外卖食品接触材料中有害物质迁移研究进展

施思倩, 姚卫蓉*
(江南大学食品学院, 无锡 214122)

摘 要: 近年来外卖行业发展迅速, 随之产生的食品接触材料安全问题也不容忽视。食品接触材料(food contact material, FCM)由于反应副产物、低聚物、降解过程、包装材料与食品之间的化学反应或生产所用原料中的杂质而含有有害物质, 在与食品接触时这些物质会迁移至食品中从而对人体造成危害。常见外卖食品接触材料为塑料与纸制品, 其中含有塑化剂、抗氧化剂、光稳定剂等添加剂, 而传统中式食品又以高温、高油食品为主, 在使用一次性餐具盛装该类外卖食品时, 添加剂极可能迁移到相关外卖食品中, 具有较大的安全风险与隐患。本研究对常见外卖食品接触材料中主要有害物质的性质、检测方法与迁移研究现状进行了简述, 概述外卖食品接触材料中有害物质的迁移情况, 给外卖食品接触材料的安全监管提供一定参考依据。

关键词: 外卖食品; 接触材料; 有害物质; 迁移

Research progress on migration of harmful substances in takeaway food contact materials

SHI Si-Qian, YAO Wei-Rong*
(*Department of Food Quality and Safety*, *Jiangnan University*, *Wuxi* 214122, *China*)

ABSTRACT: In recent years, with the rapid development of takeout industry, the safety problems of food contact materials cannot be ignored. Food contact material (FCM) contains harmful substances due to reaction by-products, oligomers, degradation process, chemical reaction between packaging materials and food or impurities in raw materials used in production. In contact with food, these substances will migrate into food, thus causing harm to human body. Common take-away food contact materials are plastic and paper products, which contain plasticizers, antioxidants, light stabilizers and other additives. Traditional Chinese food is mainly high temperature and high oil food, when disposable tableware is used to hold this type of take-out food, additives are likely to migrate into the food, which has great safety risks and hidden dangers. This paper briefly described the properties, detection methods and migration research status of the main harmful substances in common take-away food contact materials, so as to understand the migration of harmful substances in take-away food contact materials, thus providing certain reference basis for the safety supervision of take-out food contact materials.

KEY WORDS: takeaway food; contact materials; harmful substances; migration

1 引 言

近年来, 由于居民生活水平的不断提高, 生活节奏的加快和消费观念的更新, 外出就餐已成时尚。随着餐饮行业竞争的加剧, 越来越多的餐饮企业将重点放在了餐品的外送上。数据显示, 2015~2019 年我国外卖行业交易金额总

*通讯作者: 姚卫蓉, 教授, 主要研究方向为食品质量与安全。E-mail: yaoweirongcn@jiangnan.edu.cn
***Corresponding author:** YAO Wei-Rong, Professor, Department of Food Quality and Safety, Jiangnan University, Wuxi 214122, China. E-mail: yaoweirongcn@jiangnan.edu.cn

体呈逐年增长态势, 2019 年外卖行业交易金额达 6035 亿元, 较 2018 年增长了 30.82%; 外卖用户规模从 2015 年的 2.10 亿人增长到 2019 年的 4.16 亿人, 一些餐饮店通过网络销售的外卖销售额甚至超过实体店[1]。

在外卖行业快速发展的同时, 随之而来的外卖食品安全问题也不容忽视。外卖食品种类繁多, 涉及高温、高油、多汁食品, 为了满足成本低、方便卫生、防漏等要求, 常使用一次性餐具作为盛具进行售卖。为了改善一次性餐具的加工和使用性能, 在生产过程中常常会加入各种添加剂, 加上反应过程中某些单体残留, 与食品直接接触时, 这些物质很有可能会从包装迁移到食品中, 对人体造成危害。本文通过对外卖食品接触材料的种类、常见有害物质及其向食品模拟物/食品中的迁移情况进行研究, 为日后外卖食品接触材料的安全监管提供参考。

2　常见外卖食品接触材料及迁移有害物

2.1　常见外卖食品接触材料

常见的食品包装材料有金属、塑料、陶瓷、玻璃等, 其中塑料耐热与隔油效果较好, 价格低廉, 成为热食、汤面等外卖食品的主要包装; 纸塑包装因为环保、易加工等优点, 被广泛用于沙拉、披萨等对包装要求相对较低的外卖食品的包装。

一次性塑料餐饮具的材质主要包括聚丙烯(polypropylene, PP)、聚苯乙烯(polystyrene, PS)与聚对苯二甲酸乙二醇酯(polythylene terephthalate, PET)塑料。PP 是一种以聚丙烯为主要原料制备成的半结晶热塑性塑料, 具有耐热性能好、耐冲击、抗多种有机溶剂和酸碱腐蚀等优点, 无毒无味。PP 材料产品的表面光泽美观, 对紫外线非常敏感, 因此抗老化性能较差, 通常需要加入添加剂解决; PS 由苯乙烯单体经自由基缩聚反应合成, 在未着色时透明, 光泽和透明度很好, 具有环保无毒、可塑性好、抗氧化等优点, 常用于制作文具、杯子、食品容器、家电外壳、电气配件等; PET 材料, 俗称涤纶树脂, 是热塑性聚酯中最主要的品种, 由对苯二甲酸与乙二醇缩聚制成, 具有耐摩擦、耐高温等诸多性能, 可制成 PET 饮料瓶、衣服、包装[2,3]。

