

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250418005

引用格式: 袁蕊, 佟晶, 李文萱, 等. 液相色谱-串联质谱法同时测定食品接触材料中有机磷酸酯、亚磷酸酯及对羟基苯甲酸酯迁移量[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(14): 30-39.

YUAN R, TONG J, LI WX, *et al.* Simultaneous determination of organophosphate esters, organophosphite antioxidants and parabens migration in food contact materials by liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(14): 30-39. (in Chinese with English abstract).

# 液相色谱-串联质谱法同时测定食品接触材料中有机磷酸酯、亚磷酸酯及对羟基苯甲酸酯迁移量

袁蕊<sup>1</sup>, 佟晶<sup>1</sup>, 李文萱<sup>1</sup>, 丁文波<sup>1</sup>, 范赛<sup>2</sup>, 赵榕<sup>2</sup>, 刘伟<sup>2\*</sup>

(1. 北京市东城区疾病预防控制中心/公共卫生应急管理创新中心, 北京 100050;

2. 北京市疾病预防控制中心, 北京 100013)

**摘要: 目的** 建立液相色谱-串联质谱法同时测定食品接触材料中 24 种有机磷酸酯(organophosphate esters, OPEs)、亚磷酸酯(organophosphite antioxidants, OPAs)及对羟基苯甲酸酯(parabens, PBs)类化合物迁移量的方法。**方法** 待测食品接触材料按照预期接触食品的种类和方式, 进行迁移实验, 获得浸泡液。浸泡液经离心后, 采用液相色谱法分离, 串联质谱法测定, 基质匹配标准曲线定量。**结果** 优化后的方法, 可以同时检测食品接触材料迁移浸泡液中 24 种 OPEs、OPAs 及 PBs 类物质, 检出限为 0.01~0.58  $\mu\text{g/L}$ , 定量限为 0.03~2.00  $\mu\text{g/L}$ , 加标回收率范围为 69.0%~129.6%, 相对标准偏差为 0.5%~10.9% ( $n=6$ )。对 20 件包装膜袋、10 件一次性外卖盒及 20 件纸制餐具进行测定,  $\Sigma\text{OPEs}$  范围为<检出限~19.1  $\mu\text{g/L}$ ,  $\Sigma\text{OPAs}$  范围为<检出限~1248  $\mu\text{g/L}$ ,  $\Sigma\text{PBs}$  范围为<检出限~0.501  $\mu\text{g/L}$ 。食品接触材料迁移量监测较少, 其健康风险需要得到更多重视及研究。**结论** 该方法操作简单, 灵敏度高, 适用于食品接触材料样品 OPEs、OPAs 和 PBs 的迁移量测定。

**关键词:** 食品接触材料; 有机磷酸酯; 迁移量; 对羟基苯甲酸酯; 有机亚磷酸酯

## Simultaneous determination of organophosphate esters, organophosphite antioxidants and parabens migration in food contact materials by liquid chromatography-tandem mass spectrometry

YUAN Rui<sup>1</sup>, TONG Jing<sup>1</sup>, LI Wen-Xuan<sup>1</sup>, DING Wen-Bo<sup>1</sup>, FAN Sai<sup>2</sup>, ZHAO Rong<sup>2</sup>, LIU Wei<sup>2\*</sup>

(1. Beijing Dongcheng District Center for Disease Control and Prevention/Centre for Public Health Emergency Management Innovation, Beijing 100050, China; 2. Beijing Center for Disease Control and Prevention, Beijing 100013, China)

**ABSTRACT: Objective** To establish a method for simultaneously determining the migration amounts of 24 kinds of organophosphate esters (OPEs), organophosphite antioxidants (OPAs), and parabens (PBs) in food contact

收稿日期: 2025-04-18

基金项目: 北京市东城区优秀人才培养资助项目(2024-dchrcprzz-40); 北京市东城区卫生科技计划项目(东卫健研[2024]-19)

第一作者: 袁蕊(1987—), 女, 硕士, 副主任技师, 主要研究方向为食品安全检测。E-mail: janetyuan2004@163.com

\*通信作者: 刘伟(1983—), 男, 硕士, 副主任技师, 主要研究方向为食品安全检测。E-mail: liuweij\_bjcdc@sina.com

materials by liquid chromatography-tandem mass spectrometry. **Methods** The food contact materials to be tested were subjected to migration experiments in accordance with the expected types of food and contact modes, so as to obtain the soaking solution. After centrifugation, the soaking solution was separated by liquid chromatography, determined by tandem mass spectrometry, and quantified by matrix-matched standard curve. **Results** The optimized method could simultaneously detect 24 kinds of OPEs, OPAs, and PBs in the migration soaking solutions of food contact materials. The limits of detection were 0.01–0.58  $\mu\text{g/L}$  and the limits of quantitation were 0.03–2.00  $\mu\text{g/L}$ . The spiked samples recovery rates ranged from 69.0%–129.6%, with relative standard deviations of 0.5% to 10.9% ( $n=6$ ). The 20 packaging film bags, 10 disposable take-out boxes and 20 paper tableware items were tested. The  $\Sigma\text{OPEs}$  ranges were <limit of detection-19.1  $\mu\text{g/L}$ ,  $\Sigma\text{OPAs}$  were <limit of detection-1248  $\mu\text{g/L}$ , and  $\Sigma\text{PBs}$  were <limit of detection-0.501  $\mu\text{g/L}$ . The monitoring of the migration amounts of food contact materials was limited, its health risks required more attention and research. **Conclusion** This method is simple to operate and highly sensitive, which is suitable for the determination of the migration amounts of OPEs, OPAs and PBs in food contact material samples.

**KEY WORDS:** food contact materials; organophosphate esters; migration; paraben; organophosphite antioxidants

## 0 引言

随着生活节奏的加快, 外卖、快餐和预包装食品已深度融入人们的日常生活, 食品包装的安全性问题因此受到越来越多的关注。统计数据显示, 2020 年, 中国外卖订单量达到了 170 亿, 按照每个订单 3.44 个容器计算, 需消费 584.8 亿个食品包装容器<sup>[1]</sup>, 其中超过 50% 的食品包装材料是由纸和塑料制成<sup>[2]</sup>。这些食品接触材料中含有多种化学物质。这些化学物质不仅来源于材料本身, 还涵盖生产过程中为提升其性能而添加的各类添加剂, 以及在生产加工环节中因副反应生成的化合物、杂质、材料降解产物等<sup>[2-5]</sup>。这些化学物质, 有一定几率随着与食品接触而进入到人体中, 对消费者构成潜在的健康风险。其中, 有机磷酸酯(organophosphate esters, OPEs)、亚磷酸酯(organophosphite antioxidants, OPAs)以及对羟基苯甲酸酯(parabens, PBs)是逐渐受到关注的化合物。

OPEs 是一类阻燃剂, 在全球范围内广泛应用; OPAs 是一类以提高聚合物的耐久性为目的的抗氧化添加剂, 经常添加在塑料制品中; parabens, PBs 则是一类常见的食品药品、个人护理产品和食品包装材料中的抗菌防腐剂<sup>[6-9]</sup>。其中, PBs 是已被确认具有生殖影响的内分泌干扰物质, 还会产生过敏反应<sup>[10-11]</sup>。OPEs 对健康的不利影响也已经有大量研究证实, 特别是神经毒性、生殖毒性、内分泌干扰和致癌性等<sup>[12-15]</sup>。尽管 OPAs 的毒理学研究比较少, 但已有研究表明, OPAs 与 OPEs 具有类似的结构, 因此可能表现出具有潜在的雌激素活性和神经毒性<sup>[16]</sup>。此外, 模拟实验表明, 在加热、紫外线辐射和水接触条件下, OPAs 会显著转化为其氧化产物 OPEs, 从而增加 OPEs 的暴露风险<sup>[17]</sup>。这些污染物广泛存在于环境中, 人类可以通

