基化合物迁移与滞留数值模拟研究[J]. 水文地质工程地质,2026,53(2):223 - 234.
Xu SY, Xie YQ, Qiang YC, et al. Numerical modeling of perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances transport and retention in river - groundwater interaction zone[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2026, 53(2): 223 - 234. (In Chinese)

[12] 刘莹昕,江民华,廖绍群,等. 全氟和多氟烷基化合物的水环境现状及其分配行为[J]. 江西化工,2025,41(6):19 - 23.
Liu YX, Jiang MH, Liao SQ, et al. Occurrence and partitioning behavior of per - and polyfluoroalkyl(PFAS) substances in aquatic ecosystems[J]. Jiangxi Chemical Industry, 2025, 41(6): 19 - 23. (In Chinese)

[13] 葛运程. 全氟和多氟烷基物质暴露与肝癌患者肝功能水平的关联性研究[D]. 大连:大连理工大学,2025.
Ge YC. Association between per - and polyfluoroalkyl substances exposure and liver function levels in patients with liver cancer[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2025. (In Chinese)

[14] Zhuchen HY, Wang JY, Liu XS, et al. Research progress on neurodevelopmental toxicity in offspring after indirect exposure to PFASs in early Life[J]. Toxics, 2023, 11(7): 571.

[15] 陈绩,李彤,吴限好,等. 全氟和多氟烷基化合物暴露特征与健康效应研究进展[J]. 环境与职业医学,2023,40(8):958 - 964.
Chen J, Li T, Wu XH, et al. Review on exposure characteristics and health effects of per - and poly - fluoroalkyl substances[J]. Journal of Environmental & Occupational Medicine, 2023, 40(8): 958 - 964. (In Chinese)

[16] 刘晨阳,王钜铃,王晓峰,等. 全氟和多氟烷基化合物暴露对甲状腺功能影响研究进展[J]. 中国公共卫生,2023,39(5):670 - 675.
Liu CY, Wang JL, Wang XF, et al. Effects and possible mechanisms of per - and polyfluoroalkyl substances exposure on human thyroid function[J]. Chinese Journal of Public Health, 2023, 39(5): 670 - 675. (In Chinese)

[17] 王鑫,杨岚,王志凯,等. 妊娠期全氟化合物暴露与孕妇甲状腺相关激素水平的关联研究[J]. 环境与职业医学,2023,40(6):661 - 666.
Wang X, Yang L, Wang ZK, et al. Association between perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances and maternal thyroid - related hormones in pregnant women[J]. Journal of Environmental & Occupational Medicine, 2023, 40(6): 661 - 666. (In Chinese)

[18] Aßhoff N, Bernsmann T, Esselen M, et al. A sensitive method for the determination of per - and polyfluoroalkyl substances in food and food contact material using high - performance liquid chromatography coupled with tandem mass spectrometry[J]. Journal of Chromatography a, 2024, 1730: 465041.

[19] Surma M, Sznajder - Katarzyńska K, Wiczkowski W, et al. Detection of Per - and polyfluoroalkyl substances in High - Protein food products[J]. Environmental Toxicology and Chemistry / SETAC, 2023, 42(12): 2589 - 2598.

[20] 国际官方分析化学家协会. 全氟和多氟烷基物质(PFASs)在农产品,饮料,乳制品,蛋类,海鲜,肉制品和饲料中的标准方法性能要求:SMPR 2023.003[EB/OL]. [2026 - 03 - 20]. https://www.aoac.org/wp - content/uploads/2023/11/SMPR - 2023_003 - 1.pdf.
AOAC International. Standard method performance requirements (SMPRs) for per - and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in agricultural products, beverages, dairy products, eggs, seafood, meat products, and feed: SMPR2023.003[EB/OL]. [2026 - 03 - 20]. https://www.aoac.org/wp - content/uploads/2023/11/SMPR - 2023_003 - 1.pdf. (In Chinese)

[21] 欧盟委员会. 欧盟委员会第 2022/1431 号建议书:食品中全氟烷基物质的监测[EB/OL]. [2026 - 03 - 25]. https://eur - lex.europa.eu/eli/reco/2022/1431/oj.
European Commission. Commission Recommendation (EU) 2022/1431 on the monitoring of perfluoroalkyl substances in food[EB/OL]. [2026 - 03 - 25]. https://eur - lex.europa.eu/eli/reco/2022/1431/oj. (In Chinese)

[22] European Commission. Commission Regulation (EU) 2023/915 of 25 April 2023 on maximum levels for certain contaminants in food and repealing Regulation (EC) No 1881/2006[EB/OL]. [2026 - 03 - 25]. https://eur - lex. europa. eu/eli/reg/2023/915/2024 - 07 - 22/eng/pdf.

[23] European food safety authority (EFSA). Outcome of a public consultation on the draft risk assessment of perfluoroalkyl substances in food[J]. EFSA Support Publ, 2020, 17: 1 - 202.

[24] 中华人民共和国生态环境部. 重点管控新污染物清单(2023 年版)[J]. 中华人民共和国国务院公报,2023,(5):19 - 24.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. List of new pollutants under key control (2023 edition)[J]. Gazette of the State Council of the People's Republic of China, 2023, (5): 19 - 24. (In Chinese)

[25] GEMS/Food - EURO. Second workshop on reliable evaluation of low - level contamination of food: report on a workshop in the frame of GEMS/food - EURO[EB/OL]. [2026 - 03 - 25]. https://toolbox. foodcomp. info/References/LOD/GEMS - Food - EURO% 20% 20 - % 20% 20Reliable% 20Evaluation% 20of% 20Low - Level% 20Contamination% 20of% 20Food. pdf.

