

# 液相色谱串联质谱法检测一次性纸杯中全氟辛酸和全氟辛烷磺酸的迁移量

刘征辉<sup>1</sup>, 魏静娜<sup>2</sup>, 赵琳琳<sup>2</sup>, 赵云平<sup>2</sup>, 薛天凯<sup>1</sup>, 黄迪<sup>1</sup>, 王亚旭<sup>3</sup>, 周茜<sup>3\*</sup>

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

**摘要:** **目的** 建立液相色谱串联质谱法检测一次性纸杯中全氟辛酸、全氟辛烷磺酸向食品模拟物中的迁移量。**方法** 待测样品经前处理后, 通过 C<sub>18</sub> 色谱柱进行分离, 以乙腈-水为流动相进行梯度洗脱、流速 0.2 mL/min、柱温为 30 °C、进样量 2 μL, 由三重四级杆质谱进行定性和定量分析。**结果** 全氟辛酸和全氟辛烷磺酸在 0.1~2.0 ng/mL 范围内线性关系良好, 相关系数均 ≥ 0.999; 低、中、高 3 个添加水平的平均加标回收为 81.27%~97.12%; 相对标准偏差为 2.9%~7.4%。应用建立的方法对一次性纸杯进行模拟迁移试验, 初步得到了这 2 种物质在不同模拟状态下的迁移量。**结论** 该方法选择性强、灵敏性和准确度高, 适用于一次性纸杯中全氟辛酸和全氟辛烷磺酸的确证和定量分析。

**关键词:** 全氟辛酸; 全氟辛烷磺酸; 一次性纸杯; 食物模拟物; 方法学; 迁移量; 定量分析

## Determination of migration of perfluorooctanoic acid and perfluorooctane sulfonate in disposable cups by liquid chromatography-tandem mass spectrometry

LIU Zheng-Hui<sup>1</sup>, WEI Jing-Na<sup>2</sup>, ZHAO Lin-Lin<sup>2</sup>, ZHAO Yun-Ping<sup>2</sup>, XUE Tian-Kai<sup>1</sup>, HUANG Di<sup>1</sup>, WANG Ya-Xu<sup>3</sup>, ZHOU Qian<sup>3\*</sup>

(1. Tianjin Agricultural Quality Standards and Testing Technology Research Institute, Tianjin 300081, China; 2. Tianjin High-standard Quality Testing Lab., Tianjin 300081, China; 3. Agricultural University of Hebei Province, Baoding 071000, China)

**ABSTRACT: Objective** To determine the migration of perfluorooctanoic acid and perfluorooctanoic acid to food simulants in disposable paper cups by liquid chromatography tandem mass spectrometry. **Methods** After pre-treatment, the samples were separated by C<sub>18</sub> chromatographic column at the flow rate of 0.2 mL/min by gradient elution using acetonitrile and water as mobile phase. The temperature of the column oven was maintained at 30 °C, the injection volume was 2 μL, and the triple quadrupole mass spectrometry was performed for qualitative and quantitative analysis. **Results** Perfluorooctanoic acid and perfluorooctanoic acid had a good linear relationship within the range of 0.1–2.0 ng/mL, and the correlation coefficients were ≥ 0.999. The recoveries at 3 spiked levels were 81.27%–97.12%, with the relative standard deviations of 2.9%–7.4%. The simulated migration test was carried

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: 周茜, 讲师, 主要研究方向为食品营养与毒理学。E-mail: 26708472@qq.com

\*Corresponding author: ZHOU Qian, Lecturer, Agricultural University of Hebei Province, Baoding 071000, China. E-mail: 26708472@qq.com

out on the disposable paper cups by the established method, and the migration of the two substances under different simulation conditions was preliminarily obtained. **Conclusion** The method has high selectivity, sensitivity and accuracy, and is suitable for the confirmation and quantitative analysis of perfluorooctanoic acid and perfluorooctanoic acid in disposable paper cups.

