

引用格式: 董亚楠,梁青,赵慧,等.食品包装挥发性有害物质在固体模拟物中迁移研究[J].标准科学,2025(5):62-68.
DONG Ya-nan,LIANG Qing,ZHAO Hui,et al.Research on Migration of Volatile Hazardous Substances from Food Packaging Materials into Solid Simulants [J].Standard Science,2025(5):62-68.

食品包装挥发性有害物质在固体模拟物中迁移研究

董亚楠¹ 梁青^{1*} 赵慧¹ 范雪婵¹ 聂佳佳²

[1.河北省产品质量监督检验研究院; 2. 河北省药品职业化检查员总队(北片区)]

摘要:【目的】目前食品模拟物多采用液体形式,由于固体食物的物理性质与液体食物存在显著差异,传统液体模拟物难以准确模拟其迁移行为。本文旨在对食品包装材料中挥发性有害物质在固体模拟物中的迁移规律研究现状进行综述,为后续迁移机制探索及食品安全标准制定提供方向。【方法】综述了食品包装材料中挥发性有害物质的种类、来源及其健康危害,重点探讨了固体模拟物的选择及其在迁移研究中的应用,对比国内外相关研究进展,总结现有研究的局限性。【结果】研究表明,我国固体模拟物迁移研究缺乏系统性,迁移规律受材料特性、温度、接触时间等多因素影响,现有实验方法与模型在模拟真实固体食品场景中存在不足。【结论】因此,亟须优化固体模拟物体系、开发合适的迁移模型、完善检验标准,从而更科学地评估挥发性有害物质的迁移风险,为食品包装材料安全性评价及法规制定提供理论支撑。

关键词: 挥发性有害物质; 固体模拟物; 迁移规律; 改性聚苯醚; 食品包装材料

DOI编码: 10.3969/j.issn.1674-5698.2025.05.009

Research on Migration of Volatile Hazardous Substances from Food Packaging Materials into Solid Simulants

DONG Ya-nan¹ LIANG Qing^{1*} ZHAO Hui¹ FAN Xue-chan¹ NIE Jia-jia²

(1. Hebei Research Institution for Product Quality Supervision and Inspection;

2. Drug Professional Inspector Team of Hebei Province, North District)

Abstract: [Objective] Currently, most food simulants are liquid simulants. Due to the significant differences in physical properties between solid and liquid foods, traditional liquid simulants cannot accurately simulate their migration behavior. This paper aims to review the current research on volatile harmful substances' migration in solid simulants of food packaging materials, providing a direction for subsequent exploration of migration mechanisms and the development of food safety standards. [Methods] This paper reviews the types, sources, and health hazards of volatile harmful substances in food packaging materials, and focuses on the selection of solid simulants and their application in migration studies, compares the research progress at home and abroad, and summarizes the limitations of existing studies. [Results] The research shows that the migration research on solid simulants in China lacks systematicness. The migration are affected by multiple factors such as material properties, temperature, and contact time. Existing experimental methods and models have deficiencies in simulating real solid food scenarios. [Conclusion] Therefore, it is urgent to optimize the solid simulant system, develop appropriate migration models,

基金项目: 本文受河北省市场监督管理局科研计划项目“食品包装材料中挥发性有害物质在固体模拟物中迁移规律的研究”(项目编号: 2023ZC10)资助。

作者简介: 董亚楠, 硕士, 高级工程师, 研究方向为产品质量检验检测及质量管理。

梁青, 通信作者, 硕士, 高级工程师, 研究方向为产品质量检验和实验室管理。

and improve inspection standards to more scientifically assess the migration risks of volatile harmful substances, providing theoretical support for the safety evaluation of food packaging materials and the formulation of regulations.