过呼吸、皮肤、膳食等多种方式暴露。其中, 膳食摄入是人类暴露 OPEs 的主要暴露途径<sup>[18]</sup>。而有研究表明, 一些食品中的 OPEs 的污染主要来自食品包装材料<sup>[8,19]</sup>。因此, 对于食品接触材料中污染情况的调查和检测非常重要。

与食品相比, 目前对于食品接触材料中 OPEs、OPAs 及 PBs 的监测和风险评估的研究仍较为有限。鉴于此, 本研究建立了一种液相色谱-串联质谱法同时测定食品接触材料中 24 种 OPEs、OPAs 及 PBs 的迁移量的方法, 并应用此方法对市售塑料和纸质餐具进行了迁移量检测, 得到了污染情况的初步数据, 为了解目前食品接触材料中 OPEs、OPAs 及 PBs 污染状况和风险提供了技术手段和数据支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 仪器

QTRAP<sup>TM</sup> 6500<sup>+</sup>液相色谱-三重四极杆质谱仪(美国 Sciex 公司); PF120 电热恒温鼓风干燥箱(英国 Carbolite 公司); Milli-Q 超纯水机(美国 Millipore 公司); ACQUITY UPLC BEH C<sub>18</sub> 色谱柱(100 mm×2.1 mm, 1.7  $\mu\text{m}$ , 美国 Waters 公司)。

### 1.2 试剂与材料

甲醇、乙酸铵(质谱级, 美国赛默飞世尔科技公司); 无水乙醇、冰乙酸(分析纯, 国药集团化学试剂有限公司); 实验用水为超纯水。

20 件塑料膜袋、10 件一次性外卖盒及 20 件纸制餐具为市售样品。

### 1.3 标准物质

磷酸三甲酯(trimethyl phosphate, TMP, 纯度 99%)、磷

酸三乙酯(triethyl phosphate, TEP, 纯度 99%)、磷酸三丙酯(tripropyl phosphate, TNPP, 纯度 99%)、磷酸三异丙酯(triisopropyl phosphate, TIPP, 纯度 93%)、磷酸三正丁酯(tributyl phosphate, TNBP, 纯度 99%)、磷酸三(2-氯乙基)酯[tris(2-chloroethyl) phosphate, TCEP, 纯度 98%]、磷酸三(2-氯丙基)酯[tris(1-chloro-2-propyl) phosphate, TCIPP, 纯度 99%]、磷酸三苯酯(triphenyl phosphate, TPHP, 纯度 99%)、磷酸三甲苯酯(tricresyl phosphate, TMPP, 纯度 99%)、磷酸三(1,3-二氯-2-丙基)酯[tris(1,3-dichloro-2-propyl) phosphate, TDCIPP, 纯度 98%]、磷酸三(2-丁氧乙基)酯[tris(2-butoxyethyl) phosphate, TBOEP, 纯度 96%]、磷酸三正戊酯(tri-n-amyolphosphate, TNPTP, 纯度 97%)、2-乙基己二苯基磷酸酯(2-ethylhexyl diphenyl phosphate, EHDPP, 纯度 92%)、磷酸三(2-乙基己基)酯[tris(2-ethylhexyl) phosphate, TEHP, 纯度 99%]、磷酸三(2-异丙基苯基)酯[tris(2-isopropylphenyl) phosphate, TIPPP, 纯度 99%]、三(2,4-二叔丁基)亚磷酸苯酯[tris(2,4-di-tert-butylphenyl) phosphite, AO168, 纯度 99%]、双(2,4-二叔丁基苯基)季戊四醇二亚磷酸酯[3,9-bis(2,4-di-tert-butylphenoxy)-2,4,8,10-tetraoxa-3,9-diphosphaspiro[5.5]undecane, AO626, 纯度 96%](德国 Dr. Ehrenstorfer 公司); 三(2,4-二叔丁基苯基)磷酸酯[tris(2,4-di-tert-butylphenyl) phosphate, AO168O, 纯度 98%](加拿大 Toronto Research Chemicals 公司); 3,5-二叔丁基-4-羟基苯基二乙基磷酸酯(diethyl 3,5-di-tert-butyl-4-hydroxybenzyl phosphate, AO1222, 纯度 99%)(坛墨质检标准物质中心); 亚磷酸苯二异辛酯(diisooctyl phenyl phosphite, DiOPPi, 纯度 95%)(上海麦克林生化科技股份有限公司); 4-羟基苯甲酸甲酯(methylparaben, MEP, 纯度 99%)、4-羟基苯甲酸丁酯(butylparaben, BUP, 纯度 99%)、4-羟基苯甲酸乙酯(ethylparaben, ETP, 纯度 99%)、4-羟基苯甲酸丙酯(propylparaben, PRP, 纯度 99%)(北方伟业计量集团有限公司)。所有标准物质配制成为质量浓度 100  $\mu\text{g}/\text{mL}$  的标准储备液。

#### 1.4 标准溶液配制

分别吸取标准储备液,以甲醇稀释为 OPEs、OPAs 质量浓度 1.00 mg/L、PBs 质量浓度 100.00  $\mu\text{g}/\text{L}$  混合标准使用液;分别吸取混合标准使用液 1、5、10、20、50、100、200  $\mu\text{L}$  至 1 mL 容量瓶中,分别用空白浸泡液定容至 1.00 mL。此标准系列中的 OPEs、OPAs 质量浓度为 1、5、10、20、50、100 和 200  $\mu\text{g}/\text{L}$ ; PBs 质量浓度为 0.1、0.5、1.0、2.0、5.0、10.0 和 20.0  $\mu\text{g}/\text{L}$ 。

#### 1.5 仪器条件

##### 1.5.1 质谱条件

质谱检测采用电喷雾离子源(electron spray ionization, ESI),正负离子切换模式,负离子模式: -4500 V,正离子模

式: 5500 V; 离子源温度 500  $^{\circ}\text{C}$ , 雾化气压力 60 psi, 辅助气压力 40 psi, 气帘气压力 30 psi; 采用多反应监测模式(multiple reaction monitoring, MRM)。各化合物的保留时间和定性定量离子对见表 1。

表 1 待测物的质谱参数

Table 1 Mass spectrum parameters of the analyte

类别	目标物	母离子 ( $m/z$ )	子离子 ( $m/z$ )	锥孔电压 /eV	碰撞能量 /eV
	TMP	141.2	109.0*、127.0	60	23、23
	TEP	183.1	99.1*、127.1	30	30、15
	TNPP	225.3	99.1*、141.0	40	30、14
	TIPP	225.3	99.1*、141.0	40	30、14
	TNBP	267.1	99.0*、155.0	40	24、14
	TCEP	284.9	99.0*、161.1	50	42、31
	TPHP	327.0	77.0*、153.2	100	57、33
OPEs	TCIPP	327.1	99.1*、251.1	100	28、13
	TMPP	369.1	166.0*、243.1	160	40、42
	TBOEP	399.0	199.2*、299.1	100	25、15
	TDCIPP	430.9	208.9*、99.1	100	23、42
	TNPTP	309.0	99.0*、169.1	60	34、20
	TEHP	435.2	99.3*、321.0	100	50、26
	EHDPP	363.0	251.2*、77.2	40	33、54
	TIPPP	453.2	369.0*、327.0	140	35、45
	AO168O	663.5	551.4*、495.1	160	34、44
	AO168	647.6	441.3*、347.5	130	44、50
OPAs	AO626	605.3	335.2*、279.2	130	26、36
	AO1222	357.3	301.4*、217.2	100	22、32
	DiOPPi	379.2	379.2*、351.0	130	13、30
	MEP	151.0	136.0*、91.9	-100	-18、-25
PBs	ETP	165.0	137.1*、92.0	-100	-18、-27
	PRP	178.9	137.0*、91.9	-100	-20、-28
	BUP	193.0	137.0*、92.0	-100	-21、-28