**KEY WORDS:** perfluorooctanoic acid; perfluorooctane sulfonic acid; disposable paper cup; food simulants; methodology; migration; quantitative analysis

## 1 引言

全氟化合物(perfluorinated compounds, PFCs)是一种新型持久性的有机污染物,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。因其具有良好的表面活性、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、食物接触材料等领域中。近年来随着生活节奏的加快,纸质包装被广泛地应用于食品行业中,如各种蛋糕托纸、面包纸袋以及快餐食品包装袋、爆米花桶等。食品接触材料中频繁检出全氟化合物,其对人体健康的影响受到了社会的普遍关注,引起了世界各国决策者和科学家的高度重视<sup>[1-6]</sup>。研究指出从一次性纸杯和包装袋等食品接触材料中可检测到全氟辛酸(perfluorooctanoic acid, PFOA)、全氟辛烷磺酸(perfluorooctane sulfonates, PFOS),但其污染水平不均,且低于欧盟限量标准,可能不会对人类产生即时危害,但鉴于全氟化合物在生物体内的持续累积性,且过量的全氟化合物对人体危害严重,有关部门应对食品接触材料中全氟化合物的残留及迁移量进行监控和评估<sup>[7-9]</sup>。因此,确定一次性食品接触材料中全氟化合物的检测方法,了解其全氟化合物的污染水平,对保护消费者具有十分重要的意义。液相色谱串联质谱法(liquid chromatography tandem mass spectrometry, LC-MS/MS)是目前使用最为广泛的痕量全氟类化合物的定量检测方法之一,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信息,已经得到了国内外很多研究者的青睐<sup>[10-12]</sup>。液相色谱串联质谱技术汲取了色谱仪高效分离以及质谱仪定量可靠等优点,产生的母离子与子离子可准确可靠地提供分析物的分子结构信息。实验室利用其专一性强、灵敏度高的特点,应用于全氟化合物在一次性食品接触材料中的痕量检测。

本研究对全氟化合物的迁移方法进行系统研究,建立了食品包装材料中 PFOA 和 PFOS 2 种典型性的 PFCs 化合物检测方法,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 主要仪器与试剂

Waters 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、Waters XBridge HILIC 色谱柱(2.1 mm×150 mm, 3.5 μm); Waters AQUITY BEH C<sub>18</sub> 色谱柱(2.1 mm×100 mm, 1.7 μm)(美国 Waters 公司); 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); Milli-Q 去离子水发生器(美国 Millipore 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)。

全氟辛酸铵(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); 乙酸铵(纯度 98.0%, 天津市光复科技发展有限公司)。

检测样品来源: 妙洁(MJ)、美丽雅(MLY)、洁成(JC)、茶花(CH)4 个品牌的一次性纸杯, 均购自京东网上商城。

### 2.2 方法

#### 2.2.1 样品前处理

将食品模拟物在纸杯中按既定的模拟状态进行试验后,全部转移至平底烧瓶中,再将其全部使用固相萃取方法进行净化浓缩。其中,乙醇/水混合液要先旋转蒸发至无乙醇后再萃取,4%乙酸溶液在浓缩萃取前要用 5 mol/L NaOH 溶液中和为中性溶液。在 37 °C 条件下氮吹至干; 1 mL 甲醇复溶后,通过 0.22 μm 微孔滤膜,待检测。

#### 2.2.2 标准溶液的配制

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 μg/mL、100.27 μg/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 μg/mL、1.00 μg/mL 的溶液,作为标准溶液。-4 °C 冷藏保存。

#### 2.2.3 仪器条件

色谱: 采用 C<sub>18</sub> 液相色谱柱: Waters AQUITY BEH C<sub>18</sub> 色谱柱(2.1 mm×100 mm, 1.7 μm); 流动相 A 为乙腈、B 为

水, 梯度洗脱 (0~2 min, 10%→60% A; 2~3 min, 60%→100% A; 3~3.5 min, 100% A; 3.5~4 min, 100%→10% A; 4~5 min, 10% A); 流速 0.2 mL/min; 柱温为 30 °C; 进样量 2 μL。

