

食品接触材料中全氟化合物的迁移规律研究

刘征辉¹, 周 茜², 魏静娜³, 王亚旭², 赵琳琳³, 赵云平³, 薛天凯¹, 黄 迪¹, 赵 文^{2*}

(1. 天津市农业质量标准与检测技术研究所, 天津 300381; 2. 河北农业大学, 保定 071000;
3. 天津海世达检测技术有限公司, 天津 300381)

摘 要: **目的** 研究全氟化合物从食品接触材料到食品模拟物中的迁移规律。**方法** 根据全氟化合物制品在日常生活中的使用情况, 选择 4 个品牌的纸杯和 3 个品牌的包装袋进行了试验, 以全氟辛酸、全氟辛烷磺酸等研究对象, 参考食品接触材料及制品迁移试验通则的具体要求, 采用不同食品模拟物、不同操作方式、不同保存时间和温度等因素考察对全氟新烷磺酸、全氟辛酸的迁移量和迁移规律的影响。目标化合物通过 C₁₈ 色谱柱进行分离, 以乙腈-5 mmol/L 的乙酸铵为流动相进行梯度洗脱; 流速 0.2 mL/min; 柱温为 30 °C; 进样量 1 μL, 由三重四级杆质谱进行定性和定量分析。**结果** 数据显示在模拟物为食用油时 PFOA 的迁移量是最大的, 超过 0.01 ng/cm²; 其他情况 PFOA 的溶出量都低于 0.002 ng/cm²; PFOS 的溶出量均较少, 低于 0.002 ng/cm²。**结论** 初步得到食品接触材料中典型全氟化合物的迁移规律基础数据, 说明无论是何种品牌的纸杯或是包装袋, 接触食物均会产生 PFOA 和 PFOS 的微量溶出, 经过膳食暴露可能会引起健康危害。

关键词: 全氟化合物; 食品接触材料; 全氟新烷磺酸; 全氟辛酸; 迁移规律; 膳食暴露

Study on the migration of perfluorinated compounds in food contact materials

LIU Zheng-Hui¹, ZHOU Qian², WEI Jing-Na³, WANG Ya-Xu², ZHAO Lin-Lin³, ZHAO Yun-Ping³,
XUE Tian-Kai¹, HUANG Di¹, ZHAO Wen^{2*}

(1. Tianjin Agricultural Quality Standards and Testing Technology Research Institute, Tianjin 300381, China;
2. Agricultural University of Hebei Province, Baoding 071000, China; 3. Tianjin High-standard Quality Testing Lab.,
Tianjin 300381, China)

ABSTRACT: Objective To study the migration of perfluorinated compounds from food contact materials to food simulants. **Methods** According to the use of perfluorochemical products in daily life, 4 brands of paper cups and 3 brands of package bags were selected for testing. Perfluorooctanoic acid and perfluorooctane sulfonic acid were taken as the research objects, and the specific requirements of the general rules for the migration of food contact materials and products were referred. The effects of different food simulants, different operation methods, different storage time and temperature on the migration quantity and migration rule of perfluorooctanoic acid and perfluorooctanoic acid were investigated. The target compounds were separated by C₁₈ column and eluted with acetonitrile-5 mmol/L ammonium acetate as the mobile phase, the flow rate was 0.2 mL/min, the column temperature was 30 °C, the injection volume was 1 μL, and the triple quadrupole mass spectrometry was performed for qualitative and

基金项目: 河北省重点研发计划项目(16275504D)、天津农科院院长基金项目(17004)

Fund: Supported by Key Research and Development Program of Hebei Province (16275504D), and Tianjin Academy of Agricultural Sciences President Fund (17004)

*通讯作者: 赵文, 教授, 主要研究方向为食品营养与毒理学。E-mail: zwgyf1964@163.com

*Corresponding author: ZHAO Wen, Professor, Agricultural University of Hebei Province, Baoding 071000, China. E-mail: zwgyf1964@163.com

quantitative analysis. **Results** The data showed that the migration of PFOA was the most when the simulant was edible oil, exceeding 0.01 ng/cm^2 . In other cases, the leaching amount of PFOA was less than 0.002 ng/cm^2 . The leaching amount of PFOS was less than 0.002 ng/cm^2 . **Conclusion** This paper preliminarily obtain the basic data of the migration law of typical perfluorinated compounds in food contact materials, indicating that no matter what brand of paper cups or packaging bags, PFOA and PFOS microdissolution could be generated after food contact, and the dietary exposure might cause health hazards.