注: \*为定量离子。

##### 1.5.2 色谱条件

采用 ACQUITY UPLC BEH  $\text{C}_{18}$  色谱柱(100 mm $\times$ 2.1 mm, 1.7  $\mu\text{m}$ )为色谱分析柱, 流速 0.35 mL/min, 柱温 40  $^{\circ}\text{C}$ , 以 2 mmol 乙酸铵水溶液为流动相 A, 甲醇为流动相 B, 按照体积比进行梯度洗脱: 0~1.0 min, 90% A; 1.0~6.5 min, 90%~10% A; 6.5~8.0 min, 10% A; 8.0~11.0 min, 10%~0% A; 11.0~17.0 min, 0% A; 17.0~17.1 min, 0%~90%A; 17.1~22.0 min, 90% A。进样量为 2  $\mu\text{L}$ 。

#### 1.6 前处理方法

按照 GB 31604.1—2023《食品安全国家标准 食品接触材料及制品 迁移试验通则》及 GB 5009.156—2016《食品安全国家标准 食品接触材料及制品迁移试验预处理方法通则》要求, 选择 95%乙醇、4%乙酸、10%乙醇为浸泡

液, 采用 70 °C、2 h 为迁移条件, 在尽可能保持样品的原状态下, 对样品进行迁移实验, 取得浸泡液。其中: 塑料袋样品采用迁移测试池法, 塑料盒、纸杯、纸碗等样品采用直接灌装法, 包装纸、纸吸管、纸盒采用全浸没法。

取浸泡液样品 1.0 mL, 以 3000 r/min 转速离心 5 min, 转移上清液至进样瓶中待测。本实验所有玻璃器皿均经 450 °C 灼烧 4 h 以去除本底, 迁移池经甲醇多次淋洗烘干后使用。同时做空白试验。

### 1.7 计算方法

参考 GB 5009.156—2016 与范颖莹等<sup>[20]</sup>的方法, 对于有确定的使用情形的食品接触材料, 试验结果按照实际的试样接触面积与食品模拟物体积比( $S/V$ )进行换算; 对于无明确使用情形的食品接触材料, 试验结果按照  $S/V$  为 6 dm<sup>2</sup>/L 进行换算。

### 1.8 数据处理

本研究采用 WPS Office 2017 对数据进行整理和统计, 采用 OriginPro 2021 对数据进行绘图。本研究中每个实验

重复测定 3 次, 实验结果以 3 次测定的平均值计算。

## 2 结果与分析

### 2.1 色谱条件优化

本研究以 OPEs、OPAs 质量浓度为 20 μg/L, PBs 质量浓度为 2.0 μg/L 的标准溶液为样品, 分别对 ACQUITY UPLC BEH C<sub>18</sub> (100 mm×2.1 mm, 1.7 μm)、ACQUITY HSS T3 (100 mm×2.1 mm, 1.8 μm) 以及 ACQUITY UPLC Phenyl (100 mm×2.1 mm, 1.7 μm) 3 种色谱柱进行了筛选。本研究中 24 种待测组分的极性差别较大, 虽然部分组分在 T3 或者苯基柱上能呈现更好的峰型, 但综合所有待测物出峰情况看, 选择 ACQUITY UPLC BEH C<sub>18</sub> 作为后续实验中使用的色谱柱。本研究分别对甲醇及乙腈两种有机相, 2 mmol/L 乙酸铵、水、0.1% 甲酸 3 种水相作为流动相的效果进行了比较。在之前实验中发现, 乙酸铵浓度对于 OPEs 峰形影响较大<sup>[21]</sup>, 故虽然在甲醇-水体系中, PBs 峰高最大, 但综合 OPEs 结果, 后续实验继续采用甲醇-2 mmol 乙酸铵流动相为实验流动相, 24 种待测物质的选择离子流图如图 1 所示。

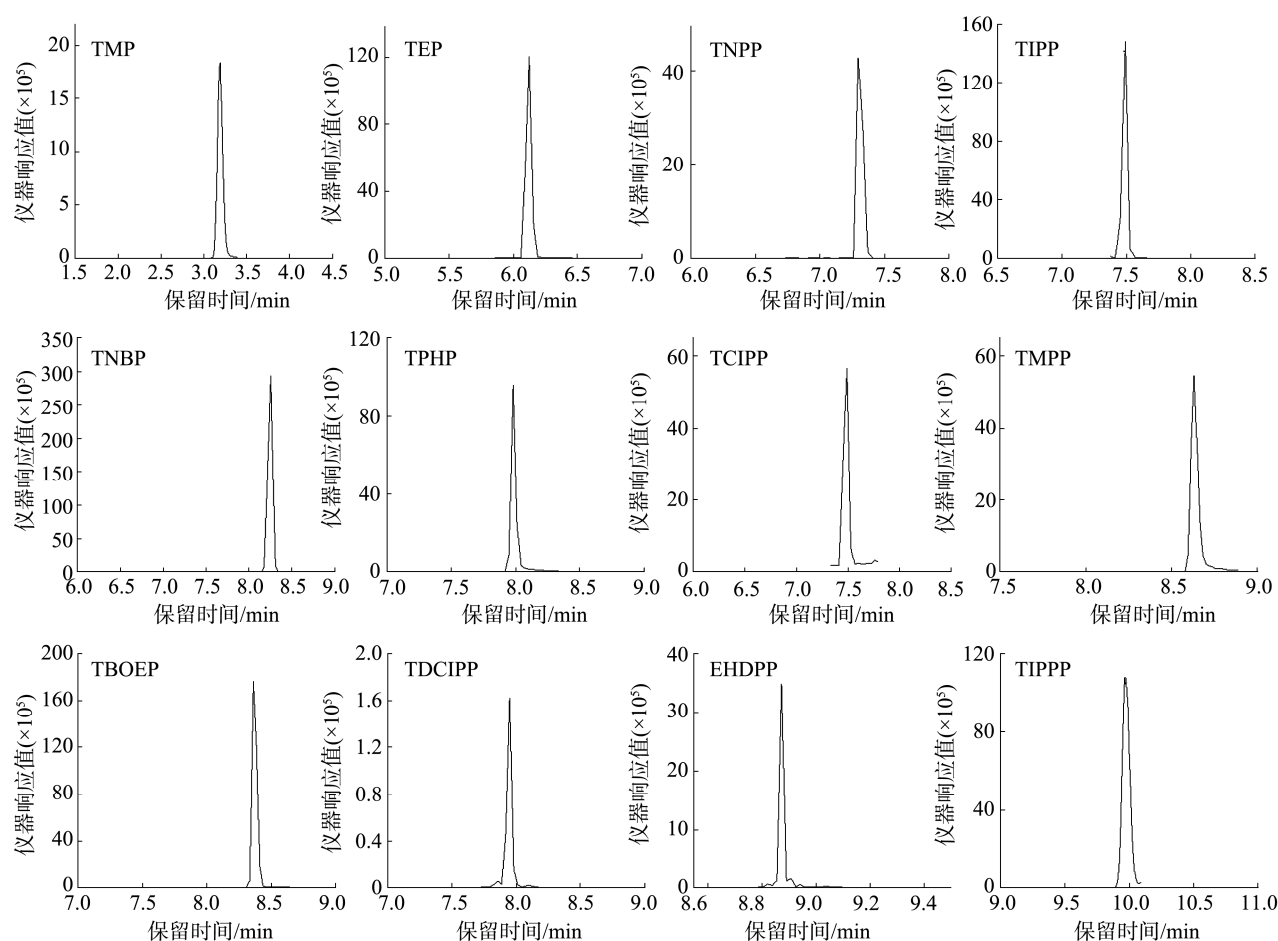


图 1 标准样品选择离子流图(50 μg/L)