质谱: 离子源: ESI; 离子源温度: 350 °C; 电离电压: -1.5 kv; 检测模式: 多反应监测模式 (multiple reaction monitoring, MRM); 碰撞气: 氮气。根据各组分的保留时间和一级、二级质谱参数, 按时间分段用 MRM 模式对各组分进行质谱检测, 各化合物的母离子、子离子等参数见表 1。

表 1 PFOA 和 PFOS 选择性检测离子  
Table 1 PFOA and PFOS selective detection of ions

名称	母离子( <i>m/z</i> )	子离子( <i>m/z</i> )	
		定性	定量
PFOA	413.07	168.85	368.95
PFOS	499.04	98.78	79.77

### 3 结果与分析

根据 PFOA 和 PFOS 的特性, 参考相关文献及技术标准<sup>[13-15]</sup>, 选择 Waters AQUITY BEH C<sub>18</sub> 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。

#### 3.1 色谱柱的优化

由于 HILIC 柱是亲水特征色谱柱, 能够改善强极性物质的保留行为, 因此首先考虑采用 Waters XBridge HILIC (2.1 mm×150 mm, 3.5 μm) 分离, 60%~100% 乙腈梯度洗脱条件下, 且随着有机相浓度的增加没有明显改善, 说明 HILIC 不适用于不同碳链长度的全氟化合物的分离; 而使用 Waters AQUITY BEH C<sub>18</sub> (2.1 mm×100 mm, 1.7 μm) 后, PFOA 和 PFOS 保留时间均在 5 min 以内, 且分离效果好, 最终选择 Waters AQUITY BEH C<sub>18</sub> 柱作为实验色谱柱。

#### 3.2 流动相的确定

查阅大量文献后, 首先选择 (A: 100% 乙腈、B: 0.01 mol/L 乙酸铵溶液) 作为流动相, 按照如表 2 和表 3 所示 2 个梯度流动相进行洗脱分离, 混标进样的浓度为 8 ng/mL, 进样体积 2 μL, 得到如图 1 和图 2 进样结果。

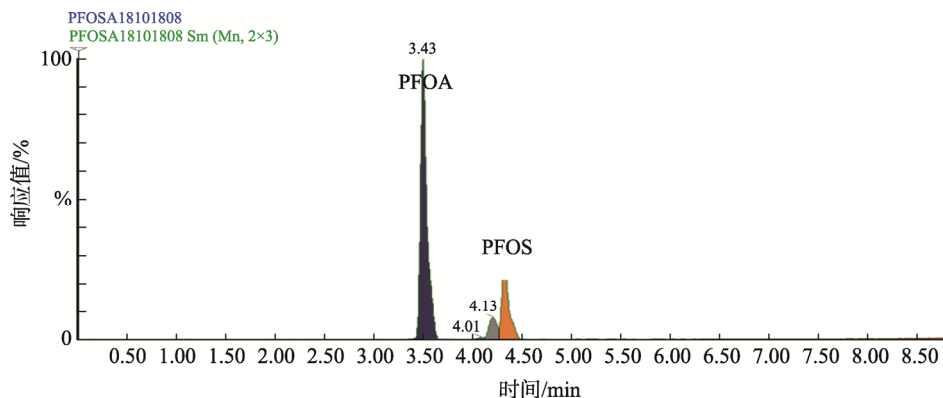
色谱条件的优化: 通过 2 个梯度进样色谱质谱图显示, 2 个梯度走出的基线均较平, PFOA 峰型很好, 但 PFOS 出峰不太理想, 主峰前有一小峰出现。由于是 PFOS 出峰不太理想, 所以改用将乙酸铵替换为纯水进样, 看能否优化 PFOS 出峰的效果。得到的结果是: 相比第 2 梯度, 第 1 梯度峰型好, 且出峰时间早, 所用时间短。