KEY WORDS: perfluorinated compound; food contact material; perfluoronova alkane sulfonic acid; perfluorooctanoic acid; migration rule; dietary exposure

1 引言

全氟化合物(Perfluorinated compounds, PFCs)是一种新型持久性有机污染物,由 4~14 个碳原子烷基链为基本骨架,其中氢原子全部被氟原子取代并带有不同功能基团的一系列化合物^[1,2]。因其具有良好表面活性、化学稳定性、疏水、疏油等特性,被广泛应用于工业生产、生活用品、食物接触材料中等领域中^[3-5]。

2001 年,美国环境保护署(United States Environmental Protection Agency, EPA)提出停止 PFOS 的生产和使用的相关声明;2005 年,美国环境保护署将 PFOA 列为“可能”或“疑似”致癌物质。2009 年,联合国环境规划署正式将全氟辛酸、全氟辛酸盐及全氟辛基磺酰氟等列入新型持久性有机污染物,同意减少并最终禁止使用该类物质^[6]。2016 年,美国 FDA 在联邦公报上发布一条对食品和药品的修正规则,规则中的食品可接触材料方面禁止使用了 3 种全氟化合物;同年,美国环境保护署提出要求全氟化合物零排放。由于近年来食品接触材料中频繁检出全氟化合物的存在,使其对人体健康的影响受到全社会的普遍关注,引起世界各国决策者和科学家的高度重视^[7-11]。

由于全氟化合物(PFCs)的分散行为比较特殊,当它和水以及碳氢化合物混合时,会形成三层分离相,也意味着这类物质具有一种疏水疏油的性质,可被广泛应用于纺织、造纸、包装、农药、地毯、皮革、装潢、聚合物添加剂、表面活性剂及灭火泡沫等各个领域。而我国目前对于食品接触材料中可检出的全氟化合物种类很多,包括全氟辛酸、全氟壬酸、全氟十碳羧酸、全氟十二碳羧酸、全氟辛磺酸^[12-15],同时我国对全氟化合物的相关研究起步相对较晚,我国现行标准中只规定了全氟烷基丙烯酸酯共聚物一种材料,且无迁移量和残留量限制,没有相应的监管配套措施。

本研究对全氟化合物的迁移规律进行研究,为我国建立食品接触材料中全氟化合物的迁移限量标准提出建议,同时为我国未来食品接触材料中全氟化合物的监管服务提供技术支撑。

2 材料与方法

2.1 仪器材料

Acquity I-class/Xevo TQ-S 三重四级杆液质联用仪,配备电喷雾离子源(ESI)以及 Masslynx4.1 数据采集软件(美国 Waters 公司); Waters BEH C₁₈ 色谱柱(2.1 mm×100 mm, 1.7 μm); Heuzbad Hei-VAP 旋转蒸发仪一体机(德国 Heidolph 公司); H1850 台式高速离心机(湖南湘仪离心机仪器有限公司); TLL-DC II 型氮吹仪(姚仪公司); QL-901 Vortex 涡旋器(海门市其林贝尔仪器制造有限公司)。

全氟辛酸铵(perfluorooctanoic acid ammonium salt, PFOA, CAS 335-67-1, 纯度 95.5%)、全氟辛烷磺酸盐(PFOS, CAS 2795-39-3, 纯度 98.5%)(德国 Dr.Enrenstorfer GmbH 公司); 乙腈(色谱纯, 美国 Fisher 公司); Greole WAX 固相萃取小柱(150 mg/6 mL, 天津欧姆尼基因科技有限公司)。

标准溶液的制备:精密称取标准物质 PFOA 5.03 mg、PFOS 5.09 mg, 加甲醇 50 mL 分别制成每 1 mL 含 PFOA、PFOS 分别为 96.07、100.27 $\mu\text{g/mL}$ 的溶液,作为标准储备液;稀释得到每 1 mL 含 PFOA、PFOS 分别为 0.96、1.00 $\mu\text{g/mL}$ 的溶液,作为标准溶液。 -4°C 冷藏保存。

