

• 营养与食品卫生 •

# 兰州市售羊肉及其副产品中全氟及多氟烷基物质的污染特征与膳食风险评估

夏智恒<sup>1</sup>,程妍<sup>1</sup>,高向娜<sup>1</sup>,李东梅<sup>1</sup>,张思维<sup>2</sup>,王慧娟<sup>1</sup>

1.甘肃省疾病预防控制中心(甘肃省预防医学科学院),甘肃 兰州 730020;2.天津市疾病预防控制中心

**摘要:**目的 了解兰州市售羊肉及其副产品中全氟及多氟烷基物质(per-and polyfluoroalkyl substances,PFAS)的污染特征,并评估其膳食暴露健康风险。方法 采集羊肉及羊内脏样品 88 份,采用液相色谱-串联质谱法进行检测,系统分析 25 种 PFAS 检出情况并使用风险比对膳食风险暴露情况进行评估。结果 PFAS 总体检出率为 79.54%,其中羊肝污染最为显著,检出率达 100%,且 PFBA 与全氟辛烷磺酸为主要检出单体。在现有消费模式下,羊肉及其副产品中全氟丁酸、全氟辛烷磺酸和全氟癸烷磺酸的风险比均小于 1。羊肝中全氟辛烷磺酸的暴露风险显著高于其他组织,且儿童因体重较轻,其风险比约为成人的 2.4 倍。结论 本研究检测的 88 份羊肉及羊内脏样品中,共检出 14 种单体。总体污染水平较低,通过膳食风险评估显示,不会对人体造成健康危害。

**关键词:**羊肉及其副产品;风险评估;全氟化合物;污染特征

中图分类号:R155.5 文献标志码:A 文章编号:1003-8507(2026)13-2371-08

DOI: 10.20043/j.cnki.MPM.202602023

## Contamination characteristics and dietary risk assessment of per- and polyfluoroalkyl substances in commercially available mutton and its by-products in Lanzhou

XIA Zhi-heng\*, CHENG Yan, GAO Xiang-na, LI Dong-mei, ZHANG Si-wei, WANG Hui-juan

\*Gansu Provincial Center for Disease Control and Prevention (Gansu Provincial Academy of Preventive Medicine), Lanzhou, Gansu 730020, China

**Abstract:** **Objective** To investigate the contamination characteristics of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in mutton and its by-products sold in Lanzhou and assess the associated health risks through dietary exposure. **Methods** A total of 88 samples of mutton and sheep offal were collected. The presence of 25 PFAS was systematically analyzed using liquid chromatography-tandem mass spectrometry, and dietary exposure risks were evaluated using the hazard ratio (HR). **Results** The overall detection rate of PFAS was 79.54%, with the most significant contamination observed in sheep liver, where the detection rate reached 100%. PFBA and PFOS were the predominant monomers detected. Under the current consumption pattern, the HRs for PFBA, PFOS, and PFDS in mutton and its by-products were all less than 1. The exposure risk of PFOS in sheep liver was significantly higher than that in other tissues, and the HR in children was approximately 2.4 times that in adults due to their lower body weight. **Conclusion** A total of 14 PFAS monomers were detected in the 88 mutton and sheep offal samples analyzed in this study. The overall contamination level was low, and the dietary risk assessment indicated no significant health risk to humans.

**Keywords:** Mutton and its by-products; Risk assessment; Perfluoroalkyl substances; Contamination characteristics

全氟及多氟烷基物质(per-and polyfluoroalkyl substances,PFAS)是一类环境持久性有机污染物,是工业发展中人为制造产生,具有非常出色的热稳定性和疏水疏油的特性,广泛应用于化工、纺织、电镀及食品包装等多个行业。随着生产与使用的增加,PFAS已在血液、水体、土壤及各类食品中被频繁检出,由此

引发的环境污染与健康问题备受关注<sup>[1]</sup>。PFAS主要包括两大类,全氟羧酸类(perfluorocarboxylic acids,PFCA)与全氟磺酸类(perfluorosulfonic acids,PFSA),其中最典型的是全氟辛酸和全氟辛烷磺酸(perfluorooctane sulfonic acid,PFOS)。由于潜在的危害性,在 2009 和 2019 年,PFOS 与全氟辛酸先后两次被列入《斯德哥尔摩公约》环境持久性有机污染物的管控清单。我国已实施相关管理措施,不仅限制了 PFOS 及其盐类的生产与应用,还在稳步推进其淘汰

基金项目:甘肃省自然科学基金项目(23JRRA1258)

作者简介:夏智恒(1993—),男,主管技师,研究方向:卫生检验与检疫

通信作者:王慧娟,E-mail:1692846702@qq.com

进程,显示出对 PFAS 污染问题日益提升的重视。

膳食摄入是人体暴露于 PFAS 的主要途径。当前针对肉类的 PFAS 研究多集中于牛、羊、鸡、鱼等品类,例如张妍等<sup>[2]</sup>在上海市售水产品中检出 10 种 PFAS 同系物;黄洁慧<sup>[3]</sup>报道我国部分地表水体中 5 种全氟化合物的暴露特征与生态风险;王戈慧<sup>[4]</sup>则研究了新疆产地牛羊肉中全氟烷基物质的污染特征与区域分异及摄食风险;白润叶<sup>[5]</sup>曾对中国若干主产区的鸡肉与羊肉中全氟化合物残留状况进行分析。尽管肉类中普遍存在 PFAS 残留,但目前关于不同区域羊肉及其副产品中该类物质的污染状况数据仍较缺乏,污染分布特点及其经食物摄入的健康风险仍有待深入评估。

本研究将兰州市售羊肉及相应副产品作为分析样品,通过测定兰州市售羊肉及其副产品中 25 种 PFAS 的含量,并结合膳食风险评估,旨在阐明其污染现状与分布特征,目的是为地方性羊肉类食品中 PFAS 的风险管理研判及政策制定提供参考数据。

## 1 材料与方法

**1.1 样品采集** 2024 年,本研究随机采集兰州市的羊肉销售市场、大型购物超市及个体肉店的销售样品,共采集样品 88 份,其中羊肚、羊腰(肾)、羊肺和羊肠各 9 份,羊肉 8 份,羊心 11 份,羊肝 33 份。所有样品在采集后当天送到检测实验室进行粉碎处理,然后再用锡纸包裹,以防污染。统一编号后,外层用聚乙烯密封袋密封,冷冻避光保存待检测。