Keywords: volatile hazardous rubstances, solid simulants, migration, modified polyphenylene oxide, food packaging materials

0 引言

随着食品包装技术的飞速进步,新型包装材料和印刷工艺不断涌现,这在给食品包装带来便利的同时,也增加了挥发性有害物质迁移至食品的风险。这些挥发性有害物质可能来自包装材料的原材料、加工过程中有意或无意使用的各种添加剂或油墨印刷等^[1],一旦迁移到食品中,可能会对人体健康造成潜在威胁。

固体食品在食品消费中占据重要地位,其包装材料的安全性直接关系到消费者的健康。目前,针对食品包装材料中挥发性有害物质在固体模拟物中迁移规律的研究相对较少,国内标准大都采用液体模拟物进行萃取^[2]。由于固体食品的物理性质与液体食品存在显著差异,挥发性有害物质在固体食品中的迁移规律与在液体食品中有所不同,其与包装材料的相互作用也较为复杂,使得挥发性有害物质在固体食品中的迁移规律研究具有一定的挑战性。因此,对食品包装材料中挥发性有害物

质在固体模拟物中的迁移规律的深入研究迫在眉睫。本研究对于评估固体食品包装材料的安全性、保障消费者健康具有重要意义。

1 研究背景及国内外现状

食品接触材料迁移规律研究主要采用食品模拟物来替代真实的食品来进行迁移过程的模拟研究。采用食品模拟物对食品接触包装材料进行迁移试验,是目前检验包装材料质量和安全及合规性判定最重要、最直接的手段,是对食品包装材料的风险管控的主要参考依据。欧盟的食品接触材料法规(EU) No 10/2011^[3]对食品包装材料中挥发性有机物的迁移量作出了明确规定,美国食品药品监督管理局(FDA)^[4]也发布了相关的法规和指南,要求食品包装材料必须符合严格的安全标准,我国GB 4806.1—2016^[5]等一系列标准也对食品包装材料的安全性提出了严格要求。国内外食品接触材料相关标准要求对比详见表1。

表1 国内外食品接触材料相关标准要求对比

标准/法规	(EU) No 10/2011	21 CFR 174-178	GB 4806系列标准
适用范围	塑料材料及制品	所有食品接触材料	所有食品接触材料
物质清单	提供了详细的允许使用的单体、添加剂和其他物质的清单(欧盟正面清单)	通过FDA的《食品接触物质通知程序》(FCN)和《一般认为安全物质清单》(GRAS)管理允许使用的物质	提供了允许使用的物质清单(中国正面清单),并参考GB 9685—2016对添加剂的使用进行规范
迁移限量	分别规定了SML和OML, SML针对特定物质进行规定, OML≤10 mg/dm ²	未明确规定OML,但要求迁移量不得超过FDA规定的限值	规定了不同材质的OML,其中塑料制品一般为10 mg/dm ² ; SML针对特定物质进行了规定
回收材料使用	允许使用回收塑料,但需确保其符合迁移限量要求,并通过严格的安全评估	允许使用回收材料,但需确保其符合FDA的安全标准	一般情况下不得使用回收材料,但是对于某些特定的、经过严格评估和验证,在满足相关食品安全标准和管理要求的前提下,可以有条件地使用
标识要求	要求标明“食品接触材料”标识,并提供使用条件(如温度范围)	未明确规定标签要求,但要求产品符合FDA的安全标准	要求标明“食品接触材料”标识,并提供使用条件(如温度范围)

国家标准GB 31604.1—2023^[2]指定了4%乙酸、乙醇、植物油和化学替代溶剂作为食品模拟物。除了以上模拟物外,欧盟法规(EU) No 10/2011还指定聚2,6-二苯基苯乙烷在高温下可作为橄榄油的替代模拟物。当食品包装材料预期接触食品为干性、固体或油性食品时可选用改性聚苯醚(Tenax)作为模拟物。已有的研究表明^[6-8],特定物质在液态模拟物中是通过扩散的方式进行迁移,迁移量通常随着温度的升高和时间的延长不断增加;而Tenax作为一种多孔模拟物,与前者的迁移机理不同,物质是通过“吸附-脱附”的方式实现物质的转移^[9]。由于固体食品在有害物质的吸附和解析过程中存在基质复杂和干扰严重的问题^[10],虽然目前国内外已有对Tenax迁移规律和机理的研究,但还很不充分,特别是鲜有对挥发性有害物质的研究。