选择市面上常见的一次性纸杯品牌:妙洁(MJ), 美丽雅(MLY), 洁成(JC), 茶花(CH); 以及包装袋品牌汉堡王(HBW)、老北京鸡肉卷(JRJ)、麦多馅饼(MD)。考虑到包装纸袋均接触油脂类食品,所以只选择玉米油作为模拟物。本试验是在 10 月~12 月期间完成,所以常温温度取平均值 18°C 。

2.2 实验方法

根据 PFOA 和 PFOS 的特性,参考相关文献及技术标准,选择 C₁₈ 色谱柱进行样品的分离,并通过三重四级杆质谱进行定性和定量分析^[16-18]。

2.2.1 一次性纸杯前处理方法

将水, 4%乙酸/水, 10%、20%、50%浓度的乙醇/水混合液在纸杯中放置,按照影响因素处理后,全部转移至平底烧瓶中,再经过固相萃取方法进行净化浓缩。在 37°C 条件下氮吹至干; 1 mL 甲醇复溶后, -20°C 冷冻 24 h 后过膜,

待测。(其中乙醇/水混合液须旋蒸至无醇后再萃取; 4%乙酸溶液须用 5 mol/L NaOH 溶液中和为中性溶液后再萃取)。

2.2.2 一次性包装袋前处理方法

将包装袋全部剪成大约 5 cm×5 cm 的正方形于 100 mL 小烧杯中, 倒入 80 mL 玉米油。按照影响因素处理后, 取 10 mL 提取液置离心管中, 加 10 mL 乙腈, 震荡混匀, 9000 r/min, 离心处理 7 min, 重复 2 次; 旋蒸浓缩至干; 15 mL 水复溶 3 次, 过 SPE 小柱进行萃取; 在 37 °C 条件下氮吹浓缩至干; 0.5 mL 甲醇复溶后, -20 °C 冷冻 24 h 后过膜, 待测。

2.2.3 质谱条件

采用电喷雾离子源, 负离子电离模式, 毛细管电离电压 1.5 kV, 取样锥孔电压 27 V, 离子源温度 150 °C, 脱溶剂温度 400 °C, 脱溶剂氮气流速 900 L/h, 锥孔反吹氮气 150 L/h, 扫描模式为多反应监测 (multiple reaction monitoring, MRM), 采集时间 0~5 min, 扫描时间 0.3 s, 间隔时间 0.02 s, 碰撞电压 50 V, PFOA 选择 m/z 413.07 [$C_7F_{15}COO$] 作为母离子, 定性离子为 m/z 168.85, 定量离子为 m/z 368.95; PFOS 选择 m/z 499.04 [$C_8F_{17}SO_3$] 作为母离子, 定性离子为 m/z 98.78, 定量离子为 m/z 79.77, 通过定量离子可以准确的锁定样品中 PFOA 和 PFOS 的含量。

2.2.4 色谱条件

采用 C_{18} 液相色谱柱: Waters BEH C_{18} (2.1 mm×100 mm, 1.7 μ m); 选择 A: 100%乙腈、B: 5 mmol/L 的乙酸铵作为流动相; 流速 0.2 mL/min; 柱温为 30 °C。混标进样的浓度为 8 ng/mL。选择了 2 个淋洗梯度进行分离, 进样体积 1 μ L。洗脱程序如表 1。

表 1 流动相梯度
Table 1 Mobile phase gradient

时间/min	流速/(mL/min)	A/%	B/%
0	0.2	10	90
2	0.2	60	40
4	0.2	100	0
6	0.2	100	0
8	0.2	10	90
10	0.2	10	90

2.3 迁移试验方案设计

实验室选择 4 个品牌的纸杯和 3 个品牌的包装袋进行了试验, 考察不同食品模拟物、不同操作方式、不同保存时间和温度等因素对 PFOA 和 PFOS 的迁移量和迁移规律的影响。根据这几种接触材料及制品在日常生活中的使用情况, 参考食品接触材料及制品迁移试验通则^[19], 制定了表 2 和表 3 的试验方案。