**1.2 仪器与试剂** 液相色谱-串联质谱联用仪(1290 Infinity II-6470B,美国 Agilent 公司);高速多功能粉碎机(SHENGSHEN,武义海纳电器有限公司);高速冷冻离心机(3-30KS,德国 Sigma 公司);涡旋振荡器(VM-3B,常德比克曼生物科技有限公司);振荡混匀仪(DMR-300,德国 Heidolph 公司);超声波恒温水浴振荡器(JCSZ-300,青岛聚创世纪环保有限公司);超纯水仪(Milli-Q,美国 Millipore 公司);天平(ME204/02,精度 0.000 1 g,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司);固相萃取小柱(酯除 300 mg/3ml,美国 ThermoFisher 公司);乙腈中 8:2 CL-PFESA(浓度为 50  $\mu\text{g}/\text{ml}$ );乙腈中 N-MEFOSAA(浓度为 50  $\mu\text{g}/\text{ml}$ );乙腈中 21 种 PFAS 混合标准溶液(浓度为 2 000 ng/ml);乙腈中 6:2 CL-PFESA 标准溶液(浓度为 50  $\mu\text{g}/\text{ml}$ );乙腈中 N-ETFOSAA(浓度为 50  $\mu\text{g}/\text{ml}$ );乙腈中 13 种 PFAS 混合同位素内溶液(浓度为 2 000 ng/ml);乙腈中 N-MEFOSAA-D3(浓度为 50  $\mu\text{g}/\text{ml}$ );乙腈中 N-ETFOSAA-D5(浓度为 50  $\mu\text{g}/\text{ml}$ ),上述标准物质和对应内标都购买于加拿大 Wellington 公司;

甲醇、乙腈(都是色谱纯,德国 Merck 公司);乙酸铵(分析纯,上海麦克林生物科技股份有限公司)。

## 1.3 实验方法

**1.3.1 样品前处理** 准确称取已均质试样 3.0 g(精确至 0.001 g)置于 15 ml 聚乙烯离心管中。依次向管内添加 2.0 ml 超纯水及 80.0  $\mu\text{l}$  浓度为 20 ng/ml 的同位素内标工作液,加盖后经涡旋振荡混匀 3 min 后,准确加入 8.0 ml 乙腈。盖紧盖子,置于超声波振荡器中恒温提取 30 min,随后于 4  $^{\circ}\text{C}$ 、离心半径 10 cm,10 000 r/min 条件下离心 10 min。取约 3ml 上清液加入经活化后的固相萃取小柱进行净化,弃去初始流出液约 1ml,收集剩余流出液。所得净化液经 0.22  $\mu\text{m}$  有机针式过滤头过滤,准确吸取 0.5 ml 滤液于 2 ml 进样小瓶中,加入 0.5 ml 超纯水混匀后上机测定。

## 1.3.2 仪器参考条件

液相色谱条件:采用 T3 色谱柱(2.1 mm  $\times$  100 mm,1.8  $\mu\text{m}$ );柱温维持在 35  $^{\circ}\text{C}$ ;流动相由乙酸铵溶液(2 mmol/L, A 相)与甲醇(B 相)组成,流速设定为 0.2 ml/min。进样体积 5  $\mu\text{l}$ 。梯度洗脱程序设置为:0 ~ 0.5 min 内,B 相保持 30%初始比例;0.5 ~ 8.0 min 内,B 相线性增至 100%;8.0 ~ 10.0 min 内,B 相线性回落至 30%。

质谱条件:离子源类型为电喷雾电离源,检测模式为多反应监测负离子模式。质谱仪器参数参照仪器要求调整到最佳。

**1.4 数据处理** 使用 Excel 2016、Origin 2021 和 R 语言对检测数据进行统计分析和可视化呈现。由于所得数据为非正态分布,本研究选用 Spearman 秩相关分析法进行相关性检验。对于未检出(即低于检出限,LOD)的样本数据,在统计分析时统一按 1/2LOD 赋值计算,其中全氟丁酸和全氟戊酸的检出限为 0.6  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ,其他均为 0.3  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。检验水准  $\alpha=0.05$ 。

**1.5 膳食风险评估** 依据本研究检测的兰州市售羊肉及其副产品中 PFAS 的含量数据,对全氟丁酸、PFOS、全氟癸烷磺酸(perfluorodecanesulfonic acid, PFDS)及 PFAS 总量进行膳食风险评估,运用公式(1)进行估算居民 PFAS 日均摄入量(estimated daily intake, EDI):

$$\text{EDI}(\text{kg} \times \text{d}) = \frac{C \times IR}{BW} \quad \text{公式(1)}$$

式中,  $C$  为羊肉及其副产物中 PFAS 的含量( $\mu\text{g}/\text{kg}$ );  $IR$  为甘肃省居民日均摄入羊肉量(0.006 6 kg/d),该消费量数据来源于《中国统计年鉴 2024》<sup>[6]</sup>;  $BW$  为居民平均体重(成人按 66.4 kg 计,儿童按 27.5 kg 计)<sup>[7-8]</sup>。

PFAS 暴露所致健康风险采用风险比(hazard

ratio,  $HR$ ) 评价, 其计算公式见公式(2)。 $HR$  的判定标准为: 若  $HR > 1$ , 表明 PFAS 含量可能对人体健康产生潜在危害; 若  $HR < 1$ , 则认为当前暴露水平尚在安全范围内, 未构成明显健康影响。 $HR$  按公式(2)计算:

$$HR = \frac{EDI}{RfD} \quad \text{公式(2)}$$

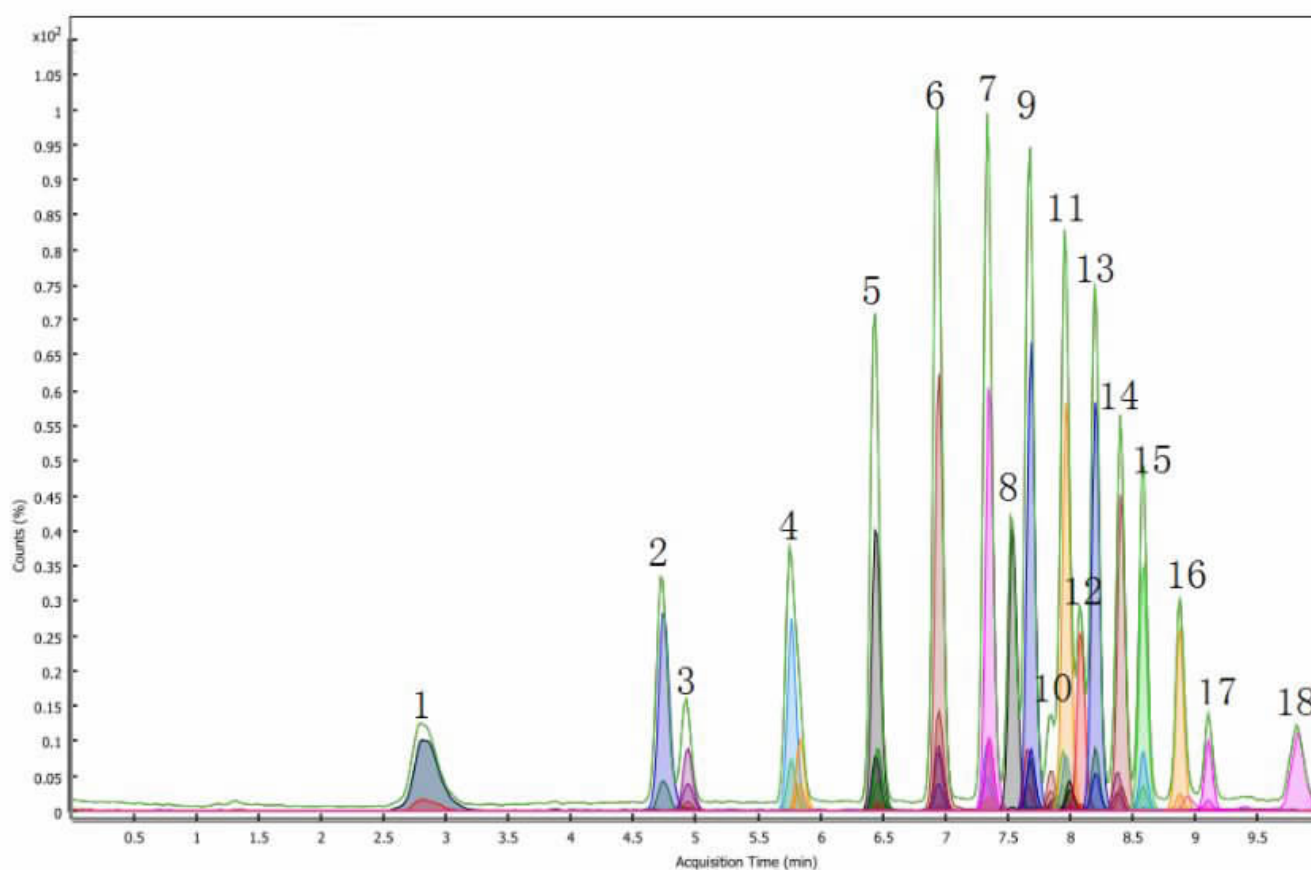
式中:  $RfD$  为参考剂量(reference dose)。PFOS 的参考剂量参考美国环保署的推荐值, 定为  $0.02 \mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ ; 全氟丁酸的参考剂量参考美国明尼苏达州卫生部的推荐值, 定为  $2.9 \mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ 。由于目前尚无任何国家制定 PFDS 的参考剂量, 本研究采用 PFOS 的参考剂量进行计算<sup>[9]</sup>。

**1.6 质量控制** 在样品前处理阶段, 使用锡纸包裹, 以防污染; 在检测阶段, 选用同位素内标法, 减少检测过程中的仪器误差, 检测时采用每 10 个样品进行一

个平行样测定, 每 20 个样品进行一个加标回收实验; 数据处理和录入时采用双人同时处理, 确保实验结果的准确性。

## 2 结果

**2.1 25 种 PFAS 的质谱特征** 为实现 PFAS 各单体及其对应内标的准确测定, 本研究依据目标化合物的分子量、碎片特征及质谱裂解规律, 为每种待测物及其内标筛选并优化了特征性离子对(母离子与子离子组合)。通过该特异性离子对进行多反应监测, 确保了分析过程的选择性与灵敏度, 从而实现可靠的定性分析与定量分析。具体各单体的定量离子对及对应的碰撞能量等质谱参数见表 1, 典型色谱分离图参见图 1。该方法的特异性、灵敏度与准确性能够满足污染特征分析与膳食风险评估。



注: 1 全氟丁酸; 2 全氟戊酸; 3 全氟丁烷磺酸; 4 全氟己酸、全氟戊烷磺酸; 5 全氟庚酸、全氟己烷磺酸; 6 全氟庚烷磺酸、全氟辛酸; 7 全氟壬酸、全氟辛烷磺酸; 8 6:2 氯代多氟烷基醚磺酸盐; 9 全氟壬烷磺酸、全氟癸酸; 10 全氟癸烷磺酸; 11 全氟十一烷酸; 12 8:2 氯代多氟烷基醚磺酸盐; 13 全氟十二酸、N-甲基全氟辛烷磺酰胺乙酸; 14 全氟十二磺酸钠; 15 全氟十三酸; 16 全氟十四烷酸、N-乙基全氟辛烷磺酰胺乙酸; 17 全氟十六烷酸; 18 全氟十八酸。

图 1 色谱分离图

Figure 1 Chromatogram

**2.2 25 种 PFAS 的检测结果** 在对样本进行的 25 种 PFAS 检测中, 共检出 14 种单体, 总体检出率达 79.54%, 表明该区域羊肉及其副产品普遍处于 PFAS 暴露状态。PFAS 总浓度范围为  $< 2.40 \sim 17.58 \mu\text{g}/\text{kg}$ , 显示部分样本存在复合污染现象, 结果见表 2。具体

来看, 短链羧酸全氟丁酸检出率最高, 为 51.14%, 浓度范围为  $< 0.30 \sim 8.96 \mu\text{g}/\text{kg}$ , 反映其在环境中赋存广泛; 而典型长链污染物 PFOS 同样具有较高检出率, 为 51.14%, 且浓度最高 ( $< 0.15 \sim 9.80 \mu\text{g}/\text{kg}$ ), 提示其因历史使用持续在生物体内蓄积。其他中长链

表 1 PFAS 各单体的定量离子对及对应的碰撞能量  
Table 1 Characteristic ion pairs and corresponding collision energies for PFAS monomers

| 化合物名称                           | 特征性离子对        |               | 碰撞电压(V) |
|---------------------------------|---------------|---------------|---------|
|                                 | 前体离子<br>(m/z) | 产物离子<br>(m/z) |         |
| N- 乙基全氟辛烷磺酰胺乙酸<br>(N-ETFOSAA)   | 584.0         | 418.8         | 22      |
| N- 甲基全氟辛烷磺酰胺乙酸<br>(N-MEFOSAA)   | 570.0         | 419.0         | 16      |
| 全氟丁酸(PFBA)                      | 213.0         | 169.0         | 8       |
| 全氟丁烷磺酸(PFBS)                    | 298.9         | 79.9          | 26      |
| 全氟癸酸(PFDA)                      | 512.9         | 468.9         | 10      |
| 全氟十二酸(PFDoA)                    | 612.9         | 568.9         | 12      |
| 全氟十二磺酸钠(PFDOS)                  | 699.0         | 80.0          | 30      |
| 全氟癸烷磺酸(PFDS)                    | 598.9         | 79.9          | 52      |
| 全氟庚酸(PFH <sub>p</sub> A)        | 362.9         | 318.9         | 10      |
| 全氟庚烷磺酸(PFH <sub>p</sub> S)      | 448.9         | 79.9          | 28      |
| 全氟己酸(PFH <sub>x</sub> A)        | 312.9         | 268.9         | 10      |
| 全氟十六烷酸(PFH <sub>x</sub> DA)     | 812.9         | 768.9         | 14      |
| 全氟己烷磺酸(PFH <sub>x</sub> S)      | 398.9         | 79.9          | 36      |
| 全氟壬酸(PFNA)                      | 462.9         | 418.9         | 10      |
| 全氟壬烷磺酸(PFNS)                    | 548.5         | 79.8          | 48      |
| 全氟辛酸(PFOA)                      | 412.9         | 368.9         | 10      |
| 全氟十八酸(PFODA)                    | 912.9         | 868.9         | 14      |
| 全氟辛烷磺酸(PFOS)                    | 498.9         | 79.9          | 42      |
| 全氟戊酸(PFPeA)                     | 262.9         | 218.9         | 8       |
| 全氟戊烷磺酸(PFPeS)                   | 348.6         | 79.9          | 28      |
| 全氟十四烷酸(PFTeDA)                  | 712.9         | 618.9         | 12      |
| 全氟十三酸(PFT <sub>r</sub> DA)      | 662.9         | 618.9         | 10      |
| 全氟十一烷酸(PFU <sub>d</sub> A)      | 562.9         | 518.9         | 10      |
| 6:2 氯代多氟烷基醚磺酸盐(6:2<br>CL-PFESA) | 530.9         | 82.9          | 34      |
| 8:2 氯代多氟烷基醚磺酸盐(8:2<br>CL-PFESA) | 630.9         | 82.9          | 28      |