表 2 第一梯度流动相  
Table 2 First gradient mobile phase

时间/min	流速/(mL/min)	A/%	B/%
0	0.2	10	90
2	0.2	60	40
3	0.2	100	00
3.5	0.2	100	0
4	0.2	10	90
5	0.2	10	90

表 3 第二梯度流动相  
Table 3 Second gradient mobile phase

时间/min	流速/(mL/min)	A/%	B/%
0	0.2	10	90
2	0.2	90	100
3	0.2	90	10
4.5	0.2	10	90
5	0.2	10	90



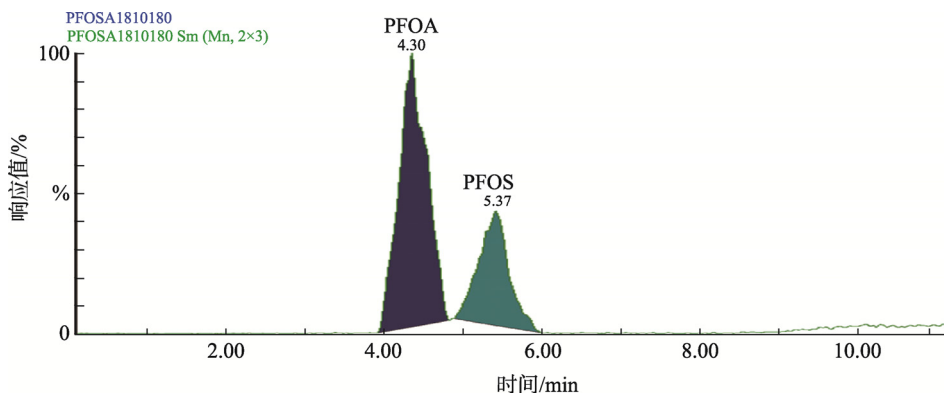
注: 流动相为 A: 100% 乙腈; B: 0.01 mol/L 乙酸铵溶液。

图 1 第一梯度混标质谱色图

Fig.1 Mixed standard mass spectrogram of first gradient

最后选择(A: 100%乙腈、B: 纯水)作为流动相, 按照如表 2 和表 3 所示 2 个梯度流动相进行洗脱分离, 混标进样的浓度为 8 ng/mL, 进样体积 2  $\mu$ L, 得到如图 3 和图 4 进样结果, 在第一梯度下, 用乙腈和水做流动相色谱图出峰要好于选用乙腈和乙酸铵做流动相; 在进混标时, 第一淋

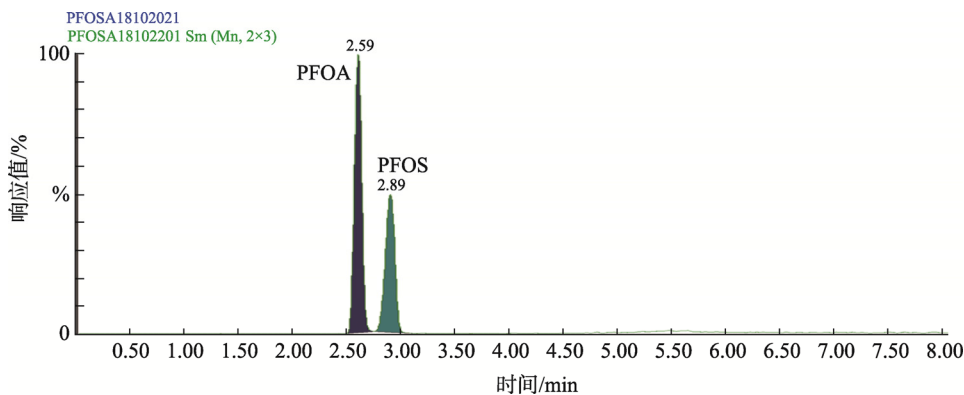
洗梯度要好于第二个淋洗梯度, 出峰时间要早, 所需时间就会相应缩短, 节省时间。所以最终选择的流动相组成为 A: 纯乙腈, B: 纯水; 淋洗梯度条件为第一梯度, 节省了时间和溶剂。对比进样体积 1  $\mu$ L 和 2  $\mu$ L, 没有影响, 最终选择 2  $\mu$ L。