表 2 中模拟物考虑到酒精饮料及非酒精饮料, 热饮及常温饮料, 迁移试验时间的不同选择进行考虑; 方便面桶

材质与一次性纸杯相似, 所以放在同一表中考虑; 采用植物油做模拟物, 根据 GB 31604.1-2015 所得迁移量乘以校正因子 1/3 即为全氟化合物向食品模拟物中的迁移量。

表 3 中模拟了用包装纸袋盛放表面有油脂及无油脂的各类食品, 根据其使用情况, 设计了表中的试验方案。

表 2 一次性纸杯迁移试验方案
Table 2 Migration test scheme of disposable paper cups

食品模拟物的种类	迁移试验温度/°C	迁移试验时间/h
水	常温	2
4%乙酸/水	常温	2
10%乙醇/水	常温	2
20%乙醇/水	加热 5 min, 放置常温	
50%乙醇/水	常温	2
植物油	常温	0.5

表 3 一次性包装袋迁移试验
Table 3 Migration test of disposable packaging bags

食品模拟物的种类	迁移试验温度/°C	迁移试验时间/h
		4
玉米油(植物油)	4 °C/18 °C	24
		48

3 结果与分析

3.1 PFOA 和 PFOS 混标质谱色谱图

PFOA 和 PFOS 混标质谱色谱图如图 1 所示。

3.2 一次性纸杯模拟迁移试验

对于不同的模拟物, 考虑到数据可靠性, 宜选常规使用的温度和时间。

如表 4 所示, 对比了不同的食物模拟物在纸杯中 PFOA 和 PFOS 的迁移量。数据显示: 在模拟 F(泡面、油炸臭豆腐)和 G(关东煮)时 PFOA 的迁移量是最大的, 超过 0.01 ng/cm²; 其他几种情况 PFOA 的溶出量都较少在 0.002 ng/cm²; PFOS 的溶出量均较少, 低于 0.002 ng/cm²。由此可见, 油脂可促进纸杯中 PFOA 和 PFOS 的溶出, 建议尽量避免长期使用一次性纸杯或纸桶。

3.3 包装袋模拟迁移预试验

3.3.1 时间对迁移量的影响

(1) 在常温下, 油作为模拟物纸袋中 PFOA、PFOS 的迁移量

从表 5 中可以看出, 在常温下(18 °C), 随着时间的增加, PFOA 除 JRJ 的迁移量减少外, 其他 2 个品牌都变化不大; PFOS 的迁移量都有所增加。放置 48 h 后, JRJ 的 PFOS 溶出量是最大的, 其他 2 个品牌迁移量也有小幅度增加。