化合物如全氟壬酸、全氟丁酸等检出率较低(≤9.09%),但个别样本中浓度水平仍较高,如全氟壬酸最高达 7.50 μg/kg,可能指向局部点源污染或特定暴露途径。此外,新兴短链替代物如 PFPeA (检出率 14.77%,最高浓度 1.86 μg/kg)也已检出,表明其环境释放逐渐增多。综上,PFOS 与全氟丁酸在检出率与浓度上均显著高于其他单体,可视为本研究区域羊肉及其副产品的主要 PFAS 污染物,其中 PFOS 的高浓度与其强生物蓄积性有关,而全氟丁酸的广泛检出则可能与短链替代品的环境释放增加相关。与既有研究<sup>[10-12]</sup>对比,本研究 PFOS 浓度范围与国内外报道相近,但全氟丁酸检出率高于早期文献,暗示短链 PFAS 的环境赋存趋势正在上升。值得关注的是,部分样本中 PFOS 浓度已接近欧盟针对肉类的推荐限值,提示存在一定食品安全风险。需指出的是,本研究样本均来

自同一区域,未覆盖不同养殖环境与地理来源的差异,且受限饲料、饮水及环境介质数据的缺乏,结果主要侧重于污染现状描述,污染源解析与传递途径有待结合多介质调查进一步开展。

2.3 羊肉及其副产品中 PFAS 的污染特征 本研究共采集羊肉和 6 只羊的内脏组织对 PFAS 含量进行检测,不同组织的 PFAS 检出率及含量构成存在差异。具体结果见表 3、图 2 和 3。羊肝样品中 PFAS 的检出率最高,为 100%,羊肉中 PFAS 的检出率最低,为 37.5%,其他内脏中均有不同程度的检出。总 PFAS 检出含量最高的样品来源于羊肝,最高含量为 17.58 μg/kg,其余样品由高到低依次为羊大肠>养肾>羊肺>羊肚>羊心>羊肉,羊肝中总 PFAS 含量明显高于其他组织,由此说明羊肝中 PFAS 污染情况相较于其他组织更严重<sup>[13]</sup>。

表 2 羊肉及其副产品中 14 种 PFAS 检出范围及检出率  
Table 2 Detection range and detection rate of 14 PFAS in mutton and its by-products

| PFAS    | 检出范围(μg/kg)   | 检出率(%) |
|---------|---------------|--------|
| PFBA    | <0.60 ~ 8.96  | 51.14  |
| PFPeA   | <0.60 ~ 1.86  | 14.77  |
| PFHXA   | <0.30 ~ 0.58  | 7.95   |
| PFHPA   | <0.30 ~ 0.58  | 6.82   |
| PFOA    | <0.30 ~ 3.04  | 6.82   |
| PFNA    | <0.30 ~ 7.50  | 9.09   |
| PFDA    | <0.30 ~ 0.56  | 2.27   |
| PFDOA   | <0.30 ~ 0.73  | 2.27   |
| PFTEDA  | <0.30 ~ 0.45  | 1.37   |
| PFODA   | <0.30 ~ 0.85  | 6.82   |
| PFPES   | <0.30 ~ 0.52  | 1.37   |
| PFOS    | <0.30 ~ 9.80  | 51.14  |
| PFNS    | <0.30 ~ 9.09  | 30.68  |
| PFDOS   | <0.30 ~ 0.31  | 1.37   |
| PFAS 总量 | <4.80 ~ 17.58 | 79.54  |

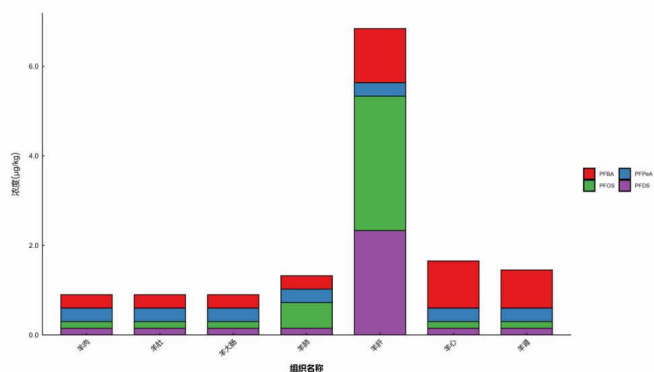
注:化合物名称见表 1。

表 3 羊肉及其副产品中 PFAS 含量  
Table 3 PFAS content in mutton and its by-products

| 样品       | 总 PFAS 检出范围(μg/kg) | 检出率(%) |
|----------|--------------------|--------|
| 羊肉(n=8)  | <2.40 ~ 6.31       | 37.50  |
| 羊肚(n=9)  | <2.40 ~ 9.54       | 66.67  |
| 羊大肠(n=9) | <2.40 ~ 11.78      | 66.67  |
| 羊肺(n=9)  | <2.40 ~ 10.18      | 88.89  |
| 羊肝(n=33) | <2.40 ~ 17.58      | 100.00 |
| 羊心(n=11) | <2.40 ~ 8.70       | 72.73  |
| 养肾(n=9)  | <2.40 ~ 10.30      | 66.67  |

在 PFAS 中,检出最多的单体为全氟丁酸、全氟戊酸、PFOS 和 PFDS。全氟丁酸在所有组织中均有不同程度的检出,且检出率最高。羊肝中 PFOS 和 PFDS 的检出率远高于其他组织,这与文献<sup>[14-22]</sup>的报道相

