

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20240808001

# 重庆市禽类产品中全氟类化合物污染特征及健康风险评估

唐韵熙<sup>1,2</sup>, 白亚敏<sup>1,2\*</sup>, 黄思瑜<sup>1,2</sup>, 陶娟<sup>1,2</sup>

[1. 重庆市食品药品检验检测研究院, 重庆 400700;  
2. 国家市场监督管理总局重点实验室(调味品监管技术), 重庆 400700]

**摘要:** **目的** 分析重庆市禽类产品中全氟和多氟烷基化合物(poly-and perfluoroalkyl substances, PFASs)的污染水平及赋存特征, 评估当地标准人通过禽类产品摄食 PFASs 的暴露风险。**方法** 以重庆市主城 5 区的禽类养殖场的 6 种禽类产品(鸡肉、鸡肝、鸡蛋、鸭肉、鸭肝、鸭蛋)为研究对象, 采用超高效液相色谱-串联质谱法(ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry, UPLC-MS/MS)对禽类产品中 21 种 PFASs 进行测定, 参考欧洲食品安全局的剂量值, 对当地一个标准人通过禽类产品摄入 PFASs 的健康暴露风险进行评估。**结果** PFASs 在禽类产品中普遍检出, 检出率为 90.7%, 不同基质中全氟化合物总量呈现鸭肝(21.55 ng/g)>鸭蛋(19.28 ng/g)>鸡肝(15.28 ng/g)>鸡蛋(13.57 ng/g)>鸭肉(12.66 ng/g)>鸡肉(9.16 ng/g)的趋势, 并以中链 PFASs 检出为主, 其中全氟辛酸(perfluorooctanoic acid, PFOA)为主要污染物。基于主成分分析和 Spearman 相关性发现, 重庆市禽类产品中 PFASs 可能主要来自含氟化合物生产行业等的工业废水排放、氟调醇(fluorotelomer alcohols, PTOHs)降解和消费品。经估算, 当地一个标准人摄入上述禽类副产品中 PFOA 和全氟丁酸(perfluorobutanoic acid, PFBA)危害指数均大于 1, 会对当地居民产生潜在危害。**结论** 本研究为重庆市禽类产品中 PFASs 监管提供数据支持, 同时对制定禽类产品的污染控制技术标准提供理论依据。

**关键词:** 全氟类化合物; 禽类产品; 污染特征; 健康风险评估

## Contamination characteristics and health risk assessment of poly-and perfluoroalkyl substances in poultry products from Chongqing

TANG Yun-Xi<sup>1,2</sup>, BAI Ya-Min<sup>1,2\*</sup>, HUANG Si-Yu<sup>1,2</sup>, TAO Juan<sup>1,2</sup>

[1. Chongqing Institute for Food and Drug Control, Chongqing 400700, China; 2. Key Laboratory of Condiment Supervision Technology, State Administration for Market Regulation, Chongqing 400700, China]

**ABSTRACT: Objective** To analyse the contamination level and composition characteristics of poly-and perfluoroalkyl substances (PFASs) in poultry products produced in Chongqing, and to evaluate the exposure risk of local standard man consuming PFASs from poultry products. **Methods** The 6 kinds of poultry products (chicken, chicken liver, henapple, duck, duck liver, duck egg) from poultry farms in 5 districts of Chongqing were selected as

基金项目: 重庆市市场监督管理局科技项目(CQSJKJDW2023033)

Fund: Supported by the Chongqing Administration for Market Regulation Project (CQSJKJDW2023033)

\*通信作者: 白亚敏, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为食品安全检测。E-mail: 965241582@qq.com

\*Corresponding author: BAI Ya-Min, Master, Senior Engineer, Chongqing Institute for Food and Drug Control, No.336 Yuefu Avenue, Fuxing Street, Beibei District, Chongqing 400700, China. E-mail: 965241582@qq.com

the research object. The concentrations of 21 kind of PFASs were determined by ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry (UPLC-MS/MS). The exposure risk of local adult men to PFASs from poultry products was assessed by referring to the dose value of European Food Safety Authority. **Results** The results showed that PFASs contamination was widespread in poultry products, the detection rate was 90.7%. PFAS concentrations varied across the products, with duck liver showing the highest levels (21.55 ng/g), followed by duck egg (19.28 ng/g), chicken liver (15.28 ng/g), hen egg (13.57 ng/g), duck meat (12.66 ng/g), and chicken meat (9.16 ng/g). Mid-chain PFASs were the main detected compound, in which perfluorooctanoic acid (PFOA) was the major pollutant. It was inferred that PFASs in the poultry products from Chongqing mainly came from consumer products, fluorotelomer alcohols (PTOHs) degradation and industrial wastewater emissions from fluorochemicals manufacturing industries based on the principal component analysis and Spearman correlation analysis. It was estimated that the harm index of PFOA and perfluorobutanoic acid (PFBA) in poultry products were greater than 1 for a local standard person, respectively. These were potentially harmful to the local population. **Conclusion** This study provides data support for the regulation of PFASs in poultry products, and theoretical basis for the formulation of the pollution control technical standards for poultry products.

**KEY WORDS:** poly-and perfluoroalkyl substances; poultry products; contamination characteristics; health risk assessment

## 0 引言

全氟和多氟烷基化合物(poly-and perfluoroalkyl substances, PFASs)是一种人工合成的有机氟化物,它由疏水氟化烷基链和亲水官能团所组成,分子通式为 $(F(CF_2)_x)R$ ,根据末端基团的差异,主要可分为全氟烷基羧酸(perfluoroalkyl carboxylic acid, PFSA)和全氟烷基磺酸(perfluoroalkyl sulfonic acid, PFCA)<sup>[1]</sup>。由于 C-F 键的高化学能,使其广泛应用于工业与生活领域,如纺织、食品包装等,并且在生物体与环境介质中也被广泛检出<sup>[2-3]</sup>。2022 年 12 月,生态环境部发布的《重点管控新污染物清单(2023 版)》<sup>[4]</sup>中的 4 类(14 种)新污染物被限用或禁用,其中包含全氟辛基磺酸及其盐类和全氟辛基磺酰氟类(perfluorooctanesulfonyl fluoride, PFOS)、全氟辛酸及其盐类和相关化合物类(perfluorooctanoic acid and its salts, PFOA)、全氟己基磺酸及其盐类和相关化合物类(perfluorohexane-1-sulphonic acid and its salts, PFHxS) 3 大类。这些氟化物具有产量多、用量大和突出的环境健康风险,在给我们的生活带来了便利的同时又对生态环境和人体健康产生了潜在的威胁。普通人群可能通过各种途径接触到这些氟化物,包括饮食摄入、饮用水或空气吸入<sup>[5]</sup>。膳食暴露是人体摄入 PFASs 的主要途径,由于 PFASs 易与蛋白质结合且具有生物富集效应<sup>[6]</sup>,富含蛋白质的鱼、肉、蛋、奶等食物中均是 PFASs 的重要来源。人体通过饮食摄入 PFASs 暴露的食品,可在一定程度上影响生长发育,毒理学研究表明,PFASs 可能会影响脂质代谢<sup>[7-8]</sup>、引起生殖毒性<sup>[9-10]</sup>等,并对免疫系统产生损伤<sup>[11-12]</sup>。

目前,商春峰等<sup>[13]</sup>以 5 种蔬菜为研究对象,利用 Sin-QuEChERS 净化技术结合液相色谱-串联质谱建立了 13 种全氟烷基酸的检测方法,母国栋等<sup>[14]</sup>以牛奶为研究对象,利用分子印迹固相微萃取结合敞开式离子化质谱建立了全氟辛酸(perfluorooctanoic acid, PFOA)和全氟辛烷磺酸的分析方法。本研究创新性地以重庆市城区禽类产品为研究对象,利用超高效液相色谱-串联质谱法(ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry, UPLC-MS/MS)检测鸡肉、鸡肝、鸡蛋、鸭肉、鸭肝、鸭蛋中 PFASs 的含量,探究 PFASs 残留的组织分布特征及污染来源,采用健康风险值(hazard ratio, HR)法分析重庆市市民通过摄入该类副产品而受到 PFASs 暴露的人体健康风险,旨在评估动物源性食品 PFASs 的污染水平及其食用安全性,进而指导重庆市可能涉及 PFASs 暴露的城区禽类养殖场禽肉及副产品的质量安全监控。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品的采集