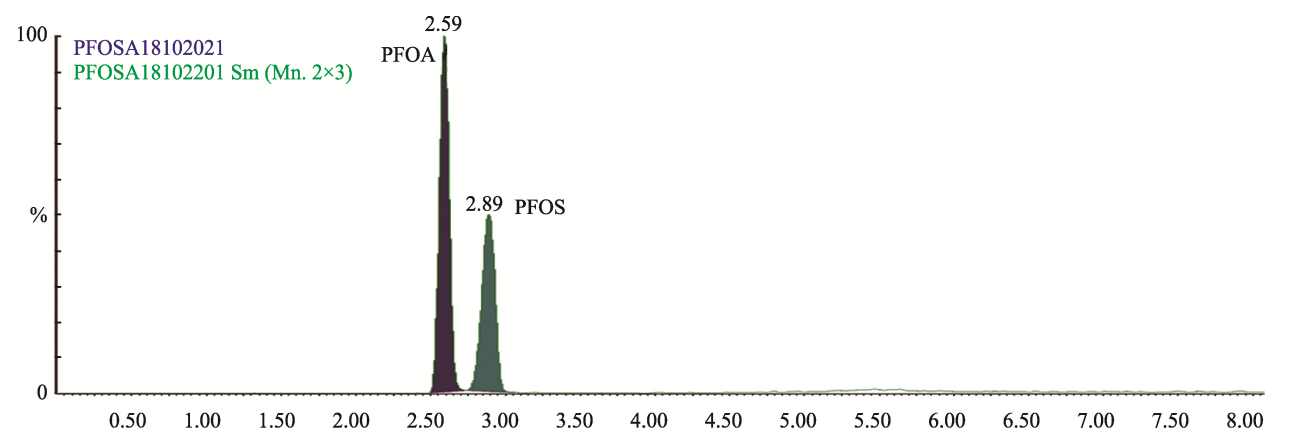


图 1 PFOA 和 PFOS 混标质谱色谱图

Fig.1 Mixed standard mass spectrometry chromatogram of PFOA and PFOS

表 4 不同模拟物下 PFOA、PFOS 的迁移量

Table 4 Migration amounts of PFOA and PFOS under different simulants

模拟物	温度、时间	代表食物	品牌	PFOA/(ng/cm ²)	PFOS/(ng/cm ²)
水	常温 2 h	矿泉水, 纯净水(A)	MJ	1.25×10 ⁻³	ND
			MLY	6.13×10 ⁻⁴	ND
			JC	1.96×10 ⁻⁴	ND
			CH	2.06×10 ⁻⁴	ND
4%乙酸/水	常温 2 h	酸性无酒精饮料(B)	MJ	7.20×0 ⁻⁴	ND
			MLY	4.20×10 ⁻⁴	ND
			JC	6.54×10 ⁻⁴	5.14×10 ⁻⁵
			CH	6.38×10 ⁻⁴	ND
10%乙醇/水	常温 2 h	低酒精性饮料(C)	MJ	1.42×10 ⁻³	ND
			MLY	1.64×10 ⁻³	ND
			JC	9.37×10 ⁻⁴	ND
			CH	1.95×10 ⁻³	ND
20%乙醇/水	加热 5 min, 放置 常温	10% < 乙醇含量 < 20%酒精 性饮料及酒精, 豆浆(D)	MJ	6.32×10 ⁻⁴	ND
			MLY	5.69×10 ⁻⁴	3.88×10 ⁻⁵
			JC	4.35×10 ⁻⁴	ND
			CH	5.90×10 ⁻⁴	ND
50%乙醇/水	常温 2 h	乳及乳制品; 奶油(E)	MJ	3.11×10 ⁻⁴	3.78×10 ⁻⁵
			MLY	2.16×10 ⁻⁴	ND
			JC	5.55×10 ⁻⁴	2.70×10 ⁻⁵
			CH	7.71×10 ⁻⁴	ND
玉米油	常温 0.5 h	泡面, 油炸臭豆腐(F)	MJ	2.84×10 ⁻⁴	2.86×10 ⁻⁴
			MLY	8.66×10 ⁻⁴	1.68×10 ⁻⁴
			JC	7.10×10 ⁻³	7.03×10 ⁻⁴
	常温 0.5 h	关东煮(G)	CH	2.37×10 ⁻²	ND
			MJ	1.71×10 ⁻⁴	1.72×10 ⁻⁴
			MLY	5.20×10 ⁻⁴	1.01×10 ⁻⁴
			JC	4.26×10 ⁻³	4.22×10 ⁻⁴
			CH	1.42×10 ⁻²	ND

注: ND 为未检出。

表 5 油作为模拟物在常温下 PFOA、PFOS 的迁移量
Table 5 Migration of PFOA and PFOS in oil as simulants at room temperature

时间/h	品牌	PFOA/(ng/cm ²)	PFOS/(ng/cm ²)
4	HBW	3.16×10 ⁻⁴	ND
	JRJ	2.71×10 ⁻³	2.19×10 ⁻⁴
	MD	2.53×10 ⁻⁴	ND
24	HBW	2.12×10 ⁻⁴	ND
	JRJ	2.30×10 ⁻³	3.35×10 ⁻⁴
	MD	1.47×10 ⁻⁴	2.48×10 ⁻⁵
48	HBW	1.85×10 ⁻⁴	2.99×10 ⁻⁵
	JRJ	1.02×10 ⁻³	1.32×10 ⁻³
	MD	2.54×10 ⁻⁴	8.46×10 ⁻⁵