注: 流动相为 A: 100%乙腈、B: 0.01 mol/L 乙酸铵溶液。

图 2 第二梯度混标质谱色谱图

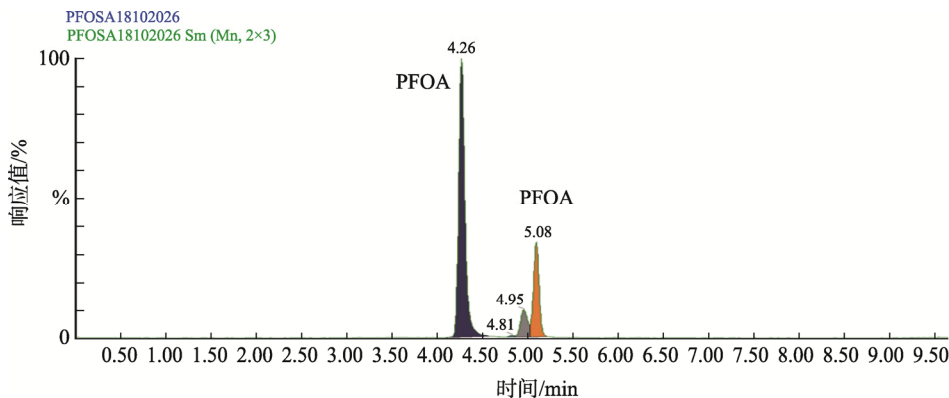
Fig.2 Mixed standard mass spectrogram of second gradient



注: 流动相为 A: 100%乙腈、B: 纯水。

图 3 第一梯度混标质谱色谱图

Fig.3 Mixed standard mass spectrogram of first gradient



注: 流动相为 A: 100%乙腈、B: 纯水。

图 4 第二梯度混标质谱色谱图

Fig.4 Mixed standard mass spectrogram of second gradient

### 3.3 固相萃取柱的选择

样品的净化和浓缩对仪器寿命和仪器检出限都有显著影响。作为阴离子交换柱,本研究考察了 HLB 和 WAX2 种类型固相萃取小柱对 PFOA 和 PFOS 的富集情况。分别取浓度为 1 ng/mL 的混合标准溶液各 1 mL 加入到 25 mL 空白甲酸甲醇溶液中,旋蒸近干,加入 2 mL 水,涡旋溶解后分别过经活化的 HLB 和 WAX 固相萃取小柱,加甲醇洗脱,将洗脱液 40 °C 氮吹近干,加 1 mL 甲醇定容,上机测定。结果表明 WAX 类型固相萃取柱的净化效果优于 HLB 类型。所以本实验选取 WAX 弱阴离子类型交换柱作为试验固相萃取小柱。

### 3.4 检出限和标准曲线

将 PFOS 和 PFOA 的标曲最低点和基质空白重复进样 6 次,计算出色谱噪音信号平均面积,以信噪比=3(S/N=3) 确定 PFOA 和 PFOS 最低检测限分别为 0.002、0.004 ng/mL。使用贮备液配制 PFOA 和 PFOS 的混合标准液,将 PFOA 和 PFOS 标准系列浓度为 0.1、0.2、0.4、0.8、1.0、2.0 ng/mL 的混标进样 2  $\mu$ L,检测到 PFOA 的保留时间为 2.7 min; PFOS 的保留时间为 3.3 min。结果显示 PFOA 和 PFOS 在 0.1~2.0 ng/mL 范围内线性关系良好,分别以 PFOA 和 PFOS 的峰面积对浓度做标准曲线及线性方程分别见图 5 和图 6。