2.2　常见迁移有害物及其含量

外卖食品接触材料中含有的化学物质包括允许添加物质, 即故意添加物质(intentionally added substances, IAS), 如塑化剂、抗氧化剂等用于改善材料性能的添加剂, 与非故意添加物质(non-intentionally added substances, NIAS),即生成过程中形成的反应中间体、分解或反应产物[4], 如芳香族伯胺、重金属等。由于有害物的摄入量通常包括包装中可能迁出的含量以及食品中本身的含量, 因此在进行迁移研究前有必要对食品中本底带入的有害物质含量与包装中初始的有害物质含量进行简述。

2.2.1　塑化剂

塑化剂为塑料中最常见的添加剂, 添加后能够降低高分子材料的转变温度从而使其变得更加柔软或直接液化, 增强其柔软性、延展性等特性。邻苯二甲酸酯类(phthalic acid esters, PAEs)为目前在高分子材料中使用的主要增塑剂, 存在广泛、难降解, 并且极易在生物体内富集, 对人类的健康有较大的危害。多项研究证明这类化合物具有肝脏毒性、肾脏毒性、致癌、致畸与生殖毒性[5]。

Yong 等[6]对大棚种植的辣椒和食用植物油中塑化剂含量进行研究, 发现使用塑料薄膜增加了环境中的 PAEs 含量, 进而导致蔬菜中 PAEs 的残留也大大增加, 较多批次的食用植物油中塑化剂含量高于参考限量[7]。吕晓静[8]结合超声萃取、气相色谱-质谱联用仪(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)检测方法对食品纸包装中 3 种 PAEs 进行检测, 比较了 4 种有机溶剂的超声萃取效果, 结果显示乙酸乙酯总含量提取效果最好, 并且以 24 种食品纸包装为检测对象, 发现 24 种食品纸包装中均含 3 种目标 PAEs。

由于塑料制品为外卖食品的主要包装材料, 外卖食品中塑化剂污染风险也随之增加。孟湘君[9]对不同饮食习惯的人体内 PAEs 含量进行调查, 发现前一天外出用餐的受访者较家中用餐的人平均高出 35%, 说明如今外卖食品已成为人体摄入塑化剂的重要来源之一。

2.2.2　光稳定剂

光稳定剂是一类为防止塑料制品光老化而加入的添加剂, 主要通过屏蔽、反射紫外线, 或者猝灭被紫外线激发的分子或基团的激发态等机理保护聚合物材料不被光氧化。受性质的影响, 不同种类塑料与不同种类食品接触时, 食品中光稳定剂的浓度也不同。Wang 等[10]检测塑料包装的矿泉水、食用油、碳酸饮料等中的紫外线吸收剂与抗氧化剂含量, 发现除短期储存矿泉水外, 长期储存矿泉水、红茶、大豆油等都有检测出相应添加剂。Fan 等[11]采用磁性固相萃取技术提取塑料包装中的紫外线吸收剂和光稳定剂, 处理 10 min 即可达到吸附平衡, 测得食品样品与包装中紫外线吸收剂和光稳定剂含量均为 μg/g 级别。

2.2.3　芳香族伯胺

芳香族伯胺(primary aromatic amines, PAAs)作为一类重要的化学中间体和原料, 可用于生产一系列的工业产品。食品接触材料中 PAAs 的来源主要有(1)塑料原料生产过程中使用的一些含有芳香胺基团的物质或助剂, 在受热等条件下释放出芳香胺; (2)塑料合成过程中使用的某些交联剂和扩链剂; (3)塑料原料中使用了某些含有偶氮染料组分的色粉等物质, 在一定条件下偶氮组分发生分解形成各种芳香胺物质。研究表明 PAAs 具有一定的致癌性, 并能够诱发白血病。过去几年中欧盟不同国家/地区多次向食品和饲料快速预警系统(rapid alert system for food and feed,

RASFF)发送有关食品接触材料中 PAAs 的通知，说明对食品接触材料中的 PAAs 含量及迁出进行研究与控制至关重要[10]。Chen 等[12]探索了一种毛细管电泳检测食品中芳香胺的方法，将该方法用于分析复合食品包装袋中迁移的微量芳香伯胺后发现可在 3 种复合食品包装袋中检测到 4, 4′-二氨基苯甲烷和 2, 4-二氨基甲苯。