国内外学者对食品包装材料中有害物质在固体模拟物迁移规律的研究取得了一定的进展,这些研究大多集中在纸质包装中矿物油向食品模拟物中的迁移。张宜彩等^[11-12]、李亚克等^[13]研究了食品包装纸中矿物油向固体食品模拟物 Tenax 的迁移规律,发现随着温度的升高,矿物油的迁移量随之增加,且不同类型的快餐包装纸中矿物油的迁移量存在一定差异;当温度一定时,克重及厚度是影响食品包装纸中饱和烃矿物油迁移的重要因素,温度越高,饱和烃矿物油达到迁移平衡的时间越短,迁移率越大。2021年WTO公布了一项来自德国的法规草案,对食品接触材料中矿物油的特定迁移限量进行了规定,并不断修订和完善相关标准。司晓喜等^[14]选取Tenax作为食品模拟物,建立了模拟物Tenax直接顶空进样,采用气相色谱/质谱联用法测定纸质包装材料中23种有机挥发物质迁移量的方法。

然而,目前的研究仍存在若干不足。一方面,对于一些新型食品包装材料和挥发性有害物质的迁移研究还相对较少,挥发性有害物质较为单一,需要进一步拓展研究范围。另一方面,迁移机制的研究还不够深入,如对复杂包装材料中多种挥发

性有害物质的协同迁移研究较少,缺乏系统性和综合性的分析。此外,现有的迁移模型大多基于特定的实验条件建立,通用性和准确性有待提高。

2 食品包装材料中的挥发性有害物质

2.1 常见挥发性有害物质种类及来源

食品包装材料常见的挥发性有害物质种类繁多,印刷油墨中的挥发性有机化合物(VOCs)^[15]是重要的有害物质,包括甲醇、乙醇、丙酮、苯、甲苯等。在对纸质包装材料的研究中发现,其在印刷和黏合过程中使用的油墨、胶黏剂等会导致挥发性有机物残留。环氧乙烷和环氧丙烷^[16]常用于塑料制品和纸制品包装材料的杀菌和消毒过程,欧盟食品饲料类快速预警系统(RASFF)通报了1500多次涉及环氧乙烷的食品安全事件,并进行了大面积的召回,涉及奶制品、调味品、泡面、果汁和罐头等多种产品,牵涉近20个国家。

食品包装材料中挥发性有害物质的来源多样,主要与原材料、生产加工过程添加剂的使用及印刷和涂层工艺等密切相关。生产原材料是重要源头之一,塑料包装材料的合成原料若在聚合过程中未完全反应,可能残留在包装材料中并挥发迁移。例如聚乙烯、聚丙烯等塑料包装,若生产工艺控制不当,会有少量单体残留。纸质包装材料中的原生纤维可能含有天然的挥发性物质,而回收纤维如果在回收过程中处理不当,可能引入更多的有害物质。Biedermann等^[17],Grob等^[18]在相关研究中表明,回收报纸用于食品接触材料时,其中的矿物油会因印刷油墨的残留而迁移到食品中,对食品安全造成隐患。生产加工过程也会产生有害物质,印刷环节使用的油墨、胶黏剂等若不符合食品安全标准,会残留大量挥发性有机化合物,如甲醛、苯系物等。另外,为改善包装材料的性能,常添加各种添加剂^[19],例如塑化剂用于增加塑料的柔韧性,抗氧化剂用于防止塑料老化,抗静电剂用于消除静电等。这些添加剂在加工过程中可能未完全与包装材料结合,从而在后续使用中挥发迁移到食品中。

在塑料包装的生产中,邻苯二甲酸二辛酯(DOP)等塑化剂的使用较为普遍,其挥发迁移风险不容忽视。一些含有重金属的添加剂,在特定条件下可能会释放出挥发性的重金属化合物,对人体健康产生潜在危害。