Fig.1 Extracted ion chromatogram of standard sample (50 μg/L)

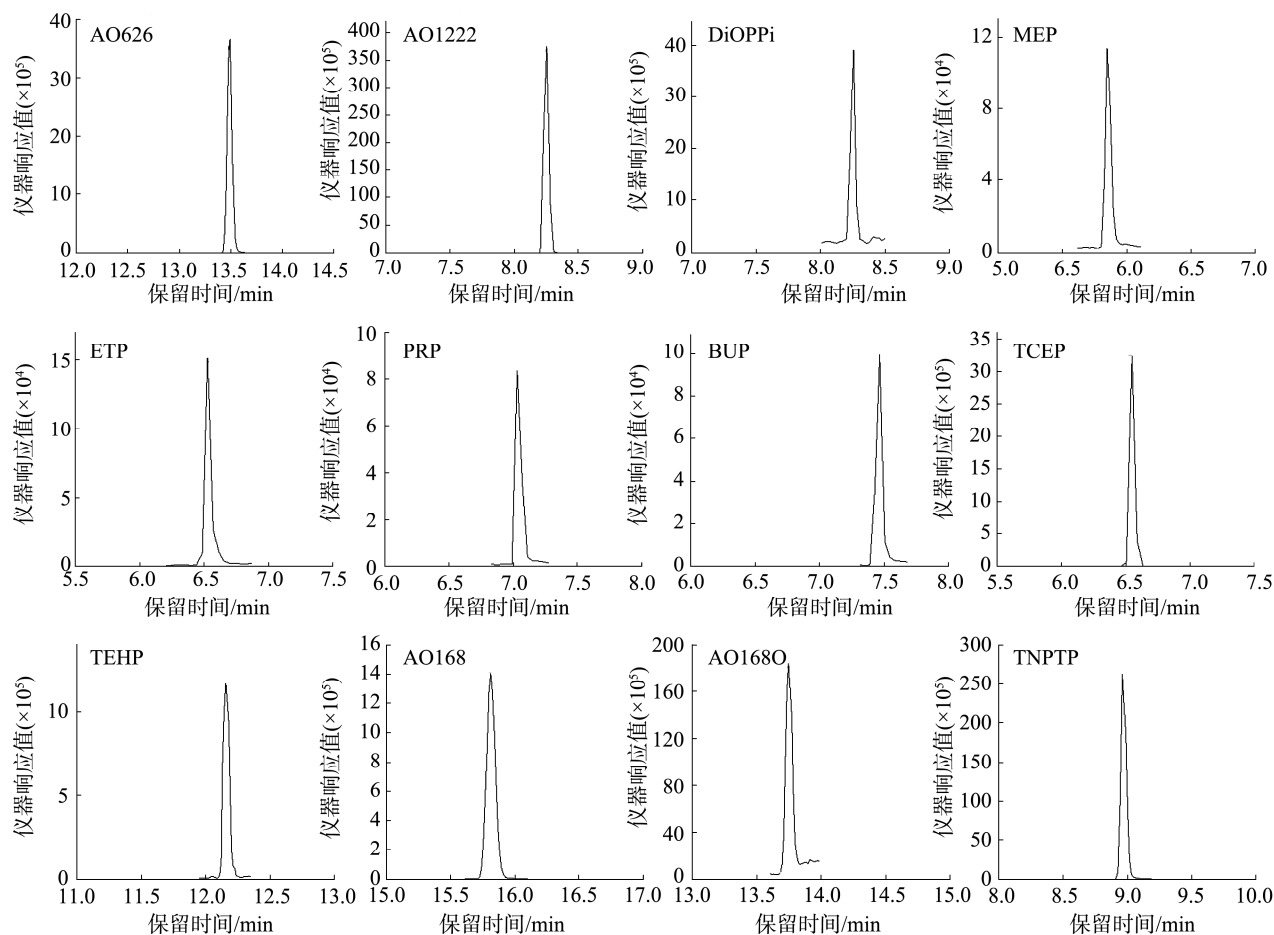


图 1(续) 标准样品选择离子流图(50 µg/L)

Fig.1 Extracted ion chromatogram of standard sample(50 µg/L)

## 2.2 前处理方式优化

在实验过程中发现不同的微孔滤膜对于待测物有一定的吸附作用或者会对实验产生污染。本研究分别对疏水聚四氟乙烯、亲水聚四氟乙烯、再生纤维素、尼龙、混合纤维素酯 5 种常见的微孔滤膜进行了测试,具体操作过程如下:取空白浸泡液,加入混合标准溶液,配制成 OPEs 和 OPAs 质量浓度为 10 µg/L, PBs 质量浓度为 1 µg/L 的基质加标溶液。将上述基质加标溶液分别通过 0.22 µm 微孔滤膜过滤后进行仪器测定,计算通过滤膜与未通过滤膜样品的峰面积比。实验结果可知,在各浸泡液中,采用滤膜对于 TNPP、TCEP 及 ETP 这 3 种化合物实验结果无影响(峰面积比在 70%~120%之间),对其他 21 种化合物测定结果会造成影响(见表 2)。故本研究后续实验中,采用迁移浸泡液离心取上清液测定。

## 2.3 基质效应

本研究采用侯敏敏等<sup>[22]</sup>的方法对基质效应(matrix effects, MEs)进行评价,具体方法如下:采用未经迁移实验的浸泡液为空白浸泡液。分别取 3 种空白浸泡液,加入混

合标准溶液和混合内标溶液,配制成 OPEs 和 OPAs 质量浓度为 10 ng/mL, PBs 质量浓度为 1 ng/mL 的基质加标溶液,按照前处理方法进行测定。比较基质加标溶液和纯甲醇中相同浓度待测物质的峰面积计算基质效应。结果表明,本研究中测定的 24 种待测物质中,16 种待测物质在 3 种浸泡液中的 MEs 范围在 80%~120%之间;TMPP、TEHP、EHDPP、TIPPP、TNPTP 在 10%乙醇和 4%乙酸中表现了基质抑制(MEs 范围 47.8%~62.0%);AO168、AO168O 及 AO626 在 4%乙酸中表现了基质抑制(MEs 范围 32.0%~36.4%)。本研究采用空白浸泡液配制基质曲线对样品进行定量,满足分析需求。

## 2.4 方法验证

### 2.4.1 线性范围、检出限及定量限

按照优化后的条件,将标准溶液按照从低到高的顺序依次进样,以目标物质与内标的浓度比为横坐标( $X$ , µg/L),峰面积比为纵坐标( $Y$ )进行线性回归计算。结果表明,本研究 15 种 OPEs、5 种 OPAs 在 1~200 µg/L 范围、4 种 PBs 在 0.1~20.0 µg/L 范围内在 3 种浸泡液中均具有良好的线性关系,线性相关系数大于 0.99。分别向 1 mL 空白浸泡液中加入 10 µg/L 水