2.2.4 单 体

塑料树脂合成过程中可能存在残留的单体有未聚合的游离单体、裂解物、降解物等，这些单体具有致癌、致畸、神经毒性等，迁移到食品中被人体食用后会造成一定的危害[13]。常见的单体有苯乙烯、氯乙烯、双酚 A、异氰酸酯等[14]。朱文亮等[15]采用顶空气相色谱法测定塑料中 7 种单体残留，结果显示检测的 5 种样品包装均为均未检测到相关残留。

2.2.5 重金属

塑料及纸塑材料中的重金属主要来源于生产原料、添加剂、彩色颜料和生产环境污染。重金属来源广泛，在奶制品、蔬菜、肉制品等食品中均有存在[16–18]，蓄积性强，因此重金属污染问题也是目前食品污染中较重要的监管内容之一。中国第五次总膳食研究显示，谷物和蔬菜是铝、砷、碘、镉和铬的主要膳食暴露源，水生食物是砷、汞和甲基汞的重要食物接触源；与其他元素相比，铅有更多的膳食暴露源，总体而言铬与砷的摄入量与危害系数较大[19]。Gang 等[20]采用电感耦合等离子体原子发射光谱法 (inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry, ICP-AES)与原子荧光光谱法调查不同食品中的 5 种有毒金属浓度，发现大部分食品重金属含量较低，但在部分食品如猪肉，鸡肉等中 Pb、Hg 浓度较高，超过相应的限量值。高向阳等[21]采用微波消解法处理吸管材料后，用石墨炉原子吸收法测定消解液与浸泡液中的铅、镉，氢化物发生原子荧光法测定其中的汞、砷，并计算各重金属元素的迁移率，结果显示各种饮用吸管中均含有微量重金属。

2.2.6 其 他

抗氧化剂、光引发剂、着色剂等也是外卖食品包装中较常见的有害物质[22–26]。Gianni 等[27]对包装饮料与包装材料中油墨光引发剂进行研究， 采用 GC-MS 与液相色谱-串联质谱法(liquid chromatography-tandem mass spectrometry, LC-MS/MS)检测 5 种光引发剂，结果表明二苯甲酮在包装与食品中的检出率均较高，这与其分子量低、易从纸箱中迁出、既可用作包装表面的光引发剂也可作聚乙烯涂膜有关。杜志峰等[28]采用 LC-MS/MS 对常见外卖食品包装发泡塑料餐具中的 5 种荧光增白剂进行检测，检测的 13 个样品中 1 个样品检出含有荧光增白剂 FWA184，含量为 287 μg/kg。常见有害物信息及文献检测方法如表 1 所示。

3 常见有害物迁移研究

3.1 迁移研究

从目前的文献检索结果来看，大部分迁移实验的研究内容主要是利用食品模拟物进行实验，通过改变模拟物种类、接触时间、迁移温度等条件，考察有害物质迁出情况。不同国家对于迁移食品的分类略有不同，常用的食品模拟物为蒸馏水、乙酸水溶液、乙醇水溶液和正己烷等(表 2)。

表 1 常见有害物信息及文献检测方法

Table 1 Information of common harmful substances and literature detection methods

有害物质名称	主要成分	检测种类	性质	检测方法	参考文献
塑化剂	邻苯二甲酸酯类化合物	25	脂溶性	GC-MS	[8]
抗氧化剂	受阻酚类、丁基羟基茴香醚、亚磷酸酯类、二丁基羟基甲苯、硫代酯类等	21	脂溶性	超高效液相色谱/静电场轨道阱高分辨质谱法(ultra performance liquid chromate graphy-/Orbitaltrap high resolution mass spectrometry, UPLC/Orbitrap HRMS)	[29]
光稳定剂	受阻胺类、水杨酸酯类、二苯酮类、苯并三唑类等	19	脂溶性	UPLC/Orbitrap HRMS	[29]
芳香族伯胺	----	28	水溶性	HPLC-MS/MS	[30]
光引发剂	芳基烷基酮衍生物、芳香酮类化合物、芳香重氮盐、芳香硫鎓盐和碘鎓盐、二茂铁盐类等[12]	30	脂溶性	LC-MS/MS	[31]
荧光增白剂	二苯乙烯类、二苯乙烯基苯类、香豆素类、苯并恶唑类、萘酰亚胺等类型[48]	11	脂溶性与水溶性	高效液相色谱-二极管矩阵检测器法(HPLC-photo-diode array, HPLC-PDA)；高效液相色谱-荧光检测法(HPLC-fluorescence detection, HPLC-FLD);	[32]

表 2　国内外常用食品分类与模拟物列表
Table 2　Common classification of foods at home and abroad and list of simulators

食品分类	中国	欧盟	美国	日本
非酸性液态食品	水	水	水	水
酸性液态食品	4%乙酸	3%乙酸	水	4%乙酸
含酒精饮料	20%、50%、95%乙醇	10%~50%乙醇	10%~50%乙醇	20%乙醇
油脂类	植物油	橄榄油, 甘油三酸酯的合成混合物、向日葵油或谷物油	正庚烷	正庚烷