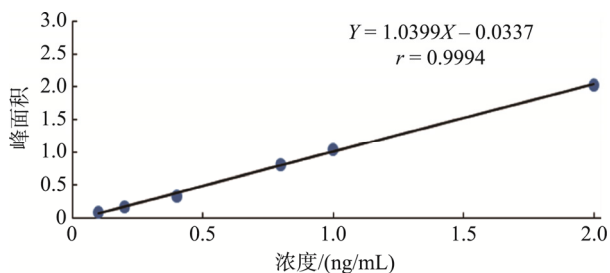


图 5 PFOA 标准曲线和线性方程

Fig.5 PFOA standard curve and linear equation

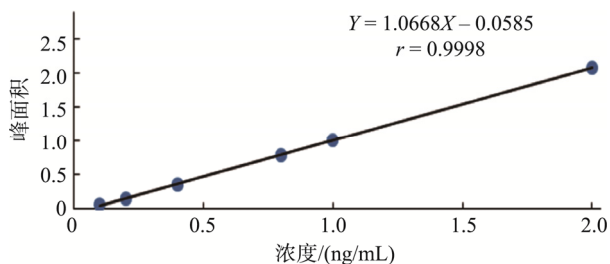


图 6 PFOS 标准曲线和线性方程

Fig.6 PFOS standard curve and linear equation

### 3.5 加标回收率

以阴性样品进行低中高 3 个加标水平的回收实验,加

标量分别为 50、100 和 200  $\mu$ L 含 PFOA、PFOS 分别为 19.2 ng/mL、20 ng/mL 的标准混合溶液,每个加标水平取 6 个平行样,结果如表 4,该方法具有良好的准确性和重现性。

表 4 加标回收率试验  
Table 4 Standard recovery test

组分	加标量/ng	回收率/%	RSD/%
PFOA	0.96	83.31	3.2
	1.92	87.26	7.4
	3.84	78.49	3.9
PFOS	1.00	81.27	4.1
	2.00	97.12	3.7
	4.00	85.43	2.9

### 3.6 实际样品检测

课题组在市面上选择了常见一次性纸杯 MJ、MLY、JC、CH 4 个品牌进行试验。本试验是在 10~12 月期间完成,所以常温温度取平均值 18 °C。根据一次性纸杯在日常生活中的使用情况,即通过食物模拟物模拟在一次性纸杯中的不同食品类别的存在状态,参考 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》,制定表 5 和表 6 试验方案<sup>[16]</sup>。通过试验初步得到了全氟辛酸和全氟辛烷磺酸在不同模拟状态下的迁移量。

从图 7 可知,在一次性纸杯中模拟沸水(A)和油脂类食物(G)均未检测到 PFOA 和 PFOS。PFOA 和 PFOS 在水中和在油脂中溶解度低,也可能和这两种物质的疏水疏油性有关。4%乙酸在 25 °C 模拟状态(B)以及 10%乙醇在 4 °C 模拟状态(D)PFOA 和 PFOS 两种物质都有检出,并且 10%乙醇在 4 °C 模拟状态(D)检出 PFOS 量是最多的。其余模拟状态均检出了 PFOA,并未检出 PFOS。随着乙醇浓度的增加,在同一模拟状态下(D 和 E)PFOA 的量也在减少,说明乙醇浓度会影响 PFOA 的溶出。

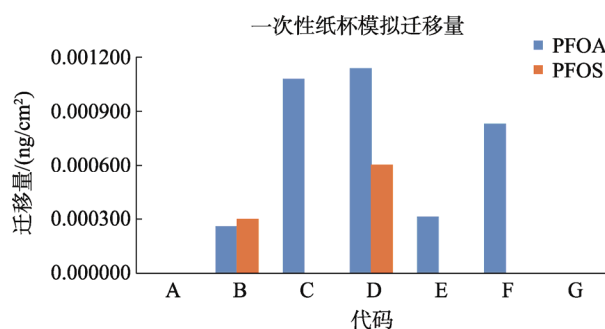
通过试验可初步得出含酸性和酒精的饮料最好不要用一次性纸杯装,否则尽量缩短放置时间;尤其避免放在冰箱中冷藏过夜,这样 PFOA 将会产生大量溶出,对健康带来潜在威胁。