本研究选取重庆主城 5 区(即渝北、北碚、巴南、九龙坡、江北)养殖场的活鸡(各 10 只)、活鸭(各 10 只)、鸡蛋(各 10 个)、鸭蛋(各 10 个)。活鸡、活鸭于现场屠宰后尽快采用冷藏贮存,以固体冰袋同样品包装运送至实验室,然后解剖以提取鸡肉、鸡肝、鸭肉、鸭肝,用均质机搅碎成泥,并放于聚乙烯密实袋保存备用。

### 1.2 试剂

甲醇、乙腈(质谱纯,德国 Merck 公司);甲酸(质谱纯,

美国 Sigma 公司); 无水硫酸钠、氯化钠、乙酸铵(分析纯, 重庆川东化工有限公司); N-丙基乙二胺固相吸附剂(ethylenediamine-N-propylsilane silica gel, PSA)、十八烷基硅烷键合硅胶(C<sub>18</sub>) (40 μm, 美国安捷伦公司); 石墨化炭黑(graphitized carbon black, GCB) [100 μm, 纳谱分析技术(苏州)有限公司]; 实验室用水(Milli-Q 去离子水, 美国 Millipore 公司); 全氟丁酸(perfluorobutanoic acid, PFBA)、全氟丁酸磺酸钾(potassium perfluorobutane sulfonate, PFBS)、全氟戊酸(perfluoropentanoic acid, PFPeA)、全氟戊烷磺酸钠(sodium perfluoropentane sulfonate, PFPeS)、全氟己酸(perfluorohexanoic acid, PFHxA)、全氟己烷磺酸钠(sodium perfluorohexane sulfonate, PFHxS)、全氟庚酸(perfluoroheptanoic acid, PFHPA)、全氟庚烷磺酸钠(sodium perfluoroheptane sulfonate, PFHpS)、PFOA、全氟辛烷磺酸钠(sodium perfluorooctane sulfonate, PFOS)、全氟壬酸(perfluorononanoic acid, PFNA)、全氟壬烷磺酸钠(sodium perfluorononane sulfonate, PFNS)、全氟癸酸(perfluorodecanoic acid, PFDA)、全氟癸烷磺酸钠(sodium perfluorodecane sulfonate, PFDS)、全氟十一烷酸(perfluoroundecanoic acid, PFUDA)、全氟十二烷酸(perfluorododecanoic acid, PFDoA)、全氟十二磺酸钠(sodium perfluorododecane sulfonate, PFDoS)、全氟十三烷酸(perfluorotridecanoic acid, PFTrDA)、全氟十四烷酸(perfluorotetradecanoic acid, PFTeDA)、全氟十六烷酸(perfluoro hexadecanoic acid, PFHxDA)、全氟十八烷酸(perfluorooctadecanoic acid, PFOA) 21 种全氟化合物混合标准储备溶液(质量浓度均为 2 μg/mL)、<sup>13</sup>C<sub>4</sub>-全氟丁酸(perfluoro-*n*-[<sup>13</sup>C<sub>4</sub>] butanoic acid, MPFBA)、<sup>13</sup>C<sub>2</sub>-全氟己酸(perfluoro-*n*-[<sup>13</sup>C<sub>2</sub>] hexanoic acid, MPFHxA)、<sup>18</sup>O<sub>2</sub>-全氟己烷磺酸钠(perfluoro-*n*-hexane [<sup>18</sup>O<sub>2</sub>] sulphonate, MPFHxS)、<sup>13</sup>C<sub>4</sub>-全氟辛酸(perfluoro-*n*-[<sup>13</sup>C<sub>4</sub>] octanoic acid, MPFOA)、<sup>13</sup>C<sub>4</sub>-全氟辛烷磺酸钠(perfluoro-*n*-octane [<sup>13</sup>C<sub>4</sub>] sulphate, MPFOS)、<sup>13</sup>C<sub>5</sub>-全氟壬酸(perfluoro-*n*-[<sup>13</sup>C<sub>5</sub>] nonanoic acid, MPFNA)、<sup>13</sup>C<sub>2</sub>-全氟癸酸(perfluoro-*n*-[<sup>13</sup>C<sub>2</sub>] decanoic acid, MPFDA)、<sup>13</sup>C<sub>2</sub>-全氟十一烷酸(perfluoro-*n*-[<sup>13</sup>C<sub>2</sub>] undecanoic acid, MPFUDA)、<sup>13</sup>C<sub>2</sub>-全氟十二烷酸(perfluoro-*n*-[<sup>13</sup>C<sub>2</sub>] dodecanoic acid, MPFDoA) 9 种混合同位素内标储备液(质量浓度均为 2 μg/mL)(加拿大 Wellington 公司)。

1.3 仪器与设备

安捷伦 1290 Infinity 型液相色谱仪(美国安捷伦公司); AB SCIEX 5500 型三重四极杆串联质谱仪(美国 AB SCIEX 公司); Waters Acquity UPLC®BEH C<sub>18</sub> 色谱柱(100 mm×2.1 mm, 1.7 μm)(美国 Waters 公司); 3-30KS 型冷冻离心机(美国 Sigma 公司); ML-886 型涡旋仪(海门市其林贝尔仪器公司); Turbopap LV 型全自动浓缩仪(英国 Biotage 公司); Milli-q reference 型超纯水系统(美国 Millipore 公司);

MSA225S-100-DU 型十万分之一电子分析天平(德国 Sartorius 公司)。

1.4 实验方法

1.4.1 提取方法

样品提取依据本实验室已开发的方法操作<sup>[15]</sup>。

1.4.2 仪器条件

(1)色谱条件

参考实验室已开发的色谱条件<sup>[15]</sup>, 即: 流动相为甲醇/水(含 5 mmol/L 乙酸铵), 流动相梯度为: 流动相 A: 5 mmol/L 乙酸铵水溶液; 流动相 B: 甲醇。梯度洗脱程序: 0~0.5 min, 40% B; 0.5~2.0 min, 40%~90% B; 2.0~6.0 min, 90% B; 6.0~6.1 min, 90%~40% B; 6.1~8.0 min, 40% B。柱温 40 °C; 流量 0.3 mL/min; 进样量: 2 μL; 色谱柱: Waters Acquity UPLC®BEH C<sub>18</sub> (100 mm×2.1 mm, 1.7 μm)。

(2)质谱条件

参考实验室已开发的质谱条件<sup>[15]</sup>, 即: 电喷雾(electron spray ionization, ESI)离子源, 负离子模式; 扫描模式: 多反应监测(multiple reaction monitoring, MRM); 离子源温度 550 °C; 离子源电压 5500 V; 气帘气压力 0.24 MPa; 雾化气 0.38 MPa; 辅助气 0.38 MPa; 选定 21 种目标化合物及 9 种内标物质的监测离子对, 其去簇电压和碰撞能见表 1。

表 1 30 种化合物的质谱参数  
Table 1 MS parameters of the 30 kinds of compounds

| 化合物   | 母离子( <i>m/z</i> ) | 子离子( <i>m/z</i> ) | 去簇电压/V | 碰撞能/V |
|-------|-------------------|-------------------|--------|-------|
| PFBA  | 213.1             | 169.0*            | -35    | -12   |
|       |                   | 79.9*             |        | -63   |
| PFBS  | 299.2             | 98.8              | -40    | -40   |
|       |                   | 79.8*             |        | -76   |
| PFPeA | 263.2             | 218.9*            | -40    | -12   |
|       |                   | 98.8              |        | -39   |
| PFPeS | 349.2             | 98.8              | -50    | -79   |
|       |                   | 79.8*             |        | -89   |
| PFHxA | 313.2             | 268.9*            | -35    | -12   |
|       |                   | 98.7*             |        | -22   |
| PFHxS | 399.2             | 79.8              | -70    | -110  |
|       |                   | 319.1*            |        | -81   |
| PFHpA | 363.2             | 168.8             | -40    | -14   |
|       |                   | 79.7*             |        | -25   |
| PFHpS | 449.2             | 98.7              | -70    | -106  |
|       |                   | 369.1*            |        | -91   |
| PFOA  | 413.1             | 168.8             | -56    | -14   |
|       |                   | 79.7*             |        | -23   |
| PFOS  | 499.2             | 99.0              | -60    | -124  |
|       |                   | 419.1*            |        | -111  |
| PFNA  | 463.2             | 218.9             | -55    |       |
|       |                   | 79.7*             |        |       |
| PFNS  | 549.1             | 98.9              | -80    |       |
|       |                   |                   |        |       |