表 2 不同微孔滤膜对实验结果影响(%)  
Table 2 Influence of different microporous membranes on experimental results (%)

化合物	95%乙醇					10%乙醇					4%乙酸				
	疏水聚四 氟乙烯	亲水聚四 氟乙烯	再生纤 维素	尼龙	混合纤 维素酯	疏水聚四 氟乙烯	亲水聚四 氟乙烯	再生纤 维素	尼龙	混合纤 维素酯	疏水聚四 氟乙烯	亲水聚四 氟乙烯	再生纤 维素	尼龙	混合纤 维素酯
TMP	101.2	95.8	57.0	73.2	56.1	103.4	100.3	94.7	96.7	94.7	103.8	103.6	107.8	108.3	105.6
TEP	100.8	105.0	138.2	116.3	103.6	984.0	97.6	99.9	102.0	90.8	102.5	104.1	109.0	109.2	105.6
TNPP	103.0	109.3	110.9	111.1	114.3	96.8	99.5	108.2	109.2	96.8	101.4	106.4	106.0	97.2	104.1
TIPP	116.2	113.2	159.9	154.0	178.4	91.1	108.7	83.0	93.6	76.5	96.7	87.8	140.8	136.0	136.0
TNBP	99.3	102.4	110.2	107.5	81.9	82.6	88.1	92.2	78.1	75.5	63.3	89.2	102.6	58.3	67.7
TCEP	96.5	101.9	82.4	88.2	81.6	96.7	94.3	87.5	98.6	86.0	103.2	105.1	107.8	116.1	112.5
TPHP	102.2	112.7	123.4	110.3	124.4	68.5	24.4	3.8	77.0	4.2	61.4	14.6	4.5	54.7	5.8
TCIPP	101.3	94.6	123.7	109.7	127.3	86.3	94.9	116.4	109.7	101.4	88.0	91.2	103.4	114.4	110.5
TMPP	105.7	112.2	125.1	113.2	128.0	24.3	18.8	8.0	56.0	19.7	45.9	39.1	67.7	16.8	19.5
TBOEP	98.6	103.7	115.2	108.9	97.7	63.5	86.1	91.7	528.0	63.8	50.3	83.9	97.7	55.0	67.7
TDCIPP	100.7	109.8	119.5	112.6	124.9	76.9	50.6	47.4	81.8	20.7	77.4	39.7	52.7	70.0	15.7
TNPTP	100.3	106.3	112.7	108.4	111.0	33.5	24.4	16.0	40.8	22.5	59.8	55.6	36.2	52.3	24.7
TEHP	85.7	100.2	155.2	121.8	134.7	106.0	18.8	105.6	407.8	364.6	24.6	64.9	18.5	103.7	36.5
EHDPP	111.3	139.7	72.2	77.6	84.1	20.0	27.1	20.2	110.8	43.0	63.8	114.6	55.7	28.2	26.6
TIPPP	99.9	104.4	111.9	105.9	112.7	29.1	7.2	44.6	395.7	242.5	18.5	39.1	292.8	106.4	26.0
AO168	108.1	102.6	143.5	103.1	108.9	66.6	19.4	42.7	524.0	54.8	27.2	60.5	24.0	289.0	55.4
AO168O	111.8	638.9	142.4	110.9	658.6	106.9	129.3	55.2	426.9	290.5	41.2	71.0	38.3	192.7	61.3
AO626	103.5	109.8	142.0	137.3	140.0	48.1	16.9	34.9	438.7	296.9	10.5	6.5	8.8	259.4	30.4
AO1222	99.2	96.0	112.9	104.7	64.7	66.8	75.2	92.5	59.5	55.9	52.4	57.7	90.0	57.0	42.5
DiOPPi	81.4	78.7	130.9	114.3	73.0	55.9	63.5	94.8	61.8	70.8	45.7	49.1	96.1	54.5	55.2
MEP	104.6	111.5	117.0	115.2	35.9	97.3	97.7	101.1	101.5	101.2	95.9	92.9	100.8	96.2	102.1
ETP	100.5	107.0	112.4	110.8	112.4	96.5	92.2	106.2	103.4	99.9	103.2	97.8	95.0	95.3	96.3
PRP	105.6	110.9	115.0	112.6	160.3	95.4	92.5	93.4	99.5	92.1	97.8	94.2	88.7	92.6	83.0
BUP	106.4	115.6	112.7	114.0	109.4	93.5	88.8	85.3	102.4	81.6	95.8	86.6	78.3	91.6	62.1

平 OPEs 及 OPAs、1  $\mu\text{g/L}$  的 PBs, 按照前处理方法进行测定, 本研究方法的检出限(limit of detection, LOD)按照 3 倍信噪比计算, 定量限(limit of quantitation, LOQ)按照 10 倍信噪比计算。如表 3 所示, 3 种浸泡液中 24 种待测组分的 LODs 范围为 0.01~0.58  $\mu\text{g/L}$ , LOQs 范围为 0.03~2.00  $\mu\text{g/L}$ , 能够满足检测要求。

#### 2.4.2 准确度及精密度

本研究采用空白浸泡液作为本底样品, 分别加入 OPEs、OPAs 为 10、50 和 100  $\mu\text{g/L}$  (PBs 为 1、5 和 10  $\mu\text{g/L}$ ) 水平的标准溶液, 每个浓度进行 6 次重复实验, 计算测定的回收率及精密度。本研究中 24 种待测物质的回收率范围为 72.2%~126.4%, 相对标准偏差 (relative standard deviations, RSDs) 范围为 0.5%~10.9%, 精密度及准确度可以满足检测的要求(见表 4)。

## 2.5 实际样品测定

本研究对 20 件塑料膜袋、10 件一次性外卖盒及 20 件纸制餐具的 OPEs、OPAs 与 PBs 进行了迁移实验及仪器测定, 并计算其迁移量。

### 2.5.1 OPEs 与 OPAs

OPEs 与 OPAs 中, 有 11 种组分检出, 检出率在 50% 以上的目标物质有 4 种, 分别是 AO168O(检出率 96.0%)、AO168(检出率 80.0%)、AO626(检出率 60.0%)、TPHP(检出率 58.0%)。在所有待测组分中, 在迁移液中含量最高的组分是 AO168 及 AO168O, 其中 AO168 质量浓度范围为 <LOD~950  $\mu\text{g/L}$ , AO168O 质量浓度范围为 <LOD~1243  $\mu\text{g/L}$ 。计算污染物总量,  $\Sigma\text{OPEs}$  范围为 <LOD~19.1  $\mu\text{g/L}$ (平均值 2.60  $\mu\text{g/L}$ ),  $\Sigma\text{OPAs}$  范围为 <LOD~1248  $\mu\text{g/L}$ (平均值 306  $\mu\text{g/L}$ ), 低于 ZHOU 等<sup>[2]</sup>及 BALASCH 等<sup>[18]</sup>研究。按照 GB 9685—2016《食品安全国家标准 食品接触材料及制品用添加剂使用标准》要求, AO168 可以作为食品接触材料添加剂使用, 对特定迁移量没有进行规定; 但 AO168O 不是食品接触材料添加剂。根据 ZHOU 等<sup>[23]</sup>的研究, AO168O 的污染主要来自 AO168 的广泛使用, 而目前针对食品接触材料中 OPAs 的监测研究还非常少, 需要特别关注。