注: 溶液浓度均为体积分数。

目前对于食品接触材料中有害物质向食品模拟物中的迁移实验已有很多。对 PAEs、苯乙烯单体和双酚类物质的迁移情况进行研究, 发现与不同种类的食品模拟物接触时, 这 3 种物质向脂肪类食品中迁移的浓度较高, 说明高油、高温外卖食品受相关物质污染的风险较高[33–35]; 实验显示 0~40 min 时双酚 A 的迁移浓度急剧增加, 而外卖食品大多都是即时打包配送, 说明在外卖食品中使用塑料材料对人体健康风险较高[36]; Mary 等[37]分析不同地区生产的厨房用具样品中 PAAs 向食品接触酸性模拟液中的迁移情况, 结果显示检出率较高的芳香胺是 4, 4′-二氨基二苯甲烷和苯胺, 部分样品中的 PAAs 迁出甚至超出法规限量值; 黄杰等[38]以乙酸作为萃取剂, 对纸质食品包装中的 5 种重金属溶出量进行检测, 将电感耦合等离子体质谱法(inductively coupled plasma-mass spectrometry, ICP-MS)与火焰原子吸收法、原子荧光分光光度法进行比较, 证明 ICP-MS 方法的线性动态范围更好, 准确度与精密度较高。奶茶作为外卖食品中具有代表性的食品, 极大地增加了一次性杯与塑料吸管的使用, 为了解市售塑料饮用吸管中金属元素在使用过程中的迁移情况, 周静等[39]采用 ICP-MS 对市售吸管中 10 种重金属的迁移量进行调查, 结果显示部分批次的 Al、Ni、Pb 迁移量超过 GB 5749-2006《生活饮用水卫生标准》限量值, 说明塑料饮用吸管中的金属元素可迁移到饮用介质中, 经常使用存在潜在的安全风险。王丽婷[40]和周围等[41]采用高效液相色谱-荧光检测法对一次性纸杯中的双酚 A 迁出量与迁出规律进行研究, 结果显示即使是在室温条件下, 纸杯中的双酚 A 也会迁移出来, 当与酒精类食品接触时双酚 A 的迁出风险增加。

随着高通量同时检测技术的发展, 迁移研究也从原来针对单一种类物质的研究向多种物质同时检测发展。王成云等[42]使用超高效液相色谱/静电场轨道阱高分辨质谱(ultra performance liquid chromatography/Orbitaltrap high resolution mass spectrometry, UPLC/Orbitrap HRMS)对塑料食品包装中 19 种光稳定剂和 21 种抗氧化剂的特定迁移量进行快速筛查和确证, 发现多种目标化合物有不同水平的迁出, 部分样品的迁出量甚至超过了特定迁移限量(specific migration, SML)。Verónica 等[43]对 12 种塑料包装材料进行了分析, 使用 Tenax 和异辛烷进行迁移试验, 并通过气相色谱-质谱分析迁移物, 结果在塑料材料中检测到约 100 种不同的有机化合物, 其中, 27 种化合物迁移至 Tenax 或异辛烷中,通过同时检测可对外卖食品接触材料中可能迁出的有害物质进行大范围筛查, 在此基础上进行更详细与全面的迁移研究。

迁移实验研究显示, 食品模拟物种类、温度、接触材料类别等因素均会影响有害物质从食品接触材料向食品中的迁移, 其中温度与接触时间为主要影响因素。进行迁移实验有助于选择确定外卖食品接触材料中有害物质迁出风险最高的模拟情况, 根据有害物质的迁移特性与浓度数据, 结合有害物质的限量值, 实现有害物风险评估与风险监控。

3.2　迁移模型的建立

由于食品接触材料中添加剂向食品中的迁移过程很复杂, 在实际使用时接触的食品基质种类繁多, 包装材料的种类、使用仪器等条件都在一定程度上制约了迁移实验的开展。同时迁移实验结果包含的信息一般较有限, 对于不同因素对有害物质迁移影响的大小与作用机理涉及较少。因此在迁移实验的基础上, 学者们开始运用一些软件或数学模型[44,45], 通过已有的实验数据以及模型中的厚度、温度、时间等参数, 取代一部分迁移实验, 从而对迁移机理进行研究, 预测有害物质迁移情况, 提高检测分析结果的可靠性。根据模型研究方法不同可分为 Fick 迁移模型和 Non-Fick 迁移模型。

3.2.1　Fick 迁移模型

Fick 迁移模型是目前研究较多、较成熟的迁移模型, 其以 Fick 第二扩散定律为基础展开。该定律将在材料厚度上发生的迁移以一维二阶偏微分方程式进行描述, 根据包装与食品的相对情况分有限食品包装-无限食品基质(迁移物的量恒定)与有限食品包装-有限食品基质(模拟液中迁移物初始含量为 0)2 种情况[46]。根据包装材料与食品的接触方式不同可分为单层模型、双层模型和多层模型, 一般外卖食品接触材料与食品的接触方式为单层模型情况[47]。在 Fick 第二扩散定律的基础上, 学者们提出了 Crank 模型、Piringer 模型、Weibull 模型等公式用于预测有害物质的迁移规律。