表 1(续)

| 化合物     | 母离子( <i>m/z</i> ) | 子离子( <i>m/z</i> ) | 去簇电压/V | 碰撞能/V |
|---------|-------------------|-------------------|--------|-------|
| PFDA    | 513.2             | 468.9*            | -60    | -15   |
|         |                   | 219.0             |        | -24   |
| PFDS    | 599.1             | 79.9*             | -80    | -140  |
|         |                   | 98.9              |        | -120  |
| PFUDa   | 563.2             | 518.9*            | -60    | -15   |
|         |                   | 219.0             |        | -26   |
| PFDaA   | 613.1             | 568.9*            | -60    | -17   |
|         |                   | 169.1             |        | -34   |
| PFDOS   | 699.1             | 79.8*             | -60    | -110  |
|         |                   | 619.0*            |        | -17   |
| PFTTrDA | 663.1             | 168.9             | -60    | -36   |
|         |                   | 669.1*            |        | -19   |
| PFTeDA  | 713.1             | 168.8             | -70    | -38   |
|         |                   | 768.9*            |        | -19   |
| PFHxDA  | 813.1             | 168.7             | -70    | -40   |
|         |                   | 869.1*            |        | -22   |
| PFODA   | 913.1             | 168.7             | -70    | -42   |
|         |                   | 171.9*            |        | -13   |
| MPFBA   | 217.1             | 171.9*            | -36    | -13   |
| MPFHxA  | 315.2             | 270.0*            | -40    | -12   |
| MPFHxS  | 403.2             | 84.0*             | -70    | -80   |
|         |                   | 103.0             |        | -80   |
| MPFOA   | 417.2             | 372.0*            | -50    | -15   |
| MPFOS   | 503.1             | 79.8*             | -60    | -115  |
|         |                   | 98.8              |        | -102  |
| MPFNA   | 468.2             | 423.0*            | -50    | -15   |
| MPFDA   | 515.1             | 470.1*            | -50    | -16   |
| MPFUdA  | 565.1             | 520.0*            | -50    | -16   |
| MPFDaA  | 615.1             | 570.0*            | -50    | -16   |

注: \*为定量离子。

1.4.3 健康风险评估

鸡、鸭及其副产品是人类暴露 PFASs 的重要途径之一, 因此, 计算居民通过鸡、鸭及其副产品摄入 PFASs 的日摄入量(estimated the daily intake, EDI,  $\text{ng}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ ), 以评估人体暴露, 其计算公式(1)如下:

$$\text{EDI} = \frac{C \times \text{IR}}{\text{BW}}$$

(1)

式中, C 为禽类产品中 PFASs 的含量,  $\text{ng/g ww}$ (湿重); IR 是当地居民食用禽类产品的平均日摄入量,  $\text{g/d}$ , 根据中国膳食指南<sup>[16]</sup>, 禽肉每日推荐 40~75  $\text{g/d}$ , 按 75  $\text{g/d}$  计算, 蛋每日推荐 40~50  $\text{g/d}$ , 按 50  $\text{g/d}$  计算; BW 是当地居民的平均体重,  $\text{kg}$ , 按照成人 60  $\text{kg}$  计算。

计算 HR 以表征 PFASs 的健康风险, 其计算公式(2)如下:

$$\text{HR} = \frac{\text{EDI}}{\text{RfD}}$$

(2)

式中, RfD 是参考剂量, 欧洲食品安全局更新了食品中 PFOA 和 PFOS 的每周可耐受摄入量(tolerable weekly intake, TWI)为 13  $\text{ng/kg bw}$  (PFOS)和 6  $\text{ng/kg bw}$  (PFOA)<sup>[15]</sup>, 即 PFOA 和 PFOS 的 RfD 分别为 1.857  $\text{ng}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$  和 0.857  $\text{ng}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ , 在其他 PFASs 没有参考剂量的情况下, 本研究均采用 PFOA 的参考剂量;  $\text{HR}>1.0$  表示对人体有潜在风险; 低于 1.0 意味着低风险。

1.5 数据处理

本研究采用 IBM SPSS Statistics 26 进行数据统计分析, 在保证数据服从正态分布的前提下, 进行描述性统计分析, 结合 Microsoft Excel 2010 对重庆禽类产品中全氟化合物含量分布进行数据分析和图形绘制。使用主成分分析(principal component analysis, PCA)模型来对污染物进行来源解析: 达到标准的数据进行 PCA 分析, 所有低于检测限的定义为未检出(not detected, ND)。符合正态分布的数据, 采用独立样本 *t* 检验分析差异性。所有检验均为双尾检验, 当  $P<0.05$  时, 认为差异具有统计学意义。

2 结果与分析

2.1 质量控制与保证

实验全过程避免使用聚四氟乙烯材质的器皿, 并在使用前用质谱纯甲醇彻底清洗, 从而规避样品前处理过程可能带来的外源性污染。每批 10 个样品设置 1 个程序空白和溶剂空白(质谱纯甲醇), 以检查仪器分析过程中的潜在污染, 所有结果均为扣除空白后的数据。低于检出限的数据用 0 代替进行数据统计。

用内标法进行定量分析, 标准曲线(0.2~20.0  $\text{ng/mL}$ )的相关系数( $r^2$ )均大于 0.99。仪器检出限定义为信噪比( $S/N$ )为 3 (3 倍信噪比时对应含量), 即检出限范围 0.011~0.086  $\text{ng/g}$ 。通过将含量为 2.5  $\text{ng/g}$  的标准品加入鸡肉、鸡蛋、鸡肝、鸭肉、鸭蛋、鸭肝样品中进行基质加标回收(以典型的 3 种基质: 鸡肉、鸡蛋、鸭肝为例), 在鸡肉中平均回收率范围为 87.36%~118.12%, 批内精密密度范围为 4.32%~14.50%, 批间精密密度范围为 4.23%~13.81%; 在鸡蛋中平均回收率范围为 83.23%~115.00%, 批内精密密度范围为 3.20%~12.24%, 批间精密密度范围为 2.23%~12.51%; 在鸭肝中平均回收率范围为 74.14%~114.18%, 批内精密密度范围为 3.47%~12.30%, 批间精密密度范围为 3.80%~12.64%; 6 种基质的平均回收率范围为 74.14%~118.12%, 相对标准偏差范围为 2.23%~14.50%。方法满足检测要求, 数据真实可信。具体见表 2。

2.2 重庆市禽类产品中 PFASs 的含量水平及分布特征

本研究采集重庆主城 5 区的鸡肉、鸡蛋、鸡肝、鸭肉、鸭蛋、鸭肝共 300 份样品进行 21 种全氟化合物的检测, 其中 272 份样品检出 PFASs, 检出率为 90.7%。在 6 种基质中共检出 9 种 PFASs, 包括 PFBA、PFPeA、PFOA、PFOS、

表 2 目标 PFASs 及内标物、仪器检出限和加标回收率  
Table 2 Target PFASs and internal standards, instrumental detection limits and spiked recoveries