[26] Schrenk D, Bignami M, Bodin L, et al. Risk to human health related to the presence of perfluoroalkyl substances in food[J]. EFSA Journal, 2020, 18(9): e06223.

[27] World Health Organization. Global burden of disease 2000: age grouping framework, BK[R]. Geneva: WHO, 2001.

[28] Hlouskova V, Hradkova P, Poustka J, et al. Occurrence of perfluoroalkyl substances (PFASs) in various food items of animal origin collected in four European countries[J]. Food Additives & Contaminants. Part a, Chemistry, Analysis, Control, Exposure & Risk Assessment, 2013, 30(11): 1918 - 1932.

[29] 方淑红,彭光垣,印红玲,等. 成都饮食中全氟化合物的污染特征及健康风险评估[J]. 环境科学学报,2019,39(5):1708 - 1716.
Fang SH, Peng GY, Yin HL, et al. Pollution characteristics and human health risk of perfluoroalkyl substance exposure through the diet in Chengdu City[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, 39(5): 1708 - 1716. (In Chinese)

[30] 覃梅,程莉,李莉,等. 重庆市动物源性食品中全氟和多氟烷基化合物污染水平及人群健康风险[J]. 现代预防医学,2025,52(6):1050 - 1057.
Qin M, Cheng L, Li L, et al. Contamination levels of per - and polyfluoroalkyl substances in animal - derived food and the associated health risk to the population, Chongqing[J]. Modern Preventive Medicine, 2025, 52(6): 1050 - 1057. (In Chinese)

[31] Sznajder - Katarzyńska K, Surma M, Wiczkowski W, et al. The perfluoroalkyl substance (PFAS) contamination level in milk and milk products in Poland[J]. International Dairy Journal, 2019, 96: 73 - 84.

[32] Vestergren R, Berger U, Glynn A, et al. Dietary exposure to perfluoroalkyl acids for the Swedish population in 1999, 2005 and 2010[J]. Environment International, 2012, 49: 120 - 127.

[33] 谢燕湘,刘凤姣,樊柯,等. 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[J]. 中国食品卫生杂志,2025,37(7):642 - 648.
Xie YX, Liu FJ, Fan K, et al. Pollution status and dietary exposure assessment of per - and polyfluoroalkyl substances in animal - derived food sold in Hu'nan Province[J]. Chinese Journal ofFood Hygiene, 2025, 37(7): 642 - 648. (In Chinese)

[34] 谷臣琳,杨京津,罗宝章,等. 上海市动物源性食品中全氟化合物污染健康风险评估[J]. 上海预防医学,2025,37(7):556 - 561.
Gu CL, Yang JJ, Luo BZ, et al. Health risk assessment of per - and polyfluoroalkyl substances contamination in animal - derived foods in Shanghai[J]. Shanghai Journal of Preventive Medicine, 2025, 37(7): 556 - 561. (In Chinese)

[35] Haug LS, Salihovic S, Jogsten IE, et al. Levels in food and beverages and daily intake of perfluorinated compounds in Norway[J]. Chemosphere, 2010, 80(10): 1137 - 1143.

收稿日期:2026-01-21

(上接第 1780 页)

Chen JB. Effects of extreme temperature on hospitalization risk of strokepatients in Nanchang city from 2015 to 2019 based on distributed lagnonlinear model [D]. Nanchang: Nanchang University, 2022. (In Chinese)

[17] Vai čiulis V, Jaakkola JJK, Radišauskas R, et al. Risk of ischemic and hemorrhagic stroke in relation to cold spells in Four Seasons[J]. BMC Public Health, 2023, 23(1): 554.

[18] Liu P, Chen Z, Han S, et al. The added effects of cold spells on stroke admissions: Differential effects on ischemic and hemorrhagic stroke[J]. International Journal of Stroke, 2024, 19(2): 217 - 225.

[19] 杜茜茜,曲玥,曾芳婷,等. 石家庄市非适宜气温对居民急救影响归因分析[J]. 中国公共卫生,2024,40(8):991 - 996.
Du QQ, Qu Y, Zeng FT, et al. Attributable risk analysis of the impact of unsuitable temperature on emergency ambulance dispatches in Shijiazhuang city - based on the distributed lag non - linear model (DLNM)[J]. Chinese Journal of Public Health, 2024, 40(8): 991 - 996. (In Chinese)

[20] Gao S, Yang T, Zhang XH, et al. A longitudinal study on the effect of extreme temperature on non - accidental deaths in Hulunbuir City based on DLNM model[J]. International Archives of Occupational and Environmental Health, 2023, 96(7): 1009 - 1014.

[21] Alahmad B, Khraishah H, Kamineni M, et al. Extreme temperatures and stroke mortality: evidence from a Multi - Country analysis[J]. Stroke, 2024, 55(7): 1847 - 1856.

[22] 胡茂红,熊文艳,戚京城,等. 2018—2022 年南昌市极端气温对居民脑卒中死亡风险影响[J]. 中国公共卫生,2025,41(1):88 - 94.
Hu MH, Xiong WY, Qi JC, et al. Influence of extreme temperatures on stroke mortality risk among residents of Nanchang city between 2018 and 2022[J]. Chinese Journal of Public Health, 2025, 41(1): 88 - 94. (In Chinese)

[23] De bont J, Jaganathan S, Dahlquist M, et al. Ambient air pollution and cardiovascular diseases: An umbrella review of systematic reviews and meta - analyses[J]. Journal of Internal Medicine, 2022, 291(6): 779 - 800.

收稿日期:2026-01-08