Crank 模型的公式较简单，可用于对有害物质的迁移规律进行动力学研究; Piringer 模型作为通用型扩散系数模型，从最简单的迁移评估过程出发，简化了利用模型进行安全评估的分析步骤，是美国食品药品监督管理局(Food and Drug Administration, FDA)食品接触材料工业使用指南中的推荐模型; Weibull 分布是可靠性系统常用的分布之一，它主要应用于电子元件、设备等产品使用寿命的研究，近年来开始被广泛用于食品包装污染物的迁移研究。

纪水琳[48]以玉米油作为高脂食品模拟物，检测不同条件下荧光增白剂的迁移情况，以 Crank 和 Weibull 数学模型为基础建立了迁移模型，结果证明该模型适用于对 PE 中荧光增白剂迁移动力学的研究，但是 Weibull 模型的拟合度更高，预测效果与实际实验结果更接近。池海涛等[49]同时采用 Piringer 模型和 Weibull 模型对 PP 树脂中的抗氧化剂在 95%乙醇食品模拟物中的迁移进行比较研究，发现 Weibull 模型拟合优度 R^2 值优于 Piringer 模型，Piringer 模型对 PP 中抗氧化剂 BHT 迁移的预测结果会低于实验值，Weibull 模型与实验值更接近，同时还发现 Piringer 模型和 Weibull 模型参数间存在一定的数学联系。

3.2.2 Non-Fick 迁移模型

Fick 迁移模型虽然公式简单，研究较成熟，但是存在公式单一、使用条件较为理想化、适用性差等缺点。近年来，随着计算机软件的蓬勃发展，通过新的模型理论的突破，出现了包容性与适用性更强的 Non-Fick 模型理论，使得迁移预测软件得以发展。

Chang 等[50]对不同加工条件下 PP 包装中抗氧化剂向模拟液中的迁移行为进行研究，使用软件包 Migratest Exp(Fabes Forschungs-GmbH，慕尼黑，德国)计算暴露于各种加工条件下的迁移浓度的理论估计值，发现数学模型得到的结果是实验结果的 1.5~2 倍，说明数学模型可提供可靠的迁移预测。Wang 等[51]通过基于经典力学的分子动力学(molecular dynamics, MD)模拟技术，研究了紫外线吸收剂与抗氧化剂在不同温度下从 PP 材料到食品模拟物中的迁移，结果表明由两相 MD 模型获得的添加剂的扩散系数通常与相应实验结果在同一个数量级内，说明该模型具有相当好的预测能力。

Non-Fick 模型研究虽然处于起步阶段，但是具有简便、限制条件少等优点。Non-Fick 模型将参数和变量结合，参数是在一定范围波动的量值，通过寻找参数与一些迁移的影响因子间的数学关系来进行表征，得到在一定范围波动的预测数值结果，从而使结果更加贴近实际迁移情况，并具有更大的兼容性，更适于实际情况的研究。

4 结 论

本研究对现有的文献研究进行调查，发现关于不同材质外卖食品接触材料中的有害物质种类及检测方法研究较多。随着人们对于物质迁移机理的认识不断深入，建立迁移模型以预测有害物从接触材料向外卖食品中迁移的可行性与可靠性也得到了一定的验证。但是目前的迁移研究大多为性质相似的食品模拟物，对于外卖食品接触材料与典型外卖食品接触时有害物质的迁移规律与迁移模型研究较少，对于外卖食品这一快速发展的行业来说缺乏必要的风险评估与风险监控数据。为了更好地保证外卖食品检测材料的安全性使用，后续有必要对塑料及纸制品一次性餐饮具在使用过程中的有害物质种类、与实际食品接触时的迁移情况进行更详细与深入的研究。

参考文献

[1] 前瞻产业研究院. 2019 年中国外卖行业市场分析: 全年用户规模将突破 4 亿人住宅区使用场景比重超 4 成[EB/OL]. [2020–03–16]. https://bg.qianzhan.com/trends/detail/506/200316–e156765d.html.
Prospective Industry Research Institute. Market analysis of China's takeout industry in 2019: the annual user scale will exceed 400 million, and the proportion of residential use scenarios will exceed 40% [EB/OL]. [2020–03–16].
https://bg.qianzhan.com/trends/detail/506/200316-e156765d.html.

[2] 朱文亮. 食品塑料包装材料中有机污染物的高通量检测与迁移研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
Zhu WL. The migration research and detection of organic contaminants in food packing plastic material [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.

[3] 黄英杰, 常南, 许娜. 食品用塑料包装材质种类及安全性分析[J]. 新农业, 2019, (9): 73–74.
Huang YJ, Chang N, Xu N. Types and safety analysis of plastic packaging materials for food [J]. New Agric, 2019, (9): 73–74.

[4] Verónica GI, Ana RBDQ, Paseiro LP, *et al*. Non-target analysis of intentionally and non intentionally added substances from plastic packaging materials and their migration into food simulants [J]. Food Packag Shelf, 2019, (410): 3789–3803.