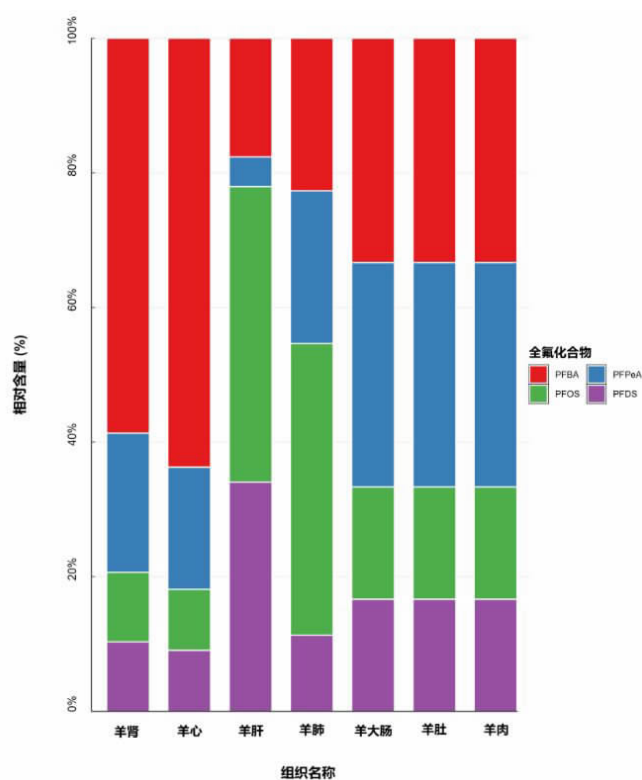
符,进一步证实了 PFAS 在肝脏中的蓄积特性,这可能是由于 PFAS 的结合靶点更多,因此 PFAS 大量蓄积于肝脏中。不同组织中总 PFAS 的检出含量及单体构成有显著差异,肝脏中总 PFAS 的含量明显高于其他组织,检出率也最高。同样表明 PFAS 主要蓄积于肝脏中。羊肝、羊肾、羊心、羊大肠、羊肺、羊肚、羊肉分别检出 11、7、5、5、4、4 和 2 种 PFAS, 表明不同 PFAS 单体在内脏组织中的分布不同,与 Cheng Y 等<sup>[15]</sup>的研究结果一致。



注:仅显示中位数浓度>0.15 μg/kg 的化合物。

图 2 羊肉及其副产品中 PFAS 含量

Figure 2 PFAS content in mutton and its by-products



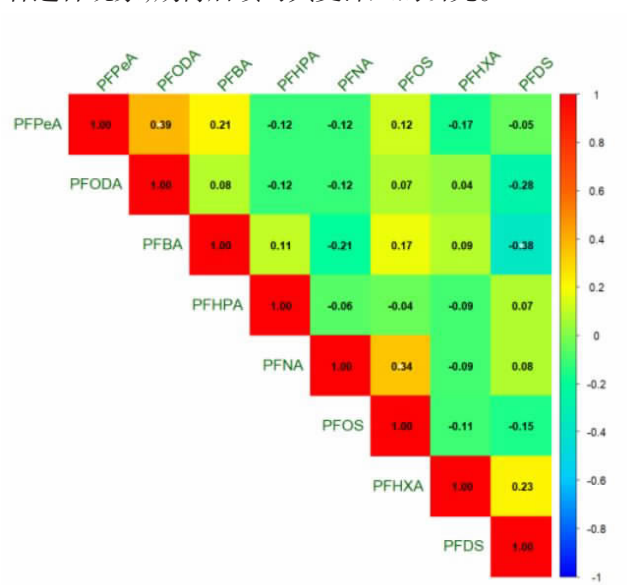
注:仅显示中位数浓度>0.15 μg/kg 的化合物。

图 3 羊肉及其副产品中 PFAS 含量构成比

Figure 3 Composition ratio of PFAS in mutton and its by-products

## 2.4 羊肝中 PFAS 含量的相关性分析 由于本研究

受样本采集的限制,羊肝的样本数量较大并且 PFAS 的检出率相对较高,因此本研究选择对羊肝中检出率比较高的 8 种 PFAS 单体,两两之间进行相关性分析,计算斯皮尔曼等级相关系数 (Spearman rank correlation coefficient)。统计分析使用 R 语言 (版本 4.5.2)完成,并借助 corplot 和 ggplot2 包绘制了相关性热图,见图 4。全氟十八酸、全氟己酸、PFOS、PFDS、全氟癸烷磺酸的主要用于表面活性剂<sup>[16]</sup>。因此可以说这些物质两两之间存在一定的关联性的原因是可能来源于相同的污染源,值得注意的是全氟丁酸和 PFDS 之间存在一定的负相关性,这在本研究中是首次发现,由于受样本数量和检出率的影响暂时无法解释这种现象,期待后续对其更深入的研究。



注:化合物名称见表 1。

图 4 羊肝中 PFAS 含量相关系数

Figure 4 Correlation coefficients of PFAS content in sheep liver

2.5 膳食风险评估 膳食暴露是人体接触 PFAS 的重要途径,其中动物源性食品的摄入是主要暴露方式<sup>[17-18]</sup>。随着经济水平的持续提升,羊肉等畜肉消费量也呈现逐年增长趋势。由于羊肉脂肪含量较低,日益受到消费者青睐。因此,为明确通过食用羊肉及其副产品所带来的健康效应,本研究针对该类食品开展膳食暴露评估与风险评估。鉴于当前统计年鉴资料中未对羊肉消费量进行详细区分,对于羊肚、羊心、羊肾、羊肺、羊大肠及羊肝这 6 类副产物,其日均摄入量计算均参照羊肉的消费量数据进行估算。在此假设条件下,成人与儿童通过食用上述样品摄入 PFAS 的 EDI 范围如表 4 所示,分别为  $5.96 \times 10^{-5} \sim 6.50 \times 10^{-4} \mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{d})$  和  $1.44 \times 10^{-4} \sim 1.57 \times 10^{-3} \mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ , EDI 最大的组织是羊肝,最小的是羊肉、羊大肠和羊肚。羊肝的 EDI 明显高于其他组织。在 7 种组织中全氟丁酸对 EDI 的贡献最大。因此,EDI 的差异性与不同组

织中 PFAS 的含量直接相关<sup>[19]</sup>。

评估结果显示,所检 7 类组织中全氟丁酸、PFOS 及 PFDS 的 *HR* 均低于 1,结果见图 5,表明在当前膳食摄入水平下,兰州市售羊肉及其副产物中的 PFAS 对一般人群不构成明显的健康风险。然而,各组织中 *HR* 值最高者为羊肝中的 PFOS,且儿童的 *HR* 约为成人的 2.4 倍。这一差异主要归因于儿童体重较轻,单