表 3 线性范围、LODs 及 LOQs  
Table 3 Linear ranges, LODs and LOQs

化合物	线性范围 ( $\mu\text{g/L}$ )	95%乙醇			10%乙醇			4%乙酸		
		线性相 关系数	LODs ( $\mu\text{g/L}$ )	LOQs ( $\mu\text{g/L}$ )	线性相 关系数	LODs ( $\mu\text{g/L}$ )	LOQs ( $\mu\text{g/L}$ )	线性相 关系数	LODs ( $\mu\text{g/L}$ )	LOQs ( $\mu\text{g/L}$ )
TMP	1~200	0.9999	0.06	0.20	0.9983	0.01	0.03	0.9999	0.02	0.06
TEP	1~200	0.9997	0.01	0.03	0.9992	0.02	0.06	0.9993	0.02	0.06
TNPP	1~200	0.9998	0.03	0.09	0.9963	0.03	0.09	0.9945	0.02	0.06
TIPP	1~200	0.9974	0.04	0.12	0.9956	0.04	0.12	0.9935	0.03	0.10
TNBP	1~200	0.9974	0.01	0.03	0.9966	0.01	0.03	0.9963	0.01	0.03
TCEP	1~200	0.9992	0.02	0.06	0.9997	0.02	0.06	0.9970	0.02	0.06
TPHP	1~200	0.9997	0.03	0.10	0.9993	0.02	0.06	0.9991	0.02	0.06
TCIPP	1~200	0.9959	0.42	1.40	0.9976	0.31	1.10	0.9919	0.33	1.10
TMPP	1~200	0.9994	0.03	0.11	0.9977	0.03	0.10	0.9978	0.04	0.13
TBOEP	1~200	0.9937	0.01	0.03	0.9969	0.01	0.03	0.9981	0.01	0.03
TDCIPP	1~200	0.9987	0.10	0.34	0.9965	0.12	0.39	0.9958	0.06	0.18
TNPTP	1~200	0.9996	0.01	0.03	0.9971	0.01	0.03	0.9941	0.02	0.06
TEHP	1~200	0.9946	0.06	0.20	0.9940	0.22	0.70	0.9915	0.16	0.50
EHDPP	1~200	0.9942	0.15	0.50	0.9905	0.37	1.20	0.9937	0.26	0.85
TIPPP	1~200	0.9916	0.01	0.03	0.9943	0.01	0.03	0.9906	0.01	0.03
AO168	1~200	0.9985	0.01	0.03	0.9998	0.01	0.03	0.9982	0.01	0.03
AO168O	1~200	0.9976	0.02	0.06	0.9996	0.02	0.06	0.9987	0.03	0.10
AO626	1~200	0.9995	0.01	0.03	0.9996	0.01	0.03	0.9993	0.03	0.10
AO1222	1~200	0.9929	0.01	0.03	0.9961	0.01	0.03	0.9917	0.01	0.03
DiOPPi	1~200	0.9930	0.35	1.20	0.9977	0.39	1.30	0.9984	0.58	2.00
MEP	0.1~20.0	0.9996	0.02	0.06	0.9996	0.02	0.06	0.9994	0.02	0.06
ETP	0.1~20.0	0.9997	0.02	0.06	0.9999	0.02	0.06	0.9993	0.02	0.06
PRP	0.1~20.0	0.9999	0.02	0.06	0.9998	0.02	0.06	0.9998	0.02	0.06
BUP	0.1~20.0	0.9999	0.02	0.06	0.9998	0.02	0.06	0.9994	0.02	0.06

表 4 精密度及准确度( $n=6$ )  
Table 4 Precision and accuracy ( $n=6$ )

浸泡液	化合物	本底样品浓度 /( $\mu\text{g/L}$ )	低浓度加标(10/1 $\mu\text{g/L}$ )		中浓度加标(50/5 $\mu\text{g/L}$ )		高浓度加标(100/10 $\mu\text{g/L}$ )	
			平均回收率/%	RSDs/%	平均回收率/%	RSDs/%	平均回收率/%	RSDs/%
95%乙醇	TMP	<LOD	97.0	0.8	96.1	0.7	99.9	0.7
	TEP	<LOD	99.8	1.8	98.5	2.8	101.6	1.3
	TNPP	<LOD	112.8	3.0	107.4	3.9	105.9	3.1
	TIPP	<LOD	77.9	8.8	85.8	7.5	110.9	3.7
	TNBP	<LOD	121.8	6.4	111.1	5.9	101.1	4.8
	TCEP	<LOD	107.3	2.0	102.3	2.7	103.3	2.1
	TPHP	<LOD	109.8	3.8	107.1	2.7	108.3	1.1
	TCIPP	<LOD	110.2	4.0	105.1	6.0	101.3	5.4
	TMPP	<LOD	101.2	4.2	100.4	3.3	100.8	3.3
	TBOEP	<LOD	119.2	4.3	112.9	2.0	106.7	1.9
	TDCIPP	<LOD	103.6	2.0	100.9	2.5	101.9	1.8
	TNPTP	<LOD	115.1	2.7	106.6	3.9	102.2	2.5
	TEHP	<LOD	101.9	7.2	110.2	6.8	94.5	6.7
	EHDPP	<LOD	95.4	10.4	88.4	9.7	90.1	8.2
	TIPPP	<LOD	121.7	1.2	115.1	1.5	109.8	1.2
	AO168	<LOD	109.3	1.6	106.8	1.3	107.5	1.3
	AO168O	2.41	115.7	1.9	109.7	2.6	106.0	1.6
	AO626	0.714	106.7	1.3	102.9	2.1	103.8	2.0
	AO1222	<LOD	122.9	2.7	105.5	3.6	91.2	1.4
	DiOPPi	<LOD	111.1	8.6	105.0	7.9	90.3	7.6
	MEP	<LOD	75.0	10.0	83.2	3.2	102.8	0.7
	ETP	<LOD	119.6	5.0	102.9	4.5	105.3	1.2
	PRP	<LOD	79.9	8.9	92.1	4.7	103.3	1.5
BUP	<LOD	74.9	10.4	85.7	4.0	100.4	2.7	
10%乙醇	TMP	0.138	96.5	1.1	99.5	1.2	100.1	0.5
	TEP	<LOD	99.8	2.4	104.6	1.4	102.9	1.0
	TNPP	<LOD	119.7	2.7	120.6	2.8	112.2	3.4
	TIPP	0.0406	92.0	8.6	103.1	8.8	102.5	8.4
	TNBP	<LOD	111.1	6.2	113.6	6.1	115.5	5.3
	TCEP	<LOD	112.3	2.2	112.7	2.4	106.0	4.1
	TPHP	0.0636	116.5	3.0	109.6	4.5	110.6	4.5
	TCIPP	<LOD	121.6	3.4	122.5	2.1	109.6	3.0
	TMPP	0.773	94.2	2.5	103.2	3.1	104.0	3.3
	TBOEP	<LOD	119.0	4.1	115.1	3.8	110.9	2.5
	TDCIPP	<LOD	111.4	4.8	110.7	2.4	108.6	2.6
	TNPTP	0.179	94.0	6.9	102.3	7.0	112.4	3.3
	TEHP	<LOD	74.4	6.0	89.2	6.0	101.2	6.4
	EHDPP	<LOD	78.7	8.1	105.2	8.5	102.5	7.7
	TIPPP	0.128	77.7	1.7	104.7	1.3	107.4	1.8
	AO168	<LOD	107.4	2.1	105.9	1.3	103.4	1.2
	AO168O	1.23	114.6	3.9	112.8	2.8	108.6	3.1
	AO626	0.489	107.6	4.3	112.9	3.7	111.8	4.2
	AO1222	<LOD	114.4	4.7	112.2	3.6	94.7	3.4
	DiOPPi	<LOD	101.1	8.8	94.6	6.9	99.2	5.3
	MEP	<LOD	108.3	9.5	100.5	6.9	101.0	1.3
	ETP	<LOD	104.2	9.4	103.7	1.9	103.4	2.0
	PRP	<LOD	106.6	9.8	96.2	4.9	99.4	1.3
BUP	<LOD	93.2	10.6	95.8	1.4	99.9	2.2	
4%乙酸	TMP	<LOD	102.0	0.6	99.1	0.7	99.1	0.7
	TEP	<LOD	104.9	1.5	100.6	1.7	98.7	0.8
	TNPP	<LOD	108.4	3.3	100.4	3.1	95.7	2.8
	TIPP	<LOD	107.3	9.1	94.9	7.0	92.4	5.7
	TNBP	<LOD	119.1	5.4	106.6	4.1	113.8	3.3
	TCEP	0.0216	112.1	2.6	107.5	1.4	108.2	1.2
	TPHP	<LOD	116.8	3.2	108.9	1.9	110.7	1.6
	TCIPP	<LOD	117.2	5.2	113.4	5.5	108.7	4.9
	TMPP	<LOD	82.2	4.2	95.9	4.1	100.5	5.1
	TBOEP	0.235	110.7	3.7	115.4	4.5	107.5	3.1
	TDCIPP	<LOD	119.2	3.2	108.1	2.3	108.2	1.2