表 5 在一次性纸杯迁移试验中选择的模拟物代表的食品类别  
Table 5 Food categories represented by the simulated objects selected in the disposable cup transfer test

模拟物	食品类别
纯水	水溶液(自来水,矿泉水,纯净水)
4%乙酸	澄清饮料(果蔬汁,糖浆,咖啡,茶饮料,能量饮料)
10%乙醇	含 10%左右的酒精饮品(啤酒,醪糟)
30%乙醇	含 30%左右的酒精饮品(奶酒等)
50%乙醇	含 50%左右的酒精饮料或食用酒精,乳及乳制品
95%乙醇	油脂类食物

表 6 试验中所代表食物的模拟状态  
Table 6 Simulation status of the food represented in the pre-experiment

编号	模拟迁移试验
A	将 100 °C 的水煮沸放置在纸杯中, 直至其到常温, 并放置 4 h, 模拟了纸杯中加入开水并放置至常温的一种状态。
B	4%乙酸放置在纸杯中, 在 25 °C 条件下放置 3 h, 模拟在常温下, 果汁或碳酸饮料等在一次性纸杯中的一种状态。
C	4%乙酸放置在纸杯中, 在 4 °C 条件下放置 24 h, 模拟酸性饮料在一次性纸杯中放在冰箱里冷藏一天的的一种状态。
D	10%乙醇放置在纸杯中, 在 4 °C 条件下放置 24 h, 模拟了含 10%左右的酒精饮品在一次性纸杯中, 放置冰箱中冷藏一天状态。
E	30%乙醇放置在纸杯中, 在 4 °C 条件下放置 24 h, 模拟含 30%左右的酒精饮品在一次性纸杯中, 放置冰箱中冷藏一天的状态。
F	50%乙醇在 100 °C 沸水中煮沸 10 min, 模拟刚煮沸的热牛奶在纸杯中的一种状态。
G	95%乙醇 100 °C 沸水中煮沸 10 min, 模拟滚烫的油在纸杯中的一种状态。



注: 图 7 中的 A-G 编号说明参见表 5。

图 7 一次性纸杯模拟迁移量

Fig.7 Disposable paper cup simulation migration

## 4 小 结

本文主要研究了全氟辛酸、全氟辛烷磺酸从一次性纸杯向食品模拟物中迁移的方法, 通过方法学研究对质谱条件、色谱条件进行优化, 系统评价了前处理方法、标准曲线、方法检出限和回收率。结果显示该方法选择性、灵敏性和准确度均较高于常规文献报道及国标方法<sup>[10-12,16]</sup>, 适用于一次性纸杯中全氟辛酸和全氟辛烷磺酸的确证和定量分析, 并通过实验初步得到了全氟辛酸和全氟辛烷磺酸在不同模拟状态时的迁移量数据。

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环节, 所以应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的研究热点, 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展开调研, 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。

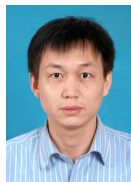
## 参考文献

- [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] Wu YN, Wang YX, Li JG, *et al.* Perfluorinated compounds in seafood from coastal areas in China [J]. Environ Int, 2012, 42: 67-71.
- [3] 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.
- [4] 金一和, 丁梅, 翟成, 等. 长江三峡库区江水和武汉地区地面水中 PFOS 和 PFOA 污染现状调查[J]. 生态环境, 2006, 15(3): 486-489.  
Jin YH, Ding M, Zhai C, *et al.* Investigation of PFOS and PFOA pollution in river water in three gorges reservoir area and surface water in wuhan area [J]. Ecolog Environ, 2006, 15(3): 486-489.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 程家辉, 李鑫, 程红艳, 等. 近岸海水中全氟化合物的液相色谱 F 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.
- [9] 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]. *分析测试学报*, 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]. *J Instrum Anal*, 2010, 29(12): 1182–1185.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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

周茜, 讲师, 主要研究方向为食品营养与毒理学。  
E-mail: 27608272@qq.com