位体重的暴露量相对较高,使其对污染物的健康效应更为敏感。尽管总体风险可控,羊肝作为污染物易蓄积的组织,其潜在风险仍需引起重视。对于经常食用羊杂(尤其是肝脏)的特定消费人群,长期摄入可能带来累积性健康影响。建议后续研究加强对高消费人群的暴露评估,并开展针对肝源性 PFAS 的针对性监测,为食品安全管理与风险交流提供科学依据<sup>[20-21]</sup>。

表 4 PFAS 在羊肉及其副产品中的 EDI [ $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{d})$ ]

Table 4 EDI of PFAS in mutton and its by-products [ $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{d})$ ]

| PFAS    | 羊大肠                   | 羊心                    | 羊肉                    | 羊肚                    | 羊肝                    | 羊肺                    | 羊肾                    |
|---------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 成人      |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| 全氟丁酸    | $2.98 \times 10^{-5}$ | $1.05 \times 10^{-4}$ | $2.98 \times 10^{-5}$ | $2.98 \times 10^{-5}$ | $1.20 \times 10^{-4}$ | $2.98 \times 10^{-5}$ | $8.46 \times 10^{-5}$ |
| PFOS    | $1.49 \times 10^{-5}$ | $1.49 \times 10^{-5}$ | $1.49 \times 10^{-5}$ | $1.49 \times 10^{-5}$ | $2.98 \times 10^{-4}$ | $5.70 \times 10^{-5}$ | $1.49 \times 10^{-5}$ |
| PFDS    | $1.49 \times 10^{-5}$ | $1.49 \times 10^{-5}$ | $1.49 \times 10^{-5}$ | $1.49 \times 10^{-5}$ | $2.32 \times 10^{-4}$ | $1.49 \times 10^{-5}$ | $1.49 \times 10^{-5}$ |
| 总 PFAS  | $5.96 \times 10^{-5}$ | $1.35 \times 10^{-4}$ | $5.96 \times 10^{-5}$ | $5.96 \times 10^{-5}$ | $6.50 \times 10^{-4}$ | $1.02 \times 10^{-4}$ | $1.14 \times 10^{-4}$ |
| 儿童 PFAS |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| 全氟丁酸    | $7.20 \times 10^{-5}$ | $2.53 \times 10^{-4}$ | $7.20 \times 10^{-5}$ | $7.20 \times 10^{-5}$ | $2.90 \times 10^{-4}$ | $7.20 \times 10^{-5}$ | $2.04 \times 10^{-4}$ |
| PFOS    | $3.60 \times 10^{-5}$ | $3.60 \times 10^{-5}$ | $3.60 \times 10^{-5}$ | $3.60 \times 10^{-5}$ | $7.20 \times 10^{-4}$ | $1.38 \times 10^{-4}$ | $3.60 \times 10^{-5}$ |
| PFDS    | $3.60 \times 10^{-5}$ | $3.60 \times 10^{-5}$ | $3.60 \times 10^{-5}$ | $3.60 \times 10^{-5}$ | $5.59 \times 10^{-4}$ | $3.60 \times 10^{-5}$ | $3.60 \times 10^{-5}$ |
| 总 PFAS  | $1.44 \times 10^{-4}$ | $3.25 \times 10^{-4}$ | $1.44 \times 10^{-4}$ | $1.44 \times 10^{-4}$ | $1.57 \times 10^{-3}$ | $2.46 \times 10^{-4}$ | $2.76 \times 10^{-4}$ |