注: ND 为未检出。

(2) 在 4℃条件下, 油作为模拟物纸袋中 PFOA、PFOS 的迁移量

根据表 6 可知, 在 4℃的条件下放置, 随着时间的增加, JRJ 和 MD 中 PFOA 是增加的, 其中 JRJ 的迁移量超过 0.01 ng/cm²。在放置了 24 h 时, PFOA 和 PFOS 均无检出; 在放置了 48 h 后, MD 中 PFOS 的迁移量增加。

表 6 油作为模拟物在 4℃下 PFOA、PFOS 的迁移量
Table 6 Oil as the simulation objects under 4℃ PFOA and PFOS traffics

时间/h	品牌	PFOA/(ng/cm ²)	PFOS/(ng/cm ²)
24	HBW	3.25×10 ⁻⁵	2.29×10 ⁻⁵
	JRJ	ND	ND
	MD	ND	ND
48	HBW	ND	ND
	JRJ	9.35×10 ⁻⁴	ND
	MD	1.45×10 ⁻⁴	2.74×10 ⁻⁴

注: ND 为未检出。

3.3.2 温度对迁移量的影响

(1) 油作为模拟物在 18、4℃条件下, 24 h 时纸袋中 PFOA、PFOS 的迁移量

从表 7 可知, 在放置 24 h 时, 18℃条件下, 3 个品牌均有 PFOA 的溶出, 且 JRJ 中溶出量是最大的, 超过 0.002 ng/cm²。除 HBW 外, 其他 2 个品牌都有 PFOS 的溶出, 但溶出量都很少, 低于 0.0004 ng/cm²。在 4℃的条件下只有 JRJ 品牌中 PFOA 和 PFOS 有少量溶出。

(2) 油作为模拟物在 18℃、4℃下, 48 h 时纸袋中 PFOA、PFOS 的迁移量

根据表 8 可知, 在放置 48 h 时, 18℃条件下, 3 个品牌

的 PFOA 和 PFOS 都有溶出, 其中 JRJ 中迁移量最大, PFOA 达到 0.001 ng/cm², PFOS 达到 0.0013 ng/cm; 而在 4℃条件下, HBW 中 PFOA 和 PFOS 均未检出, JRJ 中 PFOA 的迁移与 18℃条件下相差不大, 但未检出 PFOS; MD 中 PFOA 和 PFOS 均有检出, 但检出量均小于 0.0004 ng/cm²。

表 7 油作为模拟物在 24 h 时 PFOA、PFOS 的迁移量
Table 7 migration amount of PFOA and PFOS at 24 h as simulants

温度/℃	品牌	PFOA/(ng/cm ²)	PFOS/(ng/cm ²)
18	HBW	2.12×10 ⁻⁴	ND
	JRJ	2.30×10 ⁻³	3.35×10 ⁻⁴
	MD	1.47×10 ⁻⁴	2.48×10 ⁻⁵
4	JRJ	3.25×10 ⁻⁵	2.29×10 ⁻⁵
	MD	ND	ND
	HBW	ND	ND

注: ND 为未检出。

表 8 油作模拟物在 48 h 时 PFOA、PFOS 的迁移量
Table 8 migration of PFOA and PFOS in oil simulants at 48 h

温度/℃	品牌	PFOA/(ng/cm ²)	PFOS/(ng/cm ²)
18	HBW	1.85×10 ⁻⁴	2.99×10 ⁻⁵
	JRJ	1.02×10 ⁻³	1.32×10 ⁻³
	MD	2.54×10 ⁻⁴	8.46×10 ⁻⁵
4	HBW	ND	ND
	JRJ	9.35×10 ⁻⁴	ND
	MD	1.45×10 ⁻⁴	2.74×10 ⁻⁴