| 化合物     | 内标物质   | 检出限<br>(ng/g) | 平均回收率/% |        |        | 批内精密性/% (n=6) |       |       | 批间精密性/% (n=3) |       |       |
|---------|--------|---------------|---------|--------|--------|---------------|-------|-------|---------------|-------|-------|
|         |        |               | 鸡肉      | 鸡蛋     | 鸭肝     | 鸡肉            | 鸡蛋    | 鸭肝    | 鸡肉            | 鸡蛋    | 鸭肝    |
| PFBA    | MPFBA  | 0.250         | 107.82  | 108.23 | 101.20 | 8.22          | 8.16  | 4.20  | 8.01          | 12.51 | 6.70  |
| PFPeA   | MPFHxA | 0.250         | 89.02   | 95.12  | 114.11 | 10.41         | 6.18  | 5.21  | 7.98          | 8.50  | 7.10  |
| PFBS    | MPFHxA | 0.060         | 117.11  | 115.00 | 102.01 | 9.12          | 10.61 | 9.12  | 6.62          | 7.31  | 5.64  |
| PFHxA   | MPFHxA | 0.037         | 115.23  | 102.01 | 108.26 | 6.50          | 9.51  | 7.53  | 5.12          | 7.10  | 6.12  |
| PFPeS   | -      | 0.035         | 104.12  | 110.25 | 114.18 | 6.21          | 6.13  | 4.24  | 7.81          | 5.80  | 4.80  |
| PFHpA   | MPFHxS | 0.043         | 101.89  | 83.23  | 110.45 | 10.19         | 8.18  | 7.16  | 10.50         | 7.51  | 5.52  |
| PFHxS   | MPFHxS | 0.042         | 105.25  | 108.76 | 108.26 | 14.50         | 12.24 | 3.47  | 13.81         | 10.79 | 3.80  |
| PFHpS   | -      | 0.020         | 108.65  | 111.59 | 105.45 | 6.35          | 10.41 | 4.42  | 8.14          | 8.08  | 5.10  |
| PFOA    | MPFOA  | 0.023         | 87.36   | 93.96  | 112.12 | 8.21          | 3.20  | 6.21  | 4.23          | 2.23  | 6.22  |
| PFOS    | MPFOS  | 0.086         | 94.02   | 113.23 | 109.14 | 7.20          | 4.11  | 8.12  | 6.01          | 5.32  | 6.31  |
| PFNA    | MPFNA  | 0.028         | 110.28  | 106.05 | 106.01 | 4.32          | 6.02  | 9.63  | 5.22          | 5.21  | 10.30 |
| PFNS    | MPFNA  | 0.025         | 114.56  | 111.00 | 111.04 | 7.56          | 8.51  | 9.58  | 5.02          | 6.31  | 7.90  |
| PFDA    | MPFDA  | 0.051         | 94.16   | 101.15 | 101.48 | 5.22          | 6.30  | 8.61  | 7.51          | 5.22  | 11.01 |
| PFDS    | MPFDoA | 0.026         | 117.52  | 104.02 | 114.12 | 7.04          | 10.90 | 12.30 | 8.20          | 7.13  | 11.00 |
| PFUdA   | MPFUdA | 0.011         | 92.96   | 100.11 | 104.85 | 6.25          | 7.52  | 9.50  | 7.50          | 5.50  | 8.92  |
| PFDaA   | MPFDoA | 0.016         | 102.36  | 110.23 | 113.12 | 5.06          | 5.61  | 10.51 | 7.58          | 4.48  | 12.64 |
| PFTTrDA | -      | 0.015         | 92.25   | 93.96  | 76.12  | 4.52          | 7.79  | 6.52  | 6.81          | 5.82  | 8.51  |
| PFTeDA  | MPFDoA | 0.016         | 108.69  | 111.20 | 74.14  | 9.31          | 8.36  | 11.24 | 5.30          | 6.51  | 9.40  |
| PFHxDA  | MPFDoA | 0.043         | 118.12  | 114.23 | 111.22 | 10.21         | 9.33  | 12.00 | 8.63          | 7.40  | 11.50 |
| PFODA   | MPFDoA | 0.011         | 91.23   | 99.98  | 99.86  | 8.90          | 7.52  | 10.31 | 7.51          | 4.64  | 8.61  |
| PFDOS   | -      | 0.062         | 100.01  | 112.25 | 101.68 | 6.50          | 8.61  | 8.54  | 7.20          | 6.24  | 7.42  |

注: -代表无内标物质。

PFNA、PFDA、PFUdA、PFDaA、PFTTrDA, 其在不同基质中的检出率和含量水平如表 3 所示。PFASs 在鸭肝中检出率(94%)>鸭蛋(86%)>鸭肝(84%)>鸭肉(82%)>鸡蛋(80%)>鸡肉(60%); 鸭肝中全氟类化合物总量( $\Sigma$ PFASs)(21.55 ng/g)>鸭蛋(19.28 ng/g)>鸡肝(15.28 ng/g)>鸡蛋中(13.57 ng/g)>鸭肉(12.66 ng/g)>鸡肉(9.16 ng/g); 在 6 种基质中, 以 PFOA 检出率最高, 均在 50%以上。

禽肉中共检测出 PFBA、PFOA、PFNA 3 种单体, 这与白润叶等<sup>[17]</sup>指出西部地区的 PFOA 和 PFNA 残留较严重符合, 重庆当地检测出禽肉 PFOA 含量最高, 鸡肉中其含量为 ND~0.646 ng/g(平均含量 0.141 ng/g), 鸭肉中含量为 ND~0.825 ng/g(平均含量 0.210 ng/g), 其次是 PFBA, 鸡肉中其含量为 ND~0.657 ng/g(平均含量 0.040 ng/g), 鸭肉中含量为 ND~0.563 ng/g(平均含量 0.052ng/g), PFNA 仅在鸡肉中有检出, 含量为 ND~0.239 ng/g(平均含量 0.007 ng/g)。当地鸭肉中  $\Sigma$ PFASs 的浓度水平略高于当地鸡肉中  $\Sigma$ PFASs 的浓度水平。

禽蛋中共检测出 PFBA、PFOA、PFOS、PFNA、PFDA、PFUdA、PFDaA、PFTTrDA 8 种单体, 除 PFBA、PFOS、PFDaA 仅在鸡蛋中检出, 其余 5 种单体在鸡蛋和鸭蛋中均有检出。鸡蛋和鸭蛋均为 PFOA、PFUdA、PFNA 3 种单体出现频率较高, 残留水平均是 PFOA>PFUdA>PFTTrDA, 鸡蛋中 PFOA、PFUdA、PFTTrDA 含量范围分别为 ND~0.576、

ND~0.536、ND~0.443 ng/g, 平均含量分别为 0.128、0.056、0.023 ng/g; 鸭蛋中 PFOA、PFUdA、PFTTrDA 含量范围分别为 ND~0.825、ND~0.621、ND~0.260 ng/g, 平均含量分别为 0.220、0.094、0.031 ng/g。总体来说, 鸭蛋中  $\Sigma$ PFASs 稍高于鸡蛋中  $\Sigma$ PFASs, 这与齐彦杰等<sup>[18]</sup>的调查结果相同。

在禽类肝脏中, 共检测出 PFBA、PFPeA、PFOA、PFNA、PFDA 和 PFUdA 6 种全氟化合物, 除 PFPeA 仅在鸡肝中检出, PFDA、PFUdA 仅在鸭肝中检出, 其余 3 种单体均在鸡肝和鸭肝中检出。鸡肝以 PFOA 检出率和残留水平最高, 含量范围为 ND~0.767 ng/g, 平均含量为 0.251 ng/g, 其余 3 种单体检出率均在 5%以下, 鸭肝中 PFOA、PFNA、PFDA 3 种单体出现频率较高, 残留量是 PFOA>PFBA>PFNA, 含量范围分别是 ND~0.667、ND~2.600、ND~0.319 ng/g, 平均含量分别为 0.173、0.136、0.089 ng/g, 鸭肝中  $\Sigma$ PFASs 高于鸡肝中  $\Sigma$ PFASs。

综上所述, 鸭的副产品中 PFASs 污染水平高于鸡的副产品, 且 PFOA 为副产品中 PFASs 主要贡献单体, 可能来源于: (1) 摄食途径, 如饲料、谷物和蔬菜等, 刘逸飞<sup>[19]</sup>、ZHANG 等<sup>[20]</sup>在玉米、饲料、蔬菜中均检测出 PFASs, 并且蛋鸭具有嗜腥性, 其饲料中会添加一定比例的富含高蛋白的动物性原料, 如鱼粉、肉粉和贝壳粉等, 因此这些原料的添加也增加了鸭 PFASs 暴露水平; (2) 生活环境, 鸭生

**Table 3** Average content level and detection rate of target compounds in poultry products from Chongqing Province ( $n=50$ )

[illegible]

活的环境(天然水塘、湖泊、海滩、人工水池或农田等)较鸡生活的环境(陆地)复杂,由于干湿沉降、地表径流等原因,PFASs 在水体和藻类植物中也普遍存在<sup>[21-22]</sup>,通过饮池塘水和摄食藻类,都增加了鸭 PFASs 的暴露水平;(3) PFASs 降解以及前体物质的迁移转化。杨琳等<sup>[23]</sup>发现由于氟调聚类前体物质产量的大幅提升,使其降解产物 PFOA 在环境介质中的含量也不算增加。研究也表明蛋、肝与肌肉组织相比,含有更高浓度 PFASs,这可能是由于 PFASs 易于在肝脏中蓄积,然后在肝脏通过与卵黄蛋白原结合转移到蛋中。