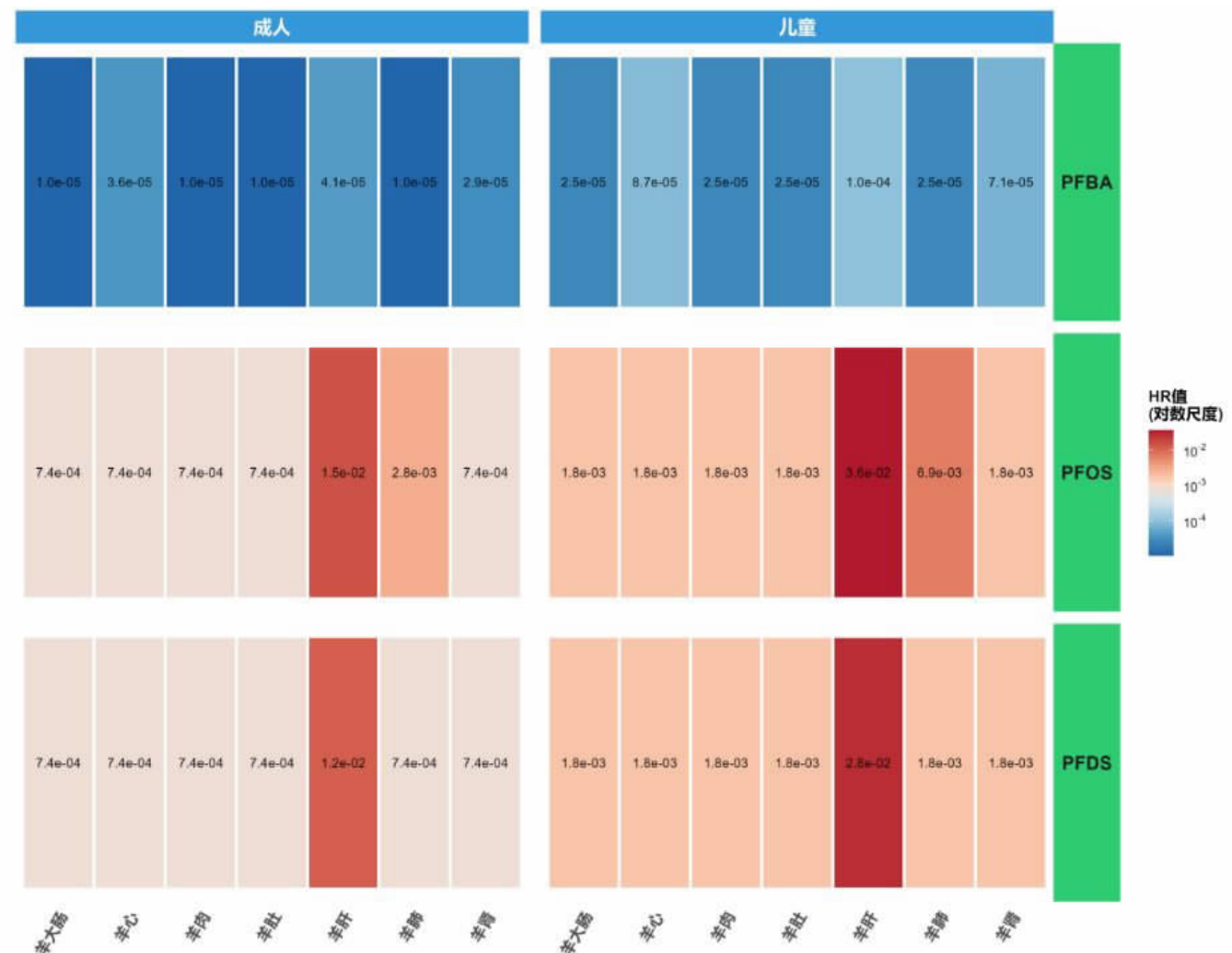


图 5 成人和儿童的 *HR*

Figure 5 Hazard ratios for adults and children

### 3 结 论

本研究对兰州市售羊肉及羊副产品中 PFAS 的污染状况及其经膳食摄入的健康风险进行了系统分析。结果表明,PFAS 在当地市售样品中普遍检出,总体检出率达 79.54%, 其中羊肝为 PFAS 的主要蓄积部位, 全氟丁酸与 PFOS 是检出率和浓度较高的单体。膳食风险评估显示,在常规消费模式下,所有受检组织中全氟丁酸、PFOS 及 PFDS 的 *HR* 均低于 1, 一般人群通过摄入此类食品所面临的健康风险总体处于可接受范围。然而,羊肝中 PFOS 的 *HR* 值显著高于其他组织,且儿童由于单位体重暴露量较高,其 *HR* 约为成人的 2.4 倍, 儿童及经常食用动物内脏的特定消费群体具有更高的潜在暴露风险。因此在今后的研究中建议进一步开展污染来源解析,并加强对高风险食品及敏感人群的监测与膳食指导,以保障食品安全与公众健康。

由于受样本数量、检测水平和统计学方法及作者水平的影响,本研究得出的结论可能存在一定的局限性和不确定性,期待相关学者对其进行更深入的研究。

**利益冲突声明** 本研究不存在任何利益冲突

### 参考文献

- [1] 符文卓,朱泽婷,屠嘉欣,等. 我国食品全氟化合物的污染及人群膳食暴露风险评估研究进展[J]. 环境与职业医学, 2025, 42(1): 30-37.  
Fu WZ, Zhu ZT, Tu JX, et al. Research progress on perfluorinated compounds contamination in food and dietary exposure risk assessment in China [J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2025, 42(1): 30-37.(In Chinese)
- [2] 张妍,冒丹丹,潘奕陶,等. 上海市 16 区县水产品全氟和多氟烷基物质污染及膳食暴露评估[J]. , 2025, 42(1): 6-13.  
Zhang Y, Mao DD, Pan YT, et al. Contamination of per- and polyfluoroalkyl substances in aquatic products and dietary exposure assessment in 16 districts/counties of Shanghai [J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2025, 42(1): 6-13.(In Chinese)
- [3] 黄洁慧,郭文景,于晓宁,等. 中国部分地表水体中 5 种全氟化合物的暴露特征与生态风险[J]. 水生态学杂志, 2023, 44(5): 133-141.  
Huang JH, Guo WJ, Yu XN, et al. Exposure and ecological risk of five PFCs in Some surface waters of China [J]. Journal of Hydroecology, 2023, 44(5): 133-141.(In Chinese)
- [4] 王戈慧. 新疆地区牛羊肉类及肝脏中 PFAAs 的污染分布特征与摄入风险评估[D]. 石河子:石河子大学, 2018.  
Wang GH. Contamination distribution characteristics and intake risk assessment of PFAAs in beef and mutton in Xinjiang region [D]. Shihezi: Shihezi University, 2018.(In Chinese)
- [5] 白润叶. 中国部分主产区鸡肉和羊肉中全氟化合物残留水平调查[D]. 深圳:深圳大学, 2016.  
Bai RY. Investigation of perfluorinated compounds residue levels in chicken and mutton from some major producing areas in China [D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2016.(In Chinese)
- [6] 国家统计局. 中国统计年鉴 2024[M]. 北京:中国统计出版社, 2024.  
National Bureau of Statistics of China. China Statistical Yearbook 2024[M]. Beijing: China Statistics Press, 2024.(In Chinese)
- [7] 赵秀阁,段小丽. 中国人群暴露参数手册(成人卷)概要[M]. 北京:中国环境出版社, 2014.  
Zhao XG, Duan XL. Highlights of the Chinese exposure factors handbook (adults)[M]. Beijing: Ministry of Environmental Protection, 2014.(In Chinese)
- [8] 段小丽, 赵秀阁. 中国人群暴露参数手册 (儿童卷 6-17 岁) [M]. 北京:环境保护部, 2016.  
Duan XL, Zhao XG. Exposure factors handbook of Chinese Population (Children Aged 6 - 17) [M]. Beijing: Ministry of Environmental Protection, 2016.(In Chinese)
- [9] Sun QP, Bi R, Wang TY, et al. Are there risks induced by novel and legacy poly- and perfluoroalkyl substances in coastal aquaculture base in South China? [J]. Science of the Total Environment, 2021, 779: 146539.
- [10] 李彤,王宇,吴限好,等. 上海某社区老年人全氟和多氟烷基化合物摄入暴露风险评估[J]. 生态毒理学报, 2024, 19(4): 182-193.  
Li T, Wang Y, Wu XH, et al. Risk assessment of ingestion exposure to per- and poly-fluoroalkyl sub-stances among elderly People in a community in Shanghai [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2024, 19(4): 182-193.(In Chinese)
- [11] 陈海川,曹文成,刘小方,等. 母乳中全氟及多氟烷基化合物污染水平及婴儿暴露风险评估[J]. 色谱, 2024, 42(2): 211-216.  
Chen HC, Cao WC, Liu XF, et al. Contamination levels of perfluorinated and polyfluoroalkyl compounds in breast milk and assessment of their exposure risk to infants [J]. Chinese Journal of Chromatography, 2024, 42(2): 211-216.(In Chinese)
- [12] 崔建升,杨瑞,于玉洁,等. 人血清中全氟和多氟烷基化合物及典型异构体的暴露特征与健康风险评估 [J]. 环境科学学报, 2024, 44(2): 432-440.  
Cui JS, Yang R, Yu YJ, et al. Exposure characteristics and health risk assessment of per- and polyfluoroalkyl substances and their typical isomers in human serum [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2024, 44(2): 432-440.(In Chinese)
- [13] 王帆,吴婧,庄意如,等. 超高效液相色谱-串联质谱法测定大气中 18 种全氟和多氟烷基化合物[J]. 分析化学, 2023, 51(8): 1371-1380.  
Wang F, Wu J, Zhuang YR, et al. Determination of 18 kinds of per- and polyfluoroalkyl substances in atmosphere by ultra performance liquid Chromatography-Tandem mass spectrometry [J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2023, 51(8): 1371-1380.(In Chinese)
- [14] 张思维. 兰州市售畜肉及其副产品中 PFCs 污染情况调查与健康风险评估[D]. 兰州:甘肃中医药大学, 2024.  
Zhang SW. Investigation of PFCs contamination in commercially available livestock meat and by-products in Lanzhou and health risk assessment [D]. Lanzhou: Gansu University of Chinese Medicine, 2024.(In Chinese)
- [15] Cheng Y, Gao XN, Liu D, et al. PFAS in animal by-products in Lanzhou, China, and health risk assessment [J]. Food Addit Contam Part B Surveill, 2025, 18(4): 330-342.