表 4(续)

化合物	本底样品浓度 ( $\mu\text{g/L}$ )	低浓度加标(10/1 $\mu\text{g/L}$ )		中浓度加标(50/5 $\mu\text{g/L}$ )		高浓度加标(100/10 $\mu\text{g/L}$ )		
		平均回收率/%	RSDs/%	平均回收率/%	RSDs/%	平均回收率/%	RSDs/%	
TNTP	0.151	72.2	1.4	100.2	5.3	99.3	5.2	
TEHP	0.0508	82.6	10.9	89.9	7.6	103.8	5.7	
EHDPP	1.81	82.6	9.8	79.6	9.1	84.9	4.4	
TIPPP	<LOD	78.8	10.8	96.0	7.2	109.1	4.6	
AO168	0.555	83.4	7.9	80.8	4.6	94.5	2.9	
AO168O	1.44	79.9	8.9	73.5	4.3	82.0	4.3	
4%乙酸	AO626	<LOD	82.9	10.1	82.4	6.1	100.9	5.3
	AO1222	<LOD	126.4	2.4	109.4	1.8	91.8	2.1
	DiOPPi	<LOD	103.2	10.3	96.0	3.4	90.4	4.0
	MEP	<LOD	85.6	10.9	94.2	7.5	100.1	1.5
	ETP	<LOD	88.7	8.6	97.4	4.3	100.0	1.5
	PRP	<LOD	106.4	6.2	99.0	5.5	100.6	1.6
	BUP	<LOD	106.8	7.6	98.7	2.3	100.5	0.7

本研究也将迁移量结果与饮食、室内灰尘、医用用品中 OPEs、OPAs 含量进行了比较。比较发现, 本研究中 OPEs 迁移量结果低于食品及室内灰尘中的含量<sup>[24-26]</sup>。而本研究 OPAs 迁移量结果高于 ZHOU 等<sup>[23]</sup>对于外卖食品中的 OPAs 含量( $\Sigma$ OPAs 范围为 1.35~360  $\mu\text{g/kg}$ , 平均值 15.6  $\mu\text{g/kg}$ ), 与乳制品中的 OPAs 含量相近( $\Sigma$ OPAs 范围为 2.48~3951  $\mu\text{g/kg}$ , 平均值 107  $\mu\text{g/kg}$ )<sup>[6]</sup>; 远远低于对医用用品( $\Sigma$ OPAs 范围为 20000~575000  $\text{ng/g}$ , 平均值 175000  $\text{ng/g}$ )<sup>[27]</sup>及室内灰尘含量( $\Sigma$ OPAs 范围为 220~30731  $\text{ng/g}$ )<sup>[28]</sup>。

### 2.5.2 PBs

在 4 种 PBs 中, MEP 和 ETP 检出率和浓度相对较高, 为 MEP(检出率 36.0%, 质量浓度范围<LOD~0.268  $\mu\text{g/L}$ ); ETP(检出率 30.0%, 质量浓度范围<LOD~0.241  $\mu\text{g/L}$ )。 $\Sigma$ PBs 范围为<LOD~0.501  $\mu\text{g/L}$ , 平均值 0.066  $\mu\text{g/L}$ , 其中, MEP 和 ETP 占  $\Sigma$ PBs 的比例>85.5%。其中, 按照 GB 9685—2016 要求, MEP 及 PRP 可以作为食品接触材料添加剂使用, 对特定迁移量没有进行规定。而本研究结果中 MEP 及 ETP 迁移量也低于 GB 2760—2024《食品安全国家标准 食品添加剂使用标准》中二者的最大使用量。

将本研究结果与个人护理产品、药品和食品中 PBs 含量进行比较得出, 目前食品包装材料的 PBs 迁移量较低<sup>[29-32]</sup>。但按照 BIAN 等<sup>[33]</sup>的研究, 食品包装材料中释放的 PBs 含量的量会随着与食品接触时间和温度的增加而增加, 从而增加 PBs 的暴露风险。因此, 针对食品接触材料实际情况的监测还是很有必要的。

## 3 结 论

本研究通过优化色谱和质谱条件, 采用基质匹配标准曲线定量, 建立了一种液相色谱-串联质谱法同时测定食品接触材料中 OPEs、OPAs 和 PBs 迁移量的测定方法。结果表明, 该方法操作简单, 灵敏度高, 并具有良好的精密度和准确度, 可应用于大量食品接触材料样品 OPEs、OPAs 和 PBs 的迁移量测定, 可作为后续进一步开展食品

接触材料中 OPEs、OPAs 和 PBs 的监测和评估的检测手段。

本研究通过对塑料膜袋、一次性外卖盒及纸制餐具的检测获得了食品接触材料中 OPEs、OPAs 和 PBs 污染的初步数据。但考虑到本次研究涉及到的食品接触材料样品的种类、数量、采样来源等都有局限性, 未能全面反映食品接触材料的污染情况, 还需进一步扩大监测范围。

### 参考文献

- [1] HAN B, SHANG Y, WANG H, *et al.* Prevalence of synthetic phenolic antioxidants in food contact materials from China and their implications for human dietary exposure through take-away food [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2024, 473: 134599.
- [2] ZHOU R, GENG J, JIANG J, *et al.* Occurrence and migration of organophosphite and organophosphate esters into food simulants from single-use food packaging in China [J]. *Environmental Pollution*, 2023, 330: 121782.
- [3] MIAO S, WANG X, ZHU Q, *et al.* Migration patterns of organophosphate esters from plastic food packaging simulants to foods: Donors, behaviours, and influencing factors [J]. *Environmental Science & Technology*, 2024, 954: 176272.
- [4] GROH KJ, GEUEKE B, MARTIN O, *et al.* Overview of intentionally used food contact chemicals and their hazards [J]. *Environment International*, 2021, 150: 106225.
- [5] MUNCKE J, ANDERSSON AM, BACKHAUS T. A vision for safer food contact materials: Public health concerns as drivers for improved testing [J]. *Environment International*, 2023, 180: 108161.
- [6] ZHOU RZ, GENG JQ, JIANG J, *et al.* Contamination of dairy products with tris(2,4-di-tert-butylphenyl) phosphite and implications for human exposure [J]. *Food Chemistry*, 2024, 448: 139144.
- [7] LEE A, CHOI S, PARK NY, *et al.* Effects of dietary sources and personal care products on paraben exposure in young Korean adults: A crossover intervention study [J]. *Chemosphere*, 2025, 374: 144209.
- [8] WANG X, DONG SJ, ZHU QQ, *et al.* Nationwide investigation on organophosphate flame retardants in tea from China: Migration from packaging materials and implications for global risk assessment [J]. *Environmental Science & Technology*, 2024, 58: 14786-14796.
- [9] LU LJ, XIONG WM, LI XJ, *et al.* Determination of the migration of eight parabens from antibacterial plastic packaging by liquid chromatography-