2.2 对人体健康的潜在危害

食品包装材料中挥发性有害物质对人体健康具有潜在危害。挥发性有机化合物(如苯、甲苯、二甲苯等)具有毒性和刺激性,长期接触或摄入可能损害人体神经系统、呼吸系统以及肝脏等器官,对人体有致癌、致畸等伤害,过量摄入含苯的食品还可能导致白血病等严重疾病。表2为常见挥发性有机化合物对人体的危害。欧盟通过“良好作业规范”对食品包装用纸进行管理,限制溶剂残留总迁移量,以降低其对人体健康的危害。食品包装材料中有害物质的潜在危害不容忽视,需要加强对食品包装材料中挥发性有害物质的研究和监管,保障食品安全^[20-24]。

3 固体模拟物的选择

目前,针对食品包装材料中挥发性有害物质迁移规律的研究主要集中在液体食品模拟物上,这些液体模拟物在研究水溶性、酸性、醇溶性和油脂性食品中的迁移行为时发挥了重要作用。然而在实际生活中,许多食品属于固体或半固体状态,如面包、奶粉、肉制品等。对于这些食品,液体模拟物无法准确模拟其真实的接触条件。固体模拟物的出现弥补了这一不足,它们能够更好地模拟固体食品的物理性质和接触状态。固体模拟物具有与固体食品相似的物理性质,能够更准确地模拟挥发性有害物质在固体食品中的迁移过程,为研究挥发性有害物质在固体食品中的迁移提供了更有效的手段。

目前,常用的固体模拟物有Tenax、聚二甲基硅氧烷(PDMS)等。Tenax具有多孔结构,对挥发性物质有良好的吸附性能,且热稳定性好,被广泛应用于干性食品模拟。BS EN 14338:2003^[25]标

表2 常见挥发性有机化合物对人体的危害

挥发性有机物	健康危害
苯	致癌性,暴露高浓度苯会抑制中枢神经,引起急性中毒;长期暴露造成再生不良性贫血、血球减少症、白血病等
甲苯	对黏膜和皮肤具有刺激性,会导致中枢神经功能障碍,肝、肾及心脏损伤,与皮肤接触导致血管扩张、红斑等
二甲苯	对眼睛和上呼吸道有刺激作用,对肝脏及肾脏有轻微毒性,高浓度时对中枢神经系统起麻醉作用
乙苯	对皮肤和黏膜具有刺激性,对中枢神经系统具有急性或慢性影响
苯乙烯	对眼睛和上呼吸道有刺激性及麻醉作用,是诱变剂,具有潜在致癌作用,暴露接触可能导致失忆,大脑和肝损伤
乙酸乙酯	对眼、鼻、咽喉有刺激作用,高浓度吸入可引起进行性麻醉作用
甲醛	严重刺激呼吸道可使发炎,可能有致癌性
乙醛	急毒性和强烈的皮肤刺激
环氧乙烷	致癌性,对神经系统、皮肤、眼睛均具有刺激作用
5-亚乙基-2-降冰片烯	对眼睛、皮肤、呼吸系统具有刺激作用,潜在致癌性
氯乙烯	对眼睛、神经系统、呼吸系统具有刺激作用,对生殖和发育系统具有不良影响

准中也规定使用Tenax作为固体模拟物,目前国标GB/T 23296.1—2009^[26]也同样沿用欧盟标准的Tenax作为固体干燥食品的模拟物。PDMS则具有良好的柔韧性和化学稳定性,能够模拟一些具有特殊质地的固体食品。韩伟等^[7]研究了4-甲基二苯甲酮等有害物质向3种干性模拟物Tenax、多壁碳纳米管(MWCNT)和碳分子筛(CMS)的迁移规律。表3详细列出了常见固体模拟物优缺点。

由表3可见,Tenax作为固体模拟物的研究适应范围较广,尤其是对非极性物质的迁移研究;PDMS可适用塑化剂、芳香烃等物质的迁移研究,但仅适合低温条件;MWCNT适用于复杂食品基质中有害物质的吸附研究,但需注意潜在毒性;CMS适用于特定分子尺寸物质的迁移研究,大家可以