### 2.3 重庆市主城 5 区全氟类化合物含量水平比较

本研究主要比较了主城 5 区(北碚、九龙坡、渝北、江北、巴南)禽类产品受 PFASs 污染情况。主城 5 区禽类产品中全氟化合物平均含量及各单体浓度见图 1 和图 2。

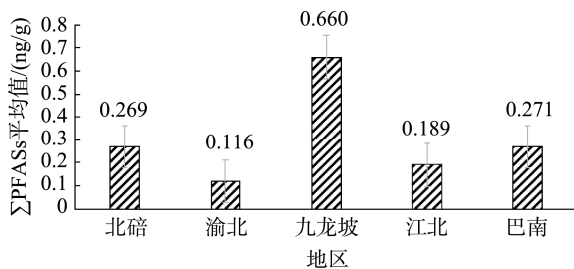


图 1 重庆主城 5 区禽类产品中 ΣPFASs 的平均值  
Fig.1 Average of ΣPFASs in poultry products from the 5 urban districts in Chongqing

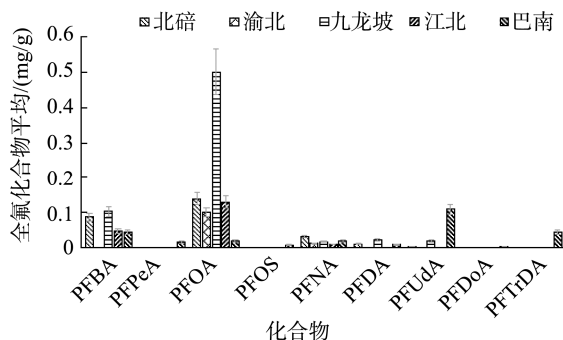


图 2 重庆主城 5 区禽类产品检出 PFASs 单体含量  
Fig.2 Detected content of PFASs in poultry products from 5 urban districts in Chongqing

北碚某禽类养殖场共检测出 PFBA、PFOA、PFNA、PFDA、PFuDA 5 种全氟化合物单体。ΣPFASs 16.149 ng/g, 平均值为 0.269 ng/g。检出率及含量水平为 PFOA (85%)>PFBA (20%)>PFNA (17%)>PFDA (8%)>PFuDA (2%), 含量范围分别为 ND~0.294、ND~0.704、ND~0.319、ND~0.145、ND~0.098 ng/g, 平均含量分别是 0.137、0.088、0.032、0.011、0.002 ng/g。PFOA 在 6 种基质中全部有检出, 鸡肝占了 26%, 其次是鸭肝和鸭肉, 分别占比 23%、22%。

九龙坡某禽类养殖场共检测出 PFBA、PFOA、PFNA、PFDA、PFuDA 5 种全氟化合物单体。ΣPFASs 39.583 ng/g,

平均值为 0.660 ng/g。检出率为 PFOA (88%)>PFNA (22%)>PFDA (18%)>PFuDA (15%)>PFBA (8%), 含量水平为 PFOA>PFBA>PFDA>PFuDA>PFNA, 含量范围分别为 ND~0.825、ND~2.600、ND~0.189、ND~0.221、ND~0.165 ng/g, 平均含量分别是 0.498、0.103、0.022、0.019、0.018 ng/g。PFOA 在 6 种基质中全部有检出, 鸭蛋和鸡肝占比最大, 分别为 23%和 22%。

巴南某禽类养殖场共检测出 PFBA、PFPeA、PFOA、PFOS、PFNA、PFDA、PFuDA、PFDoA、PFTrDA 9 种全氟化合物单体。ΣPFASs 16.234 ng/g, 平均值为 0.271 ng/g。检出率 PFuDA (33%)>PFTrDA (22%)>PFNA (18%)>PFOA (15%)>PFDA (8%)>PFBA (7%)>PFPeA (2%)=PFOS (2%)=PFDoA (2%)。含量水平为 PFuDA>PFBA=PFTrDA>PFNA>PFOA>PFPeA>PFOS>PFDoA; 含量范围分别为 ND~0.621、ND~0.813、ND~0.443、ND~0.219、ND~0.221、ND~0.816、ND~0.481、ND~0.067 ng/g; 平均含量分别是 0.106、0.045、0.045、0.020、0.019、0.017、0.009、0.008、0.001 ng/g。PFuDA 仅在鸭蛋和鸡蛋中检出, 占比分别为 56%和 44%。

渝北某禽类养殖场共检测出 PFOA、PFNA 2 种全氟化合物单体。ΣPFASs 6.958 ng/g, 平均值为 0.116 ng/g。检出率 PFOA (50%)>PFNA (8%), 含量水平为 PFOA>PFNA; 含量范围分别为 ND~0.321 ng/g、ND~0.233 ng/g, 平均含量分别是 0.103 ng/g、0.013 ng/g。其中 PFOA 在 6 种基质中均有检出, 鸡肝和鸭肝贡献最大, 分别占比 32%、29%。

江北区某养殖场共检测出 PFBA、PFOA、PFNA 3 种全氟化合物单体。ΣPFASs 11.363 ng/g, 平均值为 0.189 ng/g。检出率 PFOA (90%)>PFBA (12%)>PFNA (5%), 含量水平为 PFOA>PFBA>PFNA, 含量范围分别为: ND~0.478、ND~0.543、ND~0.239 ng/g, 平均含量分别是 0.132、0.048、0.010 ng/g。其中 PFOA 在 6 种基质中均有检出, 鸡肝和鸭肝贡献值相当, 均为 22%。

综上所述, 巴南区禽类养殖场检测出全氟化合物单体总类最多(9 种), 九龙坡区检测出的 PFASs 总平均含量最高, 受 PFASs 污染程度为: 九龙坡>北碚=巴南>江北>渝北, 北碚、九龙坡、渝北、江北都以 PFOA 单体检出率及平均含量最高, 且在肝脏中蓄积最多, 巴南则是以 PFuDA 单体检出率及平均含量最高, 以蛋中蓄积最多; 北碚、渝北、九龙坡、江北都以中链 PFASs 为主要污染物, 巴南以长链 PFASs 为主要污染物, 见图 3。PFOA 是工业中应用最广泛的中链 PFASs, 主要应用于食品包装、橡胶品制造、纺织、电子及涂料等行业<sup>[24]</sup>以及 PFASs 前体氟调聚醇的降解过程<sup>[20]</sup>。同时污水处理厂中 PFOA 也是被大量检出的全氟化合物单体<sup>[25]</sup>。巴南区被暴露的 PFuDA、PFTrDA 是传统 PFASs, 被常用于消防泡沫和纺织品处理中的保护剂<sup>[26]</sup>。

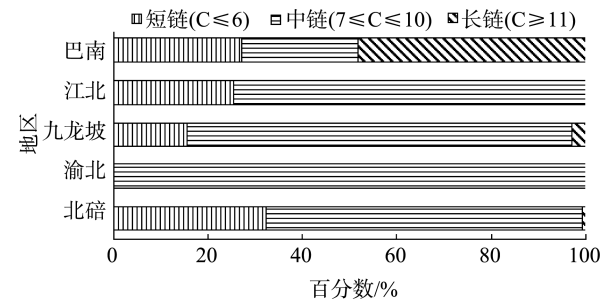


图3 重庆主城5区禽类产品中短链、中链、长链 PFASs 的百分含量

Fig.3 Percentage of short-chain, mid-chain and long-chain PFASs in poultry products from 5 urban districts of Chongqing

2.4 全氟类化合物污染源

PFASs 的组成可以在一定程度上反应污染源的信息,其中 PFOS/PFOA、PFOA/PFNA 和 PFHpA/PFOA 常被用于确定 PFASs 的潜在污染源<sup>[27]</sup>,由于本研究未检测出 PFHpA,所以仅对 PFOS/PFOA、PFOA/PFNA 做比较。当 PFOS/PFOA>1 认为该地区存在 PFASs 点源污染,仅巴南区检测出 PFOS,其 PFOS/PFOA 为 0.43,表明研究区域存在面源污染(降雨污染),然而,该指标在实际应用中,其适用性仍然存在争。当 PFOA/PFNA < 7 时认为该地区 PFASs 污染主要来源于间接来源,7≤PFOA/PFNA≤15 时认为该地区 PFASs 污染主要来源于工业直接排放,PFOA/PFNA≥15 时认为 PFASs 污染主要来源于前驱体降解<sup>[28]</sup>,其中北碚和巴南区的 PFOA/PFNA 比值分别为 4.27 和 0.92,表明其 PFASs 污染主要来源于间接来源;九龙坡的 PFOA/PFNA 比值为 27.16,表明其 PFASs 污染主要来源于前驱体降解。渝北和江北的 PFOA/PFNA 比值分别为 8.04 和 13.63,表明其 PFASs 污染主要来源于工业直接排放。利用 PCA 进一步量化重庆禽类产品中 PFASs 的来源,本研究选取了从 6