- electrospray ionization-tandem mass spectrometry [J]. *Analytical Methods*, 2014, 6(7): 2096–2101.
- [10] HWANG M, CHOI K, PARK C, *et al.* Urinary levels of phthalate, bisphenol, and paraben and allergic outcomes in children: Korean national environmental health survey 2015–2017 [J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, 818: 151703.
- [11] KLEY M, STUCHELI S, RUFFINER P, *et al.* Potential antiandrogenic effects of parabens and benzophenone-type UV-filters by inhibition of 3 $\alpha$ -hydroxysteroid dehydrogenases [J]. *Toxicology*, 2024, 509: 153997.
- [12] HANSEL M, LUBINA KA, ROEPKE TA, *et al.* Maternal organophosphate esters and sex steroid hormones in mid-pregnancy [J]. *Environmental Research*, 2025, 271: 121063.
- [13] LI Y, ZHENG Z, LUO D. Reproductive hormones, organophosphate esters and semen quality: Exploring associations and mediation effects among men from an infertility clinic [J]. *Environmental Research*, 2024, 240(1): 117458.
- [14] ROCK KD, ARMOUR GS, HORMAN B. Effects of prenatal exposure to a mixture of organophosphate flame retardants on placental gene expression and serotonergic innervation in the fetal rat brain [J]. *Toxicological Sciences*, 2020, 176(1): 203–223.
- [15] World Health Organization & International Programme on Chemical Safety. Flame retardants: Tris(chloropropyl) phosphate and tris(2-chloroethyl) phosphate [R]. ROME: WHO, 1998.
- [16] GONG XY, ZHANG WJ, ZHANG SY, *et al.* Organophosphite antioxidants in mulch films are important sources of organophosphate pollutants in farmlands [J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(11): 7398–7406.
- [17] SHI J, XU C, XIANG L, *et al.* Tris(2,4-di-tert-butylphenyl) phosphate: An unexpected abundant toxic pollutant found in PM<sub>2.5</sub> [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(17): 10570–10576.
- [18] BALASCH A, MORENO T, ELIJARRAT E, *et al.* Assessment of daily exposure to organophosphate esters through PM<sub>2.5</sub> inhalation, dust ingestion, and dermal contact [J]. *Environmental Science & Technology*, 2023, 57(49): 20669–20677.
- [19] WANG X, WANG W, ZHU Q, *et al.* Organophosphate esters in foodstuffs from multiple provinces in China: Possible sources during food processing and implications for human exposure [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2022, 70: 8609–8618.
- [20] 范颖莹, 阿文伟, 黄家惠, 等. 气相色谱-质谱法测定食品接触材料中 9,9-双(甲氧基甲基)芴的迁移量[J]. *食品安全质量检测学报*, 2025, 16(1): 8–14.
- FAN YY, A WW, HUANG JH, *et al.* Determination of 9,9-bis(methoxymethyl)fluorene migration in food contact materials by gas chromatography-mass spectrometry [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2025, 16(1): 8–14.
- [21] 袁蕊, 崔霞, 佟晶, 等. 全自动固相萃取-液相色谱串联质谱法同时测定饮用水中 21 种有机磷酸酯及其代谢产物[J]. *卫生研究*, 2024, 53(1): 109–116, 172.
- YUAN R, CUI X, TONG J, *et al.* Simultaneous determination of 21 organophosphate esters and their metabolites in drinking water by automatic solid phase extraction-liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. *Journal of Hygiene Research*, 2024, 53(1): 109–116, 172.
- [22] 侯敏敏, 史亚利, 蔡亚岐. 液液提取-固相萃取-高效液相色谱-串联质谱测定人体血液中 16 种有机磷酸酯[J]. *色谱*, 2021, 39(1): 69–76.
- HOU MM, SHI YL, CAI YQ. Determination of 16 organophosphate esters in human blood by high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry combined with liquid-liquid extraction and solid phase extraction [J]. *Chinese Journal of Chromatography*, 2021, 39(1): 69–76.
- [23] ZHOU RZ, GENG JQ, JIANG J, *et al.* Emerging organophosphite and organophosphate esters in takeaway food and the implications for human exposure [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2024, 31: 32588–32598.
- [24] CHEN XW, LIANG XH, YANG JY, *et al.* High-resolution mass spectrometry-based screening and dietary intake assessment of organophosphate esters in foodstuffs from South China [J]. *Science of The Total Environment*, 2023, 905: 167169.
- [25] CUI X, YAO SY, JIA HX, *et al.* Organophosphate esters and their metabolites in Beijing total diets: Occurrence, time trend, and dietary exposure assessment [J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2024, 194: 115103.
- [26] HU QP, XU L, LIU Y, *et al.* Co-occurrence and distribution of organophosphate tri- and di-esters in indoor dust from different indoor environments in Guangzhou and their potential human health risk [J]. *Environmental Pollution*, 2020, 262: 114311.
- [27] LIU RZ, MABURY SA. Single-use face masks as a potential source of synthetic antioxidants to the environment [J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2021, 8: 651–655.
- [28] LIU RZ, MABURY SA. Organophosphite antioxidants in indoor dust represent an indirect source of organophosphate esters [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(4): 1805–1811.
- [29] GÁLVEZ-ONTIVEROS Y, MOSCOSO-RUIZ I, RODRIGO L, *et al.* Presence of parabens and bisphenols in food commonly consumed in Spain [J]. *Foods*, 2021, 10(1): 92.
- [30] LI C, ZHAO Y, LIU S, *et al.* Exposure of Chinese adult females to parabens from personal care products: Estimation of intake via dermal contact and health risks [J]. *Environmental Pollution*, 2021, 272: 116043.
- [31] LI YY, ZHENG N, SUN SY, *et al.* Exposure estimates of parabens from personal care products compared with biomonitoring data in human hair from Northeast China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2023, 267: 115635.
- [32] 周羽晗, 袁榕穗, 段玉林, 等. 高效液相色谱法同时测定医用敷料类医疗器械产品中 17 种对羟基苯甲酸酯类化合物的含量[J]. *理化检验-化学分册*, 2024, 60(12): 1252–1256.
- ZHOU YH, YUAN RS, DUAN YL, *et al.* Simultaneous determination of 17 hydroxybenzoate compounds in medical dressing category medical device products by high performance liquid chromatography [J]. *Physical Testing and Chemical Analysis (Part B: Chemical Analysis)*, 2024, 60(12): 1252–1256.
- [33] BIAN LL, LI SH, GE X, *et al.* Determination of bisphenols, triclosan, and parabens in bottled water by solid-phase microextraction combined with gas chromatography-tandem mass spectrometry and assessment of the associated health risk [J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2023, 123: 105548.

(责任编辑: 韩晓红 安香玉)