表3 常见固体模拟物优缺点

固体模拟物	优点	缺点
改性聚苯醚 (Tenax)	对挥发性有机化合物有良好的吸附能力；高温条件下仍能保持稳定，适合高温迁移试验；被欧盟法规（EU）No 10/2011及BS EN 14338:2003等标准推荐为干性食品模拟物，适合实验室常规使用	价格相对昂贵；对极性较强的物质（如醇类、酸类）吸附效果稍差
聚二甲基硅氧烷 (PDMS)	对塑化剂、芳香烃等有良好的吸附能力；对人体和环境无害，适合食品安全研究	热稳定性较低，不适合高温迁移试验；对极性较强的物质（如醇类、酸类）吸附效果较差
多壁碳纳米管 (MWCNT)	具有极高的比表面积，对VOCs和重金属等有较强的吸附能力；在酸碱和高温条件下仍能保持稳定	制备和纯化过程复杂，成本较高；有潜在毒性；分散性差
碳分子筛（CMS）	适合模拟复杂食品基质中的迁移行为；吸附后可通过加热或溶剂处理解吸，重复使用效果较好	成本高；对某些大分子物质的吸附容量较低；实验操作相对复杂，需要专业设备和技术支持

根据迁移对象选择合适的食品固体模拟物。利用这些固体模拟物，研究者们在不同的实验条件下，对多种挥发性有害物质的迁移行为进行了研究。理想的模拟物应能准确反映实际食品的物理化学特性，尤其是对挥发性物质的吸附和释放行为。固体食品模拟物能够模拟食品的某些特性，为研究提供了相对简单和可控的实验条件，更准确地探究挥发性有害物质的迁移机制、影响因素及迁移量的变化规律，从而为评估食品包装材料的安全性提供科学依据。不同种类的固体模拟物对挥发性有害物质的吸附能力和迁移特性也有所不同，人们更加倾向采用结构相对简单且在高温下稳定的多孔聚合物微球作为模拟物进行迁移物研究^[14,27-29]，因此选择合适的固体模拟物对于研究结果的准确性至关重要。

4 迁移规律实验分析

为验证食品接触材料及制品的迁移量，GB 31604.1和欧盟法规EN 13130-1规定：迁移实验条件应尽可能反映实际使用条件，在可预见的使用情形下应选择最严苛的实验条件（如最高使用温度和/或最长使用时间），并指出在选择油脂类食品模拟物的替代溶剂时应选择有科学证据的、测

试结果比规定的食品模拟物高的化学替代溶剂。对此，欧盟设立了化学溶剂和Tenax替代油脂模拟物（植物油）技术措施及相互转换条件。但是，多种模拟物在转换条件下的迁移结果是否能真实反映实际的迁移情况、测试所得结果是否过于严苛、能否作为合规判定的科学依据，一直是国内外争论的焦点。特别是对于挥发性物质，高温和长时间是否与迁移量值存在正相关关系，还有待进一步的研究。

目前，国内外针对食品包装材料中挥发性有害物质在固体模拟物中的迁移规律已开展研究。这些研究涵盖了多种包装材料和挥发性有害物质，采用了不同的实验方法和分析技术。研究表明，迁移过程受到多种因素的影响，包括包装材料的种类、结构和性质，挥发性有害物质的化学结构和物理性质，模拟物的种类，以及迁移条件如温度、时间、湿度等^[30-32]。

迁移实验设计与实施：选择合适的固体模拟物，如 Tenax等，设计迁移实验方案。研究不同包装材料、迁移温度、时间、接触面积等条件下，挥发性有害物质在固体模拟物中的迁移行为，测定迁移量并分析其变化规律。

迁移模型的建立与验证：通过实验方法，如气相色谱-质谱联用技术、高效液相色谱-质谱联用

技术等对食品包装材料中挥发性有害物质的迁移量进行测定,并分析其迁移规律。在迁移模型建立方面,常用的模型包括菲克定律模型、扩散-吸附模型等。这些模型能够对挥发性有害物质的迁移过程进行定量描述,但由于实际迁移过程的复杂性,模型的准确性和适用性仍有待进一步提高。通过数学模型描述挥发性有害物质的迁移过程,可为预测迁移行为提供理论依据^[33-35]。