种基质中检测出的 9 种 PFASs 单体进行了 PCA,其 Kaiser-Meyer-Olkin 值为 0.682,即适合做因子分析。由图 4 可知,重庆市禽类产品中 PFASs 的来源解析可由 3 个主成分解释,累计可解释总方差 66%。

主成分 1 (PC1)由 PFUDa、PFTrDA、PFDoA、PFOS 组成,方差占比 32%,PFUDa、PFDoDA 和 PFTrDA 作为长链全氟羧酸(perfluorocarboxylic acids, PFCA) (n≥8),常被用作加工助剂,以促进含氟聚合物,主要是聚四氟乙烯(polytetrafluoroethylene, PTFE)和聚偏氟乙烯(polyvinylidene fluoride, PVDF)聚合中的聚合反应<sup>[29]</sup>,从表 4 也可以看出 PFUDa、PFTrDA、PFDoA、PFOS 两两也具有正相关性,从而说明其来源相似。PFOS 多被用于纺织、电镀、石化和采矿工业<sup>[30-31]</sup>,由于近些年欧盟及我国对工业生产中 PFOS 的用量进行了严格控制,并且在生产、流通、使用和进出口中都有所限制<sup>[27]</sup>,因此推测 PFOS 主要来源于前体化合物降解,由此 PC1 可解释含氟化合物生产行业以及前体化合物的降解形成的面源污染。

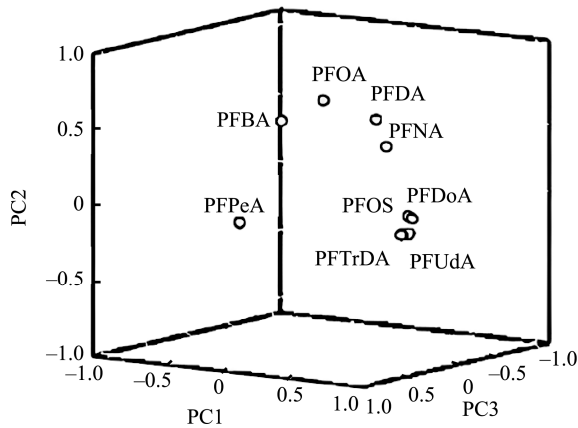


图4 禽类产品中 PFASs 的 PCA

Fig.4 PCA of PFASs in poultry products

表 4 禽类产品中 PFASs 的 Spearman 相关性

Table 4 Spearman correlation coefficient analysis of PFASs in poultry products

|        | PFBA | PFOA    | PFNA  | PFDA    | PFUDa    | PFTrDA  | PFPeA  | PFDoA   | PFOS    |
|--------|------|---------|-------|---------|----------|---------|--------|---------|---------|
| PFBA   | 1    | 0.234** | 0.048 | 0.19**  | -0.01    | -0.071  | 0.111  | -0.031  | -0.031  |
| PFOA   |      | 1       | 0.031 | 0.157*  | -0.226** | -0.146* | -0.099 | -0.018  | -0.021  |
| PFNA   |      |         | 1     | 0.401** | 0.202**  | 0.219** | -0.034 | 0.194** | 0.161*  |
| PFDA   |      |         |       | 1       | 0.197**  | 0.182** | -0.034 | 0.151*  | 0.18**  |
| PFUDa  |      |         |       |         | 1        | 0.507** | -0.028 | 0.338** | 0.396** |
| PFTrDA |      |         |       |         |          | 1       | -0.007 | 0.482** | 0.357** |
| PFPeA  |      |         |       |         |          |         | 1      | -0.01   | -0.01   |
| PFDoA  |      |         |       |         |          |         |        | 1       | 0.563** |
| PFTeDA |      |         |       |         |          |         |        |         | -0.007  |
| PFOS   |      |         |       |         |          |         |        |         | 1       |

注: \*\*代表  $P\leq 0.01$ ; \*代表  $P\leq 0.05$ 。



主成分 2 (PC2)由 PFBA、PFOA、PFNA、PFDA 组成, 方差占比 23%, PFOA、PFDA 和 PFNA 是 PTOHs 降解的产物之一, PFBA、PFNA 和 PFOA 在工业中作为加工助剂广泛应用于生产 PTFE 等含氟聚合物的制造和加工, 同时, PFNA 也有在消费品, 如手套、户外纺织品中有检出<sup>[32]</sup>。因此 PC2 可解释为含氟化合物生产行业、消费品生产以及 PTOHs 降解。

主成分 3 (PC3)由 PFPeA 组成, 方差占比 11%, PFPeA 主要来自于中链 PFOA 的降解<sup>[17]</sup>, 也有文献指出其已应用于消费品, 例如食品包装、沙发和地毯; PFPeA 与任何目标物之间均没有相关性( $P>0.05$ )。

重庆市位于长江上游, 其沿岸涉及 PFASs 的行业众多, 如石化、纺织工业、电子以及五金机械店等, 李敏等<sup>[25]</sup>研究了重庆市 11 个典型行业(如电子设备制造业、汽车制造业、纺织业等)废水中 16 种 PFASs, 结果发现 PFOA 为首要污染物, 进、出水中 $\Sigma_{16}$ PFASs 质量浓度范围分别为

12.4~38484.0 ng/L 和 10.0~48677.0 ng/L, 其表明重庆市地表水中的 PFASs 来源于工业废水的排放。因此, 结合主成分分析结果和数据调查情况, 推测重庆市禽类产品中 PFASs 的可能主要来自含氟化合物生产行业等行业的工业废水排放、PTOHs 降解和消费品的生产与使用。

2.5 健康风险评估

本研究以禽类产品中 PFASs 的中位数评估反映重庆市标准人的一般暴露水平。重庆市主城 5 区各类禽类产品中 PFASs 的污染水平不同, 不同种类的禽类产品中 PFASs 的浓度有差异, 因此危害指数也不同。本研究仅选取检测出的 9 种全氟化合物单体对当地一个标准人产生的暴露风险进行评估。如表 5 所示, 全氟类化合物日摄入量( $EDI_{\Sigma PFASs}$ )最大值出现在鸭肝中, 为  $2.411\text{ ng}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ , 其次为鸭蛋( $2.326\text{ ng}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ )、鸡肝( $1.917\text{ ng}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ )、鸭肉( $1.325\text{ ng}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ )、鸡肉( $1.146\text{ ng}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ )、鸡蛋( $1.068\text{ ng}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ )。

表 5 PFASs 在禽类产品中的 EDI 值和 HR 值  
Table 5 EDI and HR of PFASs in different poultry products