[5] 张宁. 食品接触材料中常见的塑化剂和抗氧化剂的检测方法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
Zhang N. Studies on the determination method of common plasticizers and antioxidants in food contact materials [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2018.

[6] Yong L, Yan HQ, Li XQ, *et al*. Presence, distribution and risk assessment of phthalic acid esters (PAEs) in suburban plastic film pepper-growing greenhouses with different service life [J]. Ecotox Environ Saf, 2020, (196): 110551.

[7] 赵立群, 石金娥, 张宁, 等. 2018 年吉林省部分地区市售食用植物油产品中塑化剂含量的检测结果分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(6): 1465–1469.
Zhao LQ, Shi JE, Zhang N, *et al*. Analysis of plasticizer content in commercial vegetable oil products sold in some of areas of Jilin province in 2018 [J]. J Food Saf Qual, 2019, 10(6): 1465–1469.

[8] 吕晓静. 食品和食品包装材料中邻苯二甲酸酯类塑化剂的检测与风险评估[D]. 青岛: 青岛大学, 2014.
Lv XJ. Determination and risk assessment of phthalic acid esters in food

and food packaging materials [D]. Qingdao: Qingdao University, 2014.

[9] 孟湘君. 美国: 研究显示餐厅和外卖食物塑化剂含量更高[J]. 中国食品, 2018, (8): 99.
Meng XJ. America: Studies show that restaurants and takeout foods have higher levels of plasticizer [J]. China Food, 2018, (8): 99.

[10] Wang JQ, Liu XR, Wei Y. Magnetic solid-phase extraction based on magnetic zeolitic imazolate framework-8 coupled with high performance liquid chromatography for the determination of polymer additives in drinks and foods packed with plastic [J]. Food Chem, 2018, (256): 358–366.

[11] Fan Y, Li XL, Meng DL, *et al*. Determination of ultraviolet absorbers and light stabilizers in food packaging bags by magnetic solid phase extraction followed by high-performance liquid chromatography [J]. Food Anal Method, 2017, 10(10): 3247–3254.

[12] Chen Y, Wang XY. Determination of aromatic amines in food products and composite food packaging bags by capillary electrophoresis coupled with transient isotachophoretic stacking [J]. J Chromatogr A, 2009, 1216(43): 7324–7328.

[13] 杨博锋, 汤志旭, 高昕. 食品塑料包装材料中单体和添加剂及其检测技术[J]. 食品工业科技, 2012, 33(14): 392–395.
Yang BF, Tang ZX, Gao X. Monomers and additives in plastic food packaging materials and its detection technologies [J]. Sci Technol Food Ind, 2012, 33(14): 392–395.

[14] 李志平, 吴雄杰, 赵康, 等. 食品塑料包装材料中常见有毒有害单体介绍[J]. 塑料包装, 2016, 26(5): 56–60.
Li ZP, Wu XJ, Zhao K, *et al*. The introduction of main harmful monomer for plastic materials for food packaging [J]. Plast Packag, 2016, 26(5): 56–60.

[15] 朱文亮, 周勇, 陈晓鹏, 等. 顶空气相色谱法测定丙烯腈-苯乙烯(AS)塑料中残留的 7 种单体[J]. 食品工业科技, 2012, 33(13): 322–324, 382.
Zhu WL, Zhou Y, Chen XP, *et al*. Determination of 7 residual monomers in acrylonitrile-styrene plastic by gas chromatography with head space sampler [J]. Sci Technol Food Ind, 2012, 33(13): 322–324, 382.

[16] Soma G, Mahato MK, Bhattacharjee S, *et al*. Development of a new noncarcinogenic heavy metal pollution index for quality ranking of vegetable, rice, and milk [J]. Ecol Indic, 2020, (113): 106214.

[17] Reza N, González MJR, Martínez PF, *et al*. Lead and cadmium levels in raw bovine milk and dietary risk assessment in areas near petroleum extraction industries [J]. Sci Total Environ, 2018, (635): 308–314.

[18] Yannick N, Chimuka L, Cukrowska E. Assessment of heavy metals in raw food samples from open markets in two African cities [J]. Chemosphere, 2018, (196): 339–346.

[19] Wei JX, Gao JQ, Cen K. Levels of eight heavy metals and health risk assessment considering food consumption by China's residents based on the 5th China total diet study [J]. Sci Total Environ, 2019, (689): 1141–1148.

[20] Gang L, Gong WW, Li BR, *et al*. Analysis of heavy metals in foodstuffs and an assessment of the health risks to the general public via consumption in Beijing, China [J]. Inter J Environ Res Pub Health, 2019, 16(6): 909.

[21] 高向阳, 王长青, 高遒竹, 等. 塑料饮用吸管中重金属及其迁移率的测定[J]. 河南农业大学学报, 2014, 48(6): 774–779.
Gao XY, Wang CQ, Gao QZ, *et al*. Determination of the content and mobility of heavy metals in drinking straw [J]. J Henan Agric Univ, 2014, 48(6): 774–779.