然而,目前的研究仍存在一些不足之处。一方面,对于不同类型的食品包装材料和挥发性有害物质,其迁移规律的研究还不够全面,缺乏对多种因素相互作用的综合考虑。另一方面,现有的迁移模型大多基于理想化的假设,与实际情况存在一定

的差距,需要进一步改进和完善。

5 结语

通过对食品包装材料中挥发性有害物质在固体模拟物中的迁移规律现状研究的总结和分析,揭示当前存在的问题和不足。分析固体模拟物的选择,影响迁移的因素,介绍常用的迁移模型和检测方法,为后续研究提供参考方向。通过深入了解迁移规律,采取有效的措施减少有害物质向食品中的迁移,降低食品安全风险,保护消费者的健康,以期推动食品包装材料安全性研究的深入发展,为保障食品安全提供更有力的支持。

参考文献

- [1] 曹瑜,钟泽辉,唐聪. 食品接触材料中有害物质迁移的研究进展[J]. 包装工程,2023, 44 (15):112-121.
- [2] 中华人民共和国国家卫生健康委员会,国家市场监督管理总局. 食品安全国家标准 食品接触材料及制品迁移试验通则: GB 31604.1—2023[S]. 北京: 中国标准出版社,2023.
- [3] Commission Regulation(EU) No 10 /2011 of 14 January 2011 on Plastic Materials and Articles Intended to Come into Contact with Food[J]. Official Journal of the European Union,2011,15 (1) :1-89
- [4] United States Food and Drug Administration. Food Packaging Materials Safety Standards[S]. Code of Federal Regulations, Title 21, Parts 174-178.
- [5] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品接触材料及制品通用安全要求:GB 4806.1—2016[S]. 北京: 中国标准出版社,2016.
- [6] 韩伟,于艳军,赵青,等. 纸基包装材料中抗氧化剂及增塑剂向干性食品模拟物Tenax TA迁移的研究[J]. 分析测试学报,2016,35(8): 955-961.
- [7] 韩伟,于艳军,李宁涛,等. 纸中4-甲基二苯甲酮和正辛基苯酚向干性模拟物迁移[J]. 包装工程, 2015, 36(11): 24-29+60.
- [8] 韩伟,于艳军,李宁涛,等. 纸基食品接触材料中4-肉桂苯酚和水杨酸对叔丁基苯酯向干性食品模拟物Tenax TA的迁移[J]. 色谱, 2014, 32(12): 1349-1355.
- [9] SCHWOPE A D , TILL D E , EHNTHOLT D J ,et al.Migration of BHT from impact polystyrene to foods and food-simulating liquids[J].Industrial & Engineering Chemistry Research, 1987, 26(8):1668-1670.
- [10] PARRY S J ,ASTON D S J. Migration of inorganic contaminants into dry food from packaging made from recycled paper and board[J]. Food Additives & Contaminants,2004, 21(5):506-511.
- [11] 张宜彩,林勤保,王亮,等. 快餐包装纸中的矿物油向固体食品模拟物的迁移[J]. 食品科学, 2021, 42(14): 286-292.
- [12] 张宜彩,林勤保,陈胜,等. 餐盘纸中矿物油的检测及溯源分析[J]. 食品科学, 2021, 42(12): 261-267.
- [13] 李克亚, 胡长鹰, 钟怀宇,等. 食品包装纸中的饱和烃矿物油向食品模拟物Tenax的迁移和安全评估[J]. 现代食品科技, 2016, 32(2): 302-308.
- [14] 司晓喜,张蓉,朱瑞芝,等. 纸质包装材料中挥发性有机物迁移量的测定[J]. 包装工程, 2016,37(7): 1-7.
- [15] 王珊珊, 王国娟, 张春辉. 包装印刷油墨中的有害物质分析[J]. 化纤与纺织技术, 2022,51(5): 55-57.
- [16] 张丽芬, 强锋, 王勇.环氧乙烷检测方法研究进展与建议[J]. 化学工程与装备, 2023(3): 209-211.
- [17] BIEDERMANN M,GROB K. Mineral oil migration from food packaging: A review[J]. Food Additives &