注: ND 为未检出。

4 结论与讨论

综上所述, 无论是何种品牌的纸杯或是包装袋, 接触食物均会产生 PFOA、PFOS 微量溶出。对于一次性纸杯, 常温下水中的迁移量相对较少, 在 4℃条件下会更少。4%酸/水(模拟碳酸饮料)放入纸杯, 常温下随着时间的增加, 2 种物质迁移量变化不大, 只有在 24 h 时监测到了 PFOS 的微量迁移; 4℃条件下, 随着时间的增加, 两物质迁移量在不断增加, 说明酸性饮料在纸杯中冷藏的时间越长, 溶出的全氟化合物就越多, 建议尽量避免使用纸杯久放碳酸饮料。随着乙醇浓度的增加, PFOA 的迁移量整体呈下降趋势, PFOS 的迁移量整体有增加趋势; 在 4℃下, 无明显规律; 加热的状态下, PFOA 的迁移量减少, PFOS 的迁移量却在增加, 说明加热会促进 PFOS 溶出。将玉米油放入纸杯中, 随着时间的增加, PFOA、PFOS 的迁移量基本不变, 监测总含量也不高, 结果符合全氟化合物疏油特性。在现实生活

中,常用到纸杯盛油或含有芝麻酱类食品,虽溶出量很低,但还是少用为宜。对于纸袋和包装纸,在常温下盛放油脂类食品,随着时间的增加 PFOS 的迁移量会有增加;4℃条件下,在48 h时会有 PFOA、PFOS 的明显迁移量。可见,对于一些包装纸来说,在冷藏条件也不能存放太久,同样会有全氟化合物溶出,进而会迁移到食物中影响健康。

当前研究全氟化合物这类物质基质比较复杂,LC-MS/MS 技术是目前使用最为广泛的痕量全氟类化合物定量检测方法之一,由于其高选择性和高灵敏度,对样品前处理要求较低,检测范围更宽,且能够提供相比单级质谱更详细的结构信息。目前全氟化合物研究对象除了接触材料、食品及生物体之外,生存环境也是人类暴露全氟化合物风险的重要方面,所以积极开发全氟化合物替代产品,努力从源头上消除全氟化合物对环境和生物体的污染。

全氟化合物的迁移规律为膳食暴露研究的重要前提,在不同模拟介质中探讨迁移规律将成为未来全氟化合物研究的重点,加热、光照、储存条件的差异等都应作为考虑的因素。课题组下一步针对膳食暴露情况开展调研,继续跟进食品接触材料中全氟化合物的安全性评价及风险评估,明确人群暴露状况及安全风险,为制定食品中全氟化合物的残留限量标准提供依据,并对我国食品接触材料中全氟化合物监管产生重要意义。