[22] Lin QB, Li B, Song H, *et al*. Determination of 7 antioxidants,8 ultraviolet absorbents,and 2 fire retardants in plastic food package by ultrasonic extraction and ultra performance liquid chromatograph [J]. J Liquid Chromatogr Related Technol, 2011, 34(9): 730–743.

[23] Dopico-García MS, López-Vilariño JM, González-Rodríguez MV. Determination of antioxidants by solid-phase extraction method in aqueous food simulants [J]. Talanta, 2005, 66(5): 1103–1107.

[24] 刘艳. 食品包装材料中 9 种光引发剂的气相色谱-质谱测试方法研究[D]. 上海: 东华大学, 2017.
Liu Y. Study on the determination of nine photoinitiators in food packaging materials by gas chromatography-mass spectrometry [D]. Shanghai: Donghua University, 2017.

[25] 邓晓军, 郭德华, 李波, 等. 气相色谱-质谱法测定乳制品中光引发剂异丙基硫杂蒽酮的残留量[J]. 色谱, 2007, 25(1): 39–42.
Deng XJ, Guo DH, Li B, *et al*. Determ ination of isopropylthioxanthone residue in milk migrated from packaging materials by gas chromatography-mass spectrometry [J]. Chin J Chromatogr, 2007, 25(1): 39–42.

[26] 郑淑芳. 浅谈如何选择塑料着色剂[J]. 广东化工, 2006, 33(4): 25–26.
Zheng SF. Discussion about how to choose plastieal colorant [J]. Guangdong Chem Ind, 2006, 33(4): 25–26.

[27] Gianni S, Caprioli G, Cristalli G, *et al*. Determination of ink photoinitiators in packaged beverages by gas chromatography–mass spectrometry and liquid chromatography–mass spectrometry [J]. J Chromatogr A, 2008, 1194(2): 213–220.

[28] 杜志峰, 冼燕萍, 刘付建, 等. LC-MS/MS 法测定发泡塑料餐具中 5 种荧光增白剂[J]. 现代食品科技, 2013, 29(12): 3014–3018.
Du ZF, Xian YP, Liu FJ, *et al*. Determination of five fluorescent whitening agents in foam plastic tableware by high performance liquid chromatography tandem mass spectrometry [J]. Mod Food Sci Technol, 2013, 29(12): 3014–3018.

[29] 王成云, 佟常飞, 陈俊彬, 等. 塑料食品接触材料中光稳定剂和抗氧剂的快速筛查和确证[J]. 塑料科技, 2017, 45(5): 87–96.
Wang CY, Tong CF, Chen JB, *et al*. Rapid screening and confirmation of light stabilizers and antioxidants in plastic materials intended to come into contact with foodstuffs [J]. Plast Sci Technol, 2017, 45(5): 87–96.

[30] 肖晓峰, 王建玲, 杨娟娟, 等. 高效液相色谱-串联质谱法快速测定水基食品模拟物中 28 种受限芳香族伯胺的迁移量[J]. 色谱, 2013, 31(1): 38–45.
Xiao XF, Wang JL, Yang JJ, *et al*. Rapid analysis of 28 primary aromatic amines in aqueous food simulants by high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Chin J Chromatogr, 2013, 31(1): 38–45.

[31] Hsien CC, Chen YJ, Chang MH, *et al*. Novel multi-analyte method for detection of thirty photoinitiators in breakfast cereal and packaged juice [J]. J Chromatogr B, 2019: 1130–1131.

[32] 陈立松. 纸质食品包装材料中荧光增白剂检测方法的研究[D]. 福州: 福州大学, 2014.
Chen LS. Studies on the analytical methods foe the fluorecent whiteninng agents in food packaging papers [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2014.

[33] 何泽. 塑料餐盒中邻苯二甲酸酯的迁移规律研究[D]. 天津: 天津科技

大学, 2017.
He Z. Migration regularity of phthalate in plastic food container [D]. Tianjin: Tianjin University of Science &Technology, 2017.

[34] Yang J, Song W, Wang X, *et al*. Migration of phthalates from plastic packages to convenience foods and its cumulative health risk assessments [J]. Food Addit Contam Part B Surveill, 2019, 12(3): 151–158.

[35] Naziruddin MA, Sulaiman R, Abdul HLS, *et al*. The effect of fat contents and conditions of contact in actual use on styrene monomer migrated from general-purpose polystyrene into selected fatty dishes and beverage [J]. Food Packag Shelf, 2020, (23): 100461.

[36] Lian LL, Jiang XH, Guan JJ, *et al*. Dispersive solid-phase extraction of bisphenols migrated from plastic food packaging materials with cetyltrimethylammonium bromide-intercalated zinc oxide [J]. J Chromatogr A, 2020, (1612): 460666.

[37] Mary ÂFP, Padula M, Moitinho D, *et al*. Primary aromatic amines in kitchenware: Determination by liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. J Chromatogr A, 2019, (1602): 217–227.