- Contaminants: Part A, 2012, 29(4): 493–502.
- [18] GROB K, BIEDERMANN M, SCHERBAUM E. Food contamination by mineral oil: A review[J]. *European Food Research and Technology*, 2017, 243(2): 213–228.
- [19] 杨欣, 隋玲, 候新彤, 等. 塑料食品包装中受限物质检测研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2024, 15(14): 20–30.
- [20] 周裕敏, 郝郑平, 王海林. 北京城乡结合地空气中挥发性有机物健康风险评估[J]. *环境科学*, 2011, 32(12): 3566–3570.
- [21] 薄亚莉, 王卉. 环氧乙烷健康危害研究现状[J]. *职业与健康*, 2019, 35(15): 2157–2160.
- [22] 薛林美. 食品包装材料污染检测及食品安全分析[J]. *上海包装*, 2023(4): 13–15.
- [23] 魏明华, 杜延超. 食品接触纸质包装材料中有害物质的迁移及潜在危害[J]. *中国高科技*, 2021(16): 146–147.
- [24] 李金凤, 邵晨杰. 食品接触纸质包装材料中有害物质的迁移及潜在危害的研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2020, 11(4): 1040–1047.
- [25] Paper and Board Intended to Come into Contact with Foodstuffs—Conditions for Determination of Migration from Paper and Board Using Modified Polyphenylene Oxide(MPPO) as a Simulant: BS EN 14338:2003[S]. London: European Committee for Standardization.
- [26] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 食品接触材料 塑料中受限物质塑料中物质向食品及食品模拟物特定迁移试验和含量测定方法以及食品模拟物暴露条件选择的指南: GB/T 23296.1—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [27] ZÜLCH A, PIRINGER O. Measurement and modelling of migration from paper and board into foodstuffs and dry food simulants[J]. *Food Addit. Contam.*, 2010, 27(9): 1306–1324.
- [28] AURELA B, OHRA-AHO T, SODERHJELM L. Migration of Alkylbenzenes from packaging into food and tenax[J]. *Packaging Technology and Science*, 2001(14): 71–77.
- [29] ZURFLUH M, BIEDERMANN M, GROB K. Simulation of the migration of mineral oil from recycled paperboard into dry foods by tenax[J]. *Food Addit. Contam.*, 2013, 30(5): 909–918.
- [30] TRIANTAFYLLOU V I, AKRIDA-DEMERTZI K, DEMERTZIS P G. A study on the migration of organic pollutants from recycled paperboard packaging materials to solid food matrices[J]. *Food Chemistry*, 2007, 101(4): 1759–1768.
- [31] 薛美贵, 田乐园, 王双飞. 纸质包装材料中有机污染物向固体食品模拟物的迁移行为分析[J]. *包装工程*, 2016, 34(3): 10–14.
- [32] 薛美贵, 王双飞. 模拟污染物在食品(模拟物)与纸质包装材料之间的分配系数 $K_{F,P}$ 与其在正辛醇与水之间的分配系数 $K_{O,W}$ 之间的相关性分析: 一种选取迁移测试用最佳固体食品模拟物的快捷方法[C]. // 2013中国食品包装学术会议论文摘要集. 天津, 2013: 177–178.
- [33] 谢晓超, 梁健能. 食品接触包装材料迁移模型研究[J]. *质量与认证*, 2021(S1): 200–202.
- [34] 池海涛, 程静, 高峡, 等. 食品接触塑料中添加剂迁移模型研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2015, 6(9): 3315–3322.
- [35] 郝倩. 食品接触材料中有害物质的迁移行为及其模型建立[D]. 天津: 天津大学, 2014.