- [16] 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.
- [17] 张梅如,姚嘉晖,宋瑞,等. 上海市徐汇区孕妇全氟化合物膳食暴露水平及其与围产期不良事件的关系[J]. 2023,40(7):796-804. Zhang MR, Yao JH, Song R, et al. Dietary exposure levels of perfluorinated compounds in pregnant women in Xuhui District, Shanghai and their association with adverse perinatal events [J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2023, 40(7): 796-804.(In Chinese)
- [18] 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 SH, Zhu HX, Ye ZX, et al. Pollution characteristics and exposure risk assessment of perfluoroalkyl substances in road dust, Chengdu [J]. Environmental Science, 2019, 40 (12): 5265-5271.(In Chinese)
- [19] 刘俊丽,陈琳琳,李媛媛,等. 渤海湾滨州海域海产品中全氟及多氟烷基化合物特征分布及膳食风险评估[J]. 食品安全质量检测学报,2026,17(1):324-332. Liu JL, Chen LL, Li YY, et al. Distribution characteristics and dietary risk assessment of per- and polyfluoroalkyl substances in the seafood of Bohai Bay Binzhou Area [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(1): 324-332.(In Chinese)
- [20] 孟宪双,刘艺静,郭兴洲,等. 口罩中 63 种化学有害物质的靶向筛查及风险评估[J]. 分析化学,2024,52(7):1004-1011. Meng XS, Liu YJ, Guo XZ, et al. Target screening and preliminary risk assessment of 63 kinds of chemical hazardous substances in face masks [J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2024, 52 (7): 1004-1011.(In Chinese)
- [21] 涂祥婷,杨鸿波,郭峰,等. 超高效液相色谱-高分辨质谱法同时测定鱼肉中 16 种全氟烷基化合物 [J]. 分析化学,2021,49(4):528-537. Tu XT, Yang HB, Guo F, et al. Simultaneous determination of 16 kinds of perfluoroalkyl substances in fish muscle by ultra high performance liquid Chromatography-High resolution mass spectrometry [J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2021, 49 (4): 528-537.(In Chinese)
- [22] 程妍,张思维,高向娜,等. 市售猪肉及猪副产品中全氟化合物污染情况分析与健康风险评估[J]. 肉类研究,2025,39(9):62-68. Cheng Y, Zhang SW, Gao XN, et al. Pollution analysis and health risk assessment of perfluorinated compounds in commercially available pork and its by-products [J]. Meat Research, 2025, 39(9): 62-68.(In Chinese)

收稿日期:2026-02-03

## (上接第 2318 页)

- prevention and treatment of diabetes (2024 edition)[J]. Journal of Chongqing Medical University, 2025, 7: 1-8.
- [9] Sun H, Saeedi PY, Karuranga S, et al. IDF diabetes Atlas: global, regional and country-level diabetes prevalence estimates for 2021 and projections for 2045[J]. Diabetes Research and Clinical Practice, 2022, 183: 109119.
- [10] Jia WP, Chan JC, Wong TY, et al. Diabetes in China: epidemiology, pathophysiology and multi-omics[J]. Nature Metabolism, 2025, 7(1): 16-34.
- [11] Dubey P, Thakur V, Chattopadhyay M. Role of minerals and trace elements in diabetes and insulin resistance [J]. Nutrients, 2020, 12 (6): 1864.
- [12] Chen L. Effect of trace elements and nutrients on diabetes and its complications: a Mendelian randomization study [J]. Front Nutr, 2024, 11: 1439217.
- [13] Bashandy SAE, Mostafa RE, El-Baset MA, et al. Zinc sulphate attenuates metabolic dysfunctions induced by olanzapine via the reduction of insulin resistance, hepatic oxidative stress, and inflammation in albino rats [J]. BMC Pharmacology and Toxicology, 2025, 26(1): 84.
- [14] Feng JA, Wang HY, Jing Z, et al. Relationships of the trace elements Zinc and Magnesium with diabetic Nephropathy-Associated renal functional damage in patients with type 2 diabetes mellitus [J]. Front Med (Lausanne), 2021, 8: 626909.
- [15] Gembillo G, Labbozzetta V, Giuffrida AE, et al. Potential role of Copper in diabetes and diabetic kidney disease [J]. Metabolites, 2022, 13(1): 17.
- [16] Darroudi S, Saberi-Karimian M, Tayefi M, et al. Association between hypertension in healthy participants and Zinc and Copper status: a Population-Based study [J]. Biological Trace Element Research, 2019, 190(1): 38-44.
- [17] Ma SZ, Sun QQ, Xu YQ, et al. Identification of risk factors for diabetes in Chinese middle-aged and elderly adults [J]. Scientific Reports, 2025, 15(1): 12550.
- [18] Malik VS, Hu FB. The role of sugar-sweetened beverages in the global epidemics of obesity and chronic diseases [J]. Nature Reviews Endocrinology, 2022, 18(4): 205-218.
- [19] Ferrari A, Tontonoz P. Nonvesicular cholesterol transport in physiology[J]. Journal of Clinical Investigation, 2025, 135(6): e188127.
- [20] Lu S, Kuang MB, Qiu JJ, et al. Lipids as the Link between central obesity and diabetes: perspectives from mediation analysis [J]. BMC Endocrine Disorders, 2024, 24(1): 229.
- [21] Cheng Z, Kong Y, Yang W, et al. Association between serum Copper and blood glucose: a mediation analysis of inflammation indicators in the NHANES(2011-2016)[J]. Front Public Health, 2024, 12: 1401347.
- [22] Yang Z, Su W, Wei XY, et al. Hypoxia inducible factor-1 $\alpha$  drives cancer resistance to cuproptosis [J]. Cancer Cell, 2025, 43 (5): 937-954.e9.
- [23] Chillon TS, Tuchenhagen M, Schwarz M, et al. Determination of Copper status by five biomarkers in serum of healthy women [J]. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology, 2024, 84: 127441.
- [24] Chen X, Qi X. The role of metal ion metabolism in the pathogenesis of diabetes and associated complications[J]. Frontiers in Endocrinology, 2025, 16: 1541809.
- [25] Chang W, Li P. Copper and diabetes: current research and prospect [J]. Mol Nutr Food Res, 2023, 67(23): e2300468.(In Chinese)
- [26] Li YC, Han LF, Hu HL. Research progress on cuproptosis and Copper related anti-tumor therapy[J]. Hormones & Cancer, 2025, 16 (1): 584.

收稿日期:2025-07-12