[38] 黄杰, 梁旭锋, 阎萍萍, 等. 乙酸萃取-电感耦合等离子质谱法检测纸质食品接触材料中重金属的溶出量[J]. 检验检疫学刊, 2014, 24(5): 44–46.
Huang J, Liang XF, Yan PP, *et al*. Acetic acid extraction-ICP-MS method to detect the dissolubility of heavy metals in paper-based food contact material [J]. J Inspect Quarant, 2014, 24(5): 44–46.

[39] 周静, 钱亮亮, 冯洪燕, 等. 电感耦合等离子体质谱法检测塑料饮用吸管中金属元素的迁移量[J]. 食品科学, 2018, 39(8): 276–281.
Zhou J, Qian LL, Feng HY, *et al*. Determination of the migration of harmful metals from plastic drinking straw by inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. Food Sci, 2018, 39(8): 276–281.

[40] 王丽婷. 纸杯及方便面盒中双酚 A 的检测和迁移规律及茶叶中联苯菊酯的检测研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2014.
Wang LT. Study on determination and migration of bisphenol A in paper cups and bottled instant noodles boxes and determination of bifenthrin in tea [D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2014.

[41] 周围, 王丽婷, 王波, 等. 高效液相色谱荧光检测法对一次性纸杯中双酚 A 的迁移规律研究[J]. 分析试验室, 2014, 33(1): 12–16.
Zhou W, Wang LT, Wang B, *et al*. Determination of migration of bisphenol A in paper cups by high performance liquid chromatography [J]. Chin J Anal Lab, 2014, 33(1): 12–16.

[42] 王成云, 李成发, 林君峰, 等. 超高效液相色谱/静电场轨道阱高分辨质谱法同时测定塑料食品接触材料中光稳定剂和抗氧化剂的特定迁移量[J]. 色谱, 2017, 35(5): 509–519.
Wang CY, Li CF, Lin JF, *et al*. Simultaneous determination of the specific migration amounts of light stabilizers and antioxidants in plastic materials in contact with foodstuffs by ultra-high performance liquid chromatography/orbitrap high resolution mass spectrometry [J]. Chin J Chromatogr, 2017, 35(5): 509–519.

[43] Verónica GI, Ana RBDQ, Paseiro LP, *et al*. Identification of intentionally and non-intentionally added substances in plastic packaging materials and their migration into food products [J]. Anal Bioanal Chem, 2018, (410): 3789–3803.

[44] Ji SL, Zhang JZ, Tao GS, *et al*. Influence of heating source on the migration of photoinitiators from packaging materials into Tenax® and popcorn [J]. Food Packag Shelf, 2019, (21): 100340.

[45] 朱勇, 郭新华, 王志伟, 等. 塑料食品包装材料添加剂迁移的数值模拟[J]. 包装工程, 2009, 30(1): 8–10.
Zhu Y, Guo XH, Wang ZW, *et al*. Numerical simulation on migration of additives from plastic food packaging materials into foods [J]. Packag Eng, 2009, 30(1): 8–10.

[46] 刘志刚, 王志伟. 塑料包装材料化学物向食品迁移的模型研究进展[J]. 高分子材料科学与工程, 2007, (5): 19–23.
Liu ZG, Wang ZW. Study on mathematical model for predicting migration of chemical substances from plastic packaging materials [J]. Polym Mater Sci Eng, 2007, (5): 19–23.

[47] 李波. PET 和 PP 材料中添加剂向食品迁移的分子动力学模拟及实验研究[D]. 广州: 暨南大学, 2017.
Li B. Molecular dynamics simulation and experiment investigation on migration of additives from PET and PP materials into food [D]. Guangzhou: Jinan University, 2017.

[48] 纪水琳. 食品及包装中荧光增白剂的检测方法及迁移动力学研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2018.
Ji SL. Determination of fluorescent whitening agents (FWAs) in food packaging materials and migration kinetics of FWAs from PE to food simulants [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2018.

[49] 池海涛, 刘颖, 高峡, 等. 食品接触聚丙烯塑料中抗氧化剂迁移模型研究[J]. 分析化学, 2015, 43(3): 399–403.
Chi HT, Liu Y, Gao X, *et al*. Study on migration model of antioxidants in food contact polypropylene plastics [J]. Chin J Anal Chem, 2015, 43(3): 399–403.

[50] Chang YJ, Kang KM, Park SJ, *et al*. Experimental and theoretical study of polypropylene: Antioxidant migration with different food simulants and temperatures [J]. Food Eng, 2019, (244): 142–149.

[51] Wang ZW, Li B, Lin QB, *et al*. Two-phase molecular dynamics model to simulate the migration of additives from polypropylene material to food [J]. Int J Heat Mass Tran, 2018, (122): 694–706.

(责任编辑: 李磅礴)

作者简介

施思倩, 硕士, 主要研究方向为食品质量与安全。
E-mail: 1721910731@qq.com

姚卫蓉, 教授, 主要研究方向为食品质量与安全。
E-mail: yaoweirongcn@jiangnan.edu.cn