参考文献

- [1] 史亚利,潘媛媛,王杰明,等.全氟化合物的环境问题[J].化学进展,2009,21(2-3):369-376.
Shi YL, Pan YY, Wang JM, *et al.* Environmental problems of perfluorinated compounds [J]. Chem Prog, 2009, 21(2-3): 369-376.
- [2] Gebbink WA, Letcher RJ. Comparative tissue and body compartment accumulation and maternal transfer to eggs of perfluoroalkyl sulfonates and carboxylates in Great Lakes herring gulls [J]. Environ Poll, 2012, 162: 40-47.
- [3] Perfluorooctane sulfonate (PFOS), perfluorooctanoic acid (PFOA) and their salts [Z]. 2008.
- [4] Wu YN, Wang YX, Li JG, *et al.* Perfluorinated compounds in seafood from coastal areas in China [J]. Environ Int, 2012, 42: 67-71.
- [5] 武晓果,谢周清.南北极全氟化合物的含量、分布及迁移[J].极地研究,2009,21(3):197-210.
Wu XG, Xie ZQ. Content, distribution and migration of perfluorinated compounds in arctic and antarctic [J]. Polar Res, 2009, 21(3): 197-210.
- [6] 王亚韩,蔡亚岐,江桂斌.斯德哥尔摩公约新增持久性有机污染物的一些研究进展[J].中国科学,2010,40(2):99-123.
Wang YH, Cai YQ, Jiang GB. New in Stockholm convention on persistent organic pollutants (pops) some research progress [J]. Sci China, 2010, 40(2): 99-123.
- [7] 楼军,鲍宗必,吴晓晋,等.气相色谱-质谱联用法分析全氟酰氟[J].分析化学,2013,41(7):1086-1090.
Lou J, Bao ZB, Wu XJ, *et al.* Gas chromatography-mass spectrometry analysis of perfluoroacyl fluoride [J]. Anal Chem, 2013, 41(7): 1086-1090.
- [8] 路国慧,沈亚婷,何俊,等.高效液相色谱-串联质谱法测定黄河河口段水中全氟化合物的初步研究[J].岩矿测试,2012,31(1):147-151.
Lu GH, Shen YT, He J, *et al.* Preliminary study on determination of perfluorinated compounds in water of the Yellow river estuary by high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Rock Ore Test, 2012, 31(1): 147-151.
- [9] Zhao RS, Wang X, Wang X, *et al.* Using bamboo charcoal as solid-phase extraction adsorbent for the ultratrace-level determination of perfluorooctanoic acid in water samples by HPLC-mass spectrometry [J]. Anal Bioanal Chem, 2008, 390(6): 1671-1676.
- [10] 王雨昕,李敬光,赵云峰,等.生物基质中全氟辛酸与全氟辛烷磺酸及其前体化合物的超高效液相色谱-串联质谱法研究[J].分析化学,2011,39(8):1134-1140.
Wang YX, Li JG, Zhao YF, *et al.* Study on perfluorooctanoic acid and perfluorooctane sulfonic acid and their precursors in biological matrix by ultra-high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Anal Chem, 2011, 39(8): 1134-1140.
- [11] 程家辉,李鑫,程红艳,等.近岸海水中全氟化合物的液相色谱-离子阱质谱法测定[J].环境化学,2012,31(6):896-901.
Cheng JH, Li X, Cheng HY, *et al.* Determination of perfluorinated compounds in offshore seawater by liquid chromatography-ion trap mass spectrometry [J]. Environ Chem, 2012, 31(6): 896-901.
- [12] 张晓丽,刘崇华,洗燕萍,等.液相色谱-串联质谱法测定纺织品中7种全氟有机物[J].2010,29(12):1182-1185.
Zhang XL, Liu CH, Xian YP, *et al.* Determination of 7 perfluorinated organics in textiles by liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. 2010, 29(12): 1182-1185.
- [13] 孔德洋,王懿,王娜,等.超高效液相色谱串联质谱法检测鱼体中的全氟化合物[J].环境化学,2012,31(5):743-747.
Kong DY, Wang Y, Wang N, *et al.* Detection of perfluorinated compounds in fish by HPLC/MS [J]. Environ Chem, 2012, 31(5): 743-747.
- [14] 张岩,庞坤,吕品,等.液相色谱-串联质谱法测定食品用纸容器中全氟辛酸[J].食品科学,2012,33(22):207-209.
Zhang Y, Pang K, Lv P, *et al.* Determination of perfluorooctanoic acid in food paper containers by liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Food Sci, 2012, 33(22): 207-209.
- [15] 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.* Study on the pollution level of perfluorinated compounds in commercial eggs and duck eggs in Beijing [J]. Environ Sci, 2013, 34(1): 244-250.
- [16] Boone JS, Guan B, Vigo C, *et al.* A method for the analysis of perfluorinated compounds in environmental and drinking waters and the determination of their lowest concentration minimal reporting levels [J]. J Chromatogr A, 2014, 1345: 68-77.
- [17] 王杰明,王丽,冯玉静,等.液相色谱-质谱联用分析动物内脏和肌肉组织中的全氟化合物[J].食品科学,2010,(4):127-131.
Wang JM, Wang L, Feng YJ, *et al.* Analysis of perfluorinated compounds in animal viscera and muscle tissues by liquid chromatography-mass

spectrometry [J]. Food Sci, 2010, (4): 127-131.

- [18] Lashgari M, Lee HK. Determination of perfluorinated carboxylic acids in fish fillet by micro-solid phase extraction, followed by liquid chromatography-triple quadrupole mass spectrometry [J]. J Chromatogr A, 2014, 1369: 26-32.

- [19] GB 31604. 1-2015 食品安全国家标准 食品接触材料及制品迁移试验通则[S].

GB 31604. 1-2015 National food safety standard-General principles for the test of migration of food contact materials and products [S].

(责任编辑: 韩晓红)

作者简介

刘征辉, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为食品质量安全及化学计量学。

E-mail: liuzhenghui_2008@163.com

赵 文, 教授, 主要研究方向为食品营养与毒理学。

E-mail: zwgyf1964@163.com