| PFASs          | 鸡肉                                                           |       | 鸡蛋                                                           |       | 鸡肝                                                           |       | 鸭肉                                                           |       | 鸭蛋                                                           |       | 鸭肝                                                           |       | $\Sigma$ 禽类产品                                                |       |
|----------------|--------------------------------------------------------------|-------|--------------------------------------------------------------|-------|--------------------------------------------------------------|-------|--------------------------------------------------------------|-------|--------------------------------------------------------------|-------|--------------------------------------------------------------|-------|--------------------------------------------------------------|-------|
|                | EDI<br>/( $\text{ng}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ ) | HR    | EDI<br>/( $\text{ng}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ ) | HR    | EDI<br>/( $\text{ng}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ ) | HR    | EDI<br>/( $\text{ng}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ ) | HR    | EDI<br>/( $\text{ng}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ ) | HR    | EDI<br>/( $\text{ng}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ ) | HR    | EDI<br>/( $\text{ng}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ ) | HR    |
| PFBA           | 0.248                                                        | 0.133 | 0.113                                                        | 0.061 | 0.192                                                        | 0.104 | 0.242                                                        | 0.130 | 0.322                                                        | 0.173 | 0.803                                                        | 0.433 | 1.920                                                        | 1.034 |
| PFPeA          | -                                                            | -     | -                                                            | -     | 0.128                                                        | 0.069 | -                                                            | -     | -                                                            | -     | -                                                            | -     | 0.128                                                        | 0.069 |
| PFOA           | 0.855                                                        | 0.460 | 0.534                                                        | 0.287 | 1.561                                                        | 0.841 | 1.083                                                        | 0.583 | 0.873                                                        | 0.470 | 1.035                                                        | 0.558 | 5.942                                                        | 3.199 |
| PFOS           | -                                                            | -     | 0.040                                                        | 0.047 | -                                                            | -     | -                                                            | -     | -                                                            | -     | -                                                            | -     | 0.040                                                        | 0.047 |
| PFNA           | 0.043                                                        | 0.023 | 0.032                                                        | 0.017 | 0.036                                                        | 0.019 | -                                                            | -     | 0.547                                                        | 0.295 | 0.367                                                        | 0.198 | 1.025                                                        | 0.552 |
| PFDA           | -                                                            | -     | 0.016                                                        | 0.009 | -                                                            | -     | -                                                            | -     | 0.060                                                        | 0.033 | 0.193                                                        | 0.104 | 0.270                                                        | 0.145 |
| PFUdA          | -                                                            | -     | 0.232                                                        | 0.125 | -                                                            | -     | -                                                            | -     | 0.393                                                        | 0.212 | 0.012                                                        | 0.007 | 0.637                                                        | 0.343 |
| PFDaA          | -                                                            | -     | 0.006                                                        | 0.003 | -                                                            | -     | -                                                            | -     | -                                                            | -     | -                                                            | -     | 0.006                                                        | 0.003 |
| PFTTrDA        | -                                                            | -     | 0.095                                                        | 0.051 | -                                                            | -     | -                                                            | -     | 0.130                                                        | 0.070 | -                                                            | -     | 0.225                                                        | 0.121 |
| $\Sigma$ PFASs | 1.146                                                        | 0.616 | 1.068                                                        | 0.411 | 1.917                                                        | 1.033 | 1.325                                                        | 0.713 | 2.326                                                        | 0.938 | 2.411                                                        | 1.189 | 10.193                                                       | 4.900 |

注: -代表禽类产品中未检测出该化合物。

家庭居民从禽类产品中摄入的 PFASs 量最大的为 PFOA ( $5.942\text{ ng}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ ), 其次为 PFBA ( $1.920\text{ ng}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ ), 两者的 HR 值都>1, 表明会对当地居民的身体健康产生潜在危害, PFOA 和 PFBA 的潜在危害分别主要来自于鸡肝、鸭肝, 因此这两类食物应当引起当地居民的注意。此外禽类产品中 PFNA 的 HR 达到 0.552, 排名第 3, 其带来的健康风险也不容忽视。本研究以 PFOA(中链)作为短链和长链的参考剂量标准, 因此, PFBA(短链)的危害指数可能低于估值, 还需要进一步研究。本研究用于人体的健康风险评估的动物源性食品只占据我国人类膳食结构的一部分, 若要较准确且全面地评估当地居民摄食食品中 PFASs 产生的潜在健康风险, 还需探究当地植物源食品和生活饮用水中 PFASs 的污染水平并进行暴露评估<sup>[33]</sup>。

3 结 论

(1)重庆主城 5 区的 6 种动物源性基质(鸡肉、鸡肝、鸡蛋、鸭肉、鸭肝、鸭蛋)中共检测出 9 种全氟类化合物, 包括 PFBA、PFPeA、PFOA、PFOS、PFNA、PFDA、PFUdA、PFDaA、PFTTrDA, 其中以 PFOA 为主要检出单体且检出含量水平最高。

(2)通过 PCA 分析模型, 对研究区域进行了污染来源的源解析, 结果表明, 重庆市禽类产品中 PFASs 的可能主要来自含氟化合物生产行业等行业的工业废水排放、PTOHs 降解和消费品(如食品包装)的生产与使用。

(3)通过初步的健康风险评估, 重庆市市民通过摄食当地的动物源性食品存在一定的全氟化合物暴露风险, 尤

其是禽类肝脏中的 PFOA 和 PFBA 的污染情况以及喜食动物肝脏的人体健康风险需引起重视。

通过上述结论,可以对重庆市禽类产品的污染水平判断提供基础,并提醒当地居民在食用高污染种类的禽类产品时应提高警惕。同时,未来也可对我国不同地区、不同基质中全氟化合物开展检测技术研发、毒理学评价,以实现更加全面的风险评估。

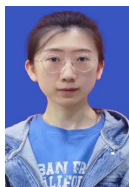
## 参考文献

- [1] LENKA SP, KAH M, PADHYE LP. A review of the occurrence, transformation, and removal of poly-and perfluoroalkyl substances (PFAS) in wastewater treatment plants [J]. *Water Res*, 2021, 199: 117187.
- [2] HUNG MD, JUNG HJ, JEONG HH, *et al.* Perfluoroalkyl substances (PFASs) in special management sea areas of Korea: Distribution and bioconcentration in edible fish species [J]. *Mar Pollut Bull*, 2020, 156: 111236.
- [3] 吴坤, 吴玉田, 赵君, 等. 滤过型固相萃取柱净化-超高效液相色谱-串联质谱法测定鸡蛋中 15 种全氟化合物的含量[J]. *理化检验-化学分册*, 2024, 60(1): 60-66.
- WU K, WU YT, ZHAO J, *et al.* Determination of 15 perfluorinated compounds in eggs by ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry with filterable solid phase extraction column purification [J]. *Phys Test Chem Anal (Part B: Chem Anal)*, 2024, 60(1): 60-66.
- [4] 生态环境部. 重点管控新污染物清单(2023 年版)[Z]. 2023. Ministry of Ecology and Environment. The list of critical control of the emerging contaminants (2023) [Z]. 2023.
- [5] 夏慧. 全氟化合物的暴露风险及其与人体功能蛋白相互作用的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
- XIA H. The investigations of exposure risk of perfluorinated compounds and their interactions with human functional proteins [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2018.
- [6] 姜晓满, 文武, 俞盈. 结合高分辨质谱法、荧光光谱法及分子对接研究全氟化合物与白蛋白的相互作用[J]. *环境化学*, 2020, 39(6): 1634-1641.
- JIANG XM, WEN W, YU Y. Interactions of perfluorinated compounds with serum albumins by high resolution mass spectrometry, fluorescence spectroscopy and molecular docking [J]. *Environ Chem*, 2020, 39(6): 1634-1641.
- [7] 唐静怡, 殷晨露, 吉晓明. 全氟化合物及其替代物干扰脂质代谢稳态的研究进展[J]. *环境与健康杂志*, 2024, 41(2): 170-173.
- TANG JY, YIN CL, JI XM. Effect of perfluorinated compounds and substitutes on lipid metabolism: A review of recent studies [J]. *J Environ Health*, 2024, 41(2): 170-173.
- [8] 张露露, 刘婧, 贺颖倩, 等. 血清全氟化合物与代谢相关脂肪性肝病患病风险的关系[J]. *中国环境科学*, 2023, 43(2): 964-972.
- ZHANG LL, LIU J, HE YQ, *et al.* Relationship of serum perfluoroalkyl substances with the risk of metabolic associated fatty liver disease [J]. *China Environ Sci*, 2023, 43(2): 964-972.
- [9] 马雪倩, 叶英辉. 全氟类化合物在人体与动物体内的生殖毒性[J]. *国际生殖健康/计划生育杂志*, 2019, 38(4): 309-312.
- MA XQ, YE YH. Reproductive toxicity of polyfluorinated chemicals: A mini review [J]. *J Int Reprod Health/Fam Plan*, 2019, 38(4): 309-312.
- [10] 林彩云, 谢美华, 尹飞飞, 等. 传统与新型全氟化合物对育龄期女性生殖激素的影响[J]. *海南医学院学报*, 2023, 29(13): 997-1002.
- LIN CY, XIE MH, YIN FF, *et al.* Association of novel and legacy PFAS with reproductive hormones in women of child-bearing age [J]. *J Hainan Med Univ*, 2023, 29(13): 997-1002.
- [11] LIANG L, PAN Y, BIN L, *et al.* Immunotoxicity mechanisms of perfluorinated compounds PFOA and PFOS [J]. *Chemosphere*, 2021, 291: 132892.
- [12] 陈敏燕, 汪子夏, 田英, 等. 全氟化合物免疫毒性研究进展[J]. *环境与职业医学*, 2022, 39(2): 223-228, 235.
- CHEN MY, WANG ZX, TIAN Y, *et al.* Advances on immunotoxicities induced by per-and polyfluoroalkylated substances [J]. *J Environ Occup Med*, 2022, 39(2): 223-228, 235.
- [13] 商春锋, 周一冉, 胡国栋, 等. Sin-QuEChERS 净化技术结合液相色谱-串联质谱法检测大棚蔬菜中 13 种全氟烷基酸[J]. *食品安全质量检测学报*, 2023, 14(1): 90-97.
- SHANG CF, ZHOU YR, HU GD, *et al.* Determination of 13 kinds of perfluoroalkyl acids in greenhouse vegetables by Sin-QuEChERS purification technology and liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. *J Food Saf Qual*, 2023, 14(1): 90-97.
- [14] 母国栋, 刘通, 姚美伊, 等. 分子印迹固相微萃取-敞开式离子化质谱法快速筛查牛奶中 2 种全氟化合物残留[J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(13): 4188-4193.
- MU GD, LIU T, YAO MY, *et al.* Rapid screening of 2 kinds of perfluorinated compounds residues in milk by molecularly imprinted solid phase microextraction-ambient ionization mass spectrometry [J]. *J Food Saf Qual*, 2022, 13(13): 4188-4193.
- [15] 唐韵熙, 白亚敏, 刘露露, 等. 超高效液相色谱-串联质谱法同时测定动物源性食品中 21 种全氟类化合物残留[J]. *食品与机械*, 2023, 39(7): 29-39.
- TANG YX, BAI YM, LIU LL, *et al.* Simultaneous determination of 21 perfluorinated compounds in animal-derived food by UPLC-MS/MS [J]. *Food Mach*, 2023, 39(7): 29-39.
- [16] 中国营养学会. 中国居民膳食指南科学研究报告[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2021.
- Chinese Nutrition Society. Scientific research report of the chinese dietary guidelines [M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2021.
- [17] 白润叶, 张毅, 肖陈贵, 等. 中国部分主产区鸡肉中全氟化合物残留水平调查[J]. *食品安全质量检测学报*, 2016, 7(2): 730-740.
- BAI RY, ZHANG Y, XIAO CG, *et al.* Investigation of perfluorinated compounds in chicken from parts of main producing areas of China [J]. *J Food Saf Qual*, 2016, 7(2): 730-740.
- [18] 齐彦杰, 周珍, 史亚利, 等. 北京市市售鸡蛋和鸭蛋中全氟化合物的污染水平研究[J]. *环境科学*, 2013, 34(1): 244-250.
- QI YJ, ZHOU Z, SHI YL, *et al.* Pollution levels of perfluorochemicals in chicken eggs and duck eggs from the markets in Beijing [J]. *Environ Sci*, 2013, 34(1): 244-250.
- [19] 刘逸飞. 全氟化合物在“青贮饲料-牛奶”食物链中污染风险研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2022.
- LIU YF. Pollution risk of polyfluoroalkyl substances through the “silage-milk” food chain [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2022.

- [20] ZHANG M, WANG P, LU Y, *et al.* Bioaccumulation and human exposure of perfluoroalkyl acids (PFAAs) in vegetables from the largest vegetable production base of China [J]. *Environ Int*, 2019, 135: 105347.
- [21] 雷梦真, 何锦秋, 张洪利, 等. 成都市典型湿地公园全氟化合物的污染特征及风险评估[J]. *环境化学*, 2024, 43(9): 1–11.
- LEI MZ, HE JQ, ZHANG HL, *et al.* Pollution characteristics and risk assessment of perfluoroalkyl substances in the typical wetland of Chengdu City [J]. *Environ Chem*, 2024, 43(9): 1–11.
- [22] 蒋翌泽, 王铁宇, 张晓军, 等. 全氟化合物对水生植物的生态效应研究 I——典型城市河道全氟化合物的暴露水平及植物富集特征[J]. *生态毒理学报*, 2015, 10(2): 435–444.
- JIANG ZZ, WANG TY, ZHANG XJ, *et al.* Ecological effects on aquatic plants induced by perfluorinated compounds I—occurrences and bioaccumulation of perfluorinated compounds in typical urban river [J]. *Asian J Ecotox*, 2015, 10(2): 435–444.
- [23] 杨琳, 于欣平, 王梦, 等. 中国 12 个省份母乳中全氟化合物前体物质含量分析[J]. *中国预防医学杂志*, 2015, 49(6): 529–533.
- YANG L, WANG XP, WANG M, *et al.* Analysis of perfluoroalkyl substances precursors in human milk from 12 provinces of China [J]. *Chin Prev Med*, 2015, 49(6): 529–533.
- [24] 黄家浩, 陶艳茹, 黄天寅, 等. 洪泽湖水体全氟化合物的污染特征、来源及健康风险[J]. *环境科学研究*, 2023, 36(4): 694–703.
- HUANG JH, TAO YR, HUANG TY, *et al.* Occurrence, sources and health risk assessment of per-and polyfluoroalkyl substances in surface water of Hongze Lake [J]. *Res Environ Sci*, 2023, 36(4): 694–703.
- [25] 李敏, 蔡凤珊, 秦瑞欣, 等. 重庆市典型行业废水中 16 种全氟化合物污染特征[J]. *生态毒理学报*, 2021, 16(5): 44–58.
- LI M, CAI FS, QIN RX, *et al.* Pollution status of sixteen per-and polyfluoroalkyl substances in wastewater of typical industries in Chongqing City [J]. *Asian J Ecotox*, 2021, 16(5): 44–58.
- [26] 张敏. 全氟化合物及其替代品在淡水鱼类中的累积放大特征和健康风险评估[D]. 重庆: 重庆三峡学院, 2023.
- ZHANG M. Accumulation amplification characterization and health risk assessment of perfluorinated compounds and their substitutes in freshwater fish [D]. Chongqing: Chongqing Three Gorges University, 2023.
- [27] 金梦, 刘丽君, 赵波, 等. 长三角地区水体中全氟化合物的污染特征及风险评价[J]. *环境化学*, 2023, 42(7): 2153–2162.
- JIN M, LIU LJ, ZHAO B, *et al.* Pollution characteristics and risk assessment of perfluoroalkyl substances in surface water from Yangtze River Delta [J]. *Environ Chem*, 2023, 42(7): 2153–2162.
- [28] PAN CG, YING GG, LIU YS, *et al.* Contamination profiles of perfluoroalkyl substances in five typical rivers of the Pearl River Delta region, South China [J]. *Chemosphere*, 2014, 114: 16–25.
- [29] 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]. *环境化学*, 2024, 43(7): 1–12.
- ZHANG M, CAI D, CHEN XX, *et al.* Contamination characteristics and health risk assessment of poly-and perfluoroalkyl substances and alternatives in fish from Liaoning Province [J]. *Environ Chem*, 2024, 43(7): 1–12.
- [30] 熊杰, 史箴, 程欢, 等. 长江上游地区地表水中全氟化合物分布特征、来源辨析及风险评价——以岷江为例[C]. 第三届环境监测与预警技术大会, 2023.
- XIONG J, SHI Z, CHENG H, *et al.* Distribution characteristics, source discrimination and risk assessment of perfluoroalkyl substances in surface water from the upper reaches of the Yangtze River-taking the Minjiang River as an example [C]. *Proceedings of the 3rd Environmental Monitoring and Early Warning Technology Conference*, 2023.
- [31] DASU K, XIA X, SIRIWARDENA D, *et al.* Concentration profiles of per-and polyfluoroalkyl substances in major sources to the environment [J]. *J Environ Manag*, 2022, 301: 113879.
- [32] 刘承友, 刘金林, 郭婧, 等. 大伙房水库多介质中全氟化合物赋存特征、源解析及健康风险评估[J]. *环境监控与预警*, 2022, 14(5): 133–142.
- LIU CY, LIU JL, GUO J, *et al.* Characteristics, sources and risk assessment of polyfluoroalkyl substances in multi-media of Dahufang reservoir [J]. *Environ Monit Forewarn*, 2021, 14(5): 133–142.
- [33] 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 ZY, CAO WC, 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]. *Sci Technol Food Ind*, 2021, 42(20): 214–222.

(责任编辑: 安香玉 蔡世佳)

## 作者简介



唐韵熙, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为食品安全检测。  
E-mail: 455670865@qq.com



白亚敏, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为食品安全检测。  
E-mail: 965241582@qq.com