DOI:10.12441/spyswjs.20240617002 [文章编号] 1673-1689(2025)08-0001-13

食品外包装消杀次生危害物的产生及迁移行为研究进展

任梦佳[1,2,3] 刘 野[1,2,3] 王金鹏[1,2,3] 毕 爽[1,2,3*]

(1. 北京工商大学食品与健康学院,北京 100048; 2. 北京市食品营养与人类健康高级创新中心,北京 100048; 3. 北京市食品添加剂技术研究中心,北京 100048)

摘要:食品外包装消杀是阻断新型冠状病毒传播、避免食源性病毒交叉污染的重要技术手段。然而,消杀后产生的次生危害物不仅种类复杂、特性各异,其形成还受多种因素影响,且关于次生危害物从包装材料到食品迁移行为的相关研究尚未系统梳理。因此,作者围绕食品外包装消杀后产生的次生危害物,系统综述了消杀技术与次生危害物产生的对应关系、次生危害物的特性、影响次生危害物形成的因素和次生危害物的检测技术。通过概述经典迁移模型,总结不同消杀技术下产生的次生危害物的迁移规律及危害,归纳预防迁移的具体措施,为预包装食品消杀后在运输和贮藏环节的安全保障提供指导。

关键词:食品外包装;消杀;次生危害物;迁移模型;预防措施

Advances in the Generation and Transport Behavior of Secondary Hazards from Food Packaging Sterilization

REN Mengjia[1,2,3] *LIU Ye*[1,2,3] *WANG Jinpeng*[1,2,3] *BI Shuang*[1,2,3*]

(1. School of Food and Health, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China; 2. Beijing Advanced Innovation Center for Food Nutrition and Human Health, Beijing 100048, China; 3. Beijing Engineering and Technology Research Center of Food Additives, Beijing 100048, China)

Abstract: Food packaging sterilization is an important technical means to avoid the spread of SARS-CoV-2 and the cross-contamination of foodborne viruses. However, the secondary hazards generated after sterilization are complex and have different characteristics, and a wide range of factors affect the formation of these hazards. The studies about the migration behavior of secondary hazards from packaging materials to food remain to be reviewed. Therefore, the author systematically reviewed the correspondence between sterilization technologies and secondary hazards generated after food packaging sterilization, the characteristics of secondary hazards, the factors affecting the formation of secondary hazards, and the detection technologies of secondary hazards. By outlining the classical migration model, the author summarized the migration patterns and harm of secondary hazards generated by different sterilization technologies and the specific measures to prevent the migration, thus providing guidance for guaranteeing the safety of pre-packaged food during transportation and storage after sterilization.

Keywords: food packaging; sterilization; secondary hazards; migration model; prevention measures

---

基金项目:国家“十四五”重点研发计划项目(2022YFF1103105)。

通信作者:毕爽(1992—),女,博士,讲师,硕士研究生导师,主要从事食品风味化学、食品加工技术与理论研究。E-mail:bishuang@btbu.edu.cn

收稿日期:2024-06-17 **修回日期:**2024-08-23

食品外包装安全是食品安全的重要组成部分，自2020年以来，新型冠状病毒肺炎已成为影响全球卫生安全的重大公共卫生事件，中国疾病预防控制中心曾在冷链食品外包装上分离到新型冠状病毒活体[1]；此外，食源性病毒污染事件频发。这一现象不仅表明病毒可以在包装表面存活，更凸显了病毒控制的重要性。基于此，人们开始采用物理消杀或化学消杀方法去除包装表面的病毒，但物理消杀往往会促使包装材料表面生成自由基、甲苯等次生危害物，化学消杀则存在包装表面残留氰尿酸晶体、氯酸盐等次生危害物的风险。这些次生危害物不仅存在于食品外包装表面，还会逐渐向食品中迁移，进而影响食品安全。然而，截至目前，关于食品外包装经消杀产生次生危害物的迁移行为的研究鲜见报道。作者首先阐述了消杀技术与次生危害物产生的对应关系，总结了次生危害物的特性、影响因素及检测技术；其次，从食品包装的角度出发，归纳“包装材料—食品”路径下次生危害物的迁移模型，并分析影响迁移过程的主要因素；最后，针对迁移行为的潜在危害提出预防措施，为有效提高消杀后包装食品的安全性提供理论指导。

1 食品外包装消杀技术及次生危害物的产生

食品外包装作为防止食品污染的附加层，常见类型包括纸类包装、塑料包装、玻璃包装及金属包装等。为避免病毒以食品外包装为载体传播给人体，通常采用物理消杀技术或化学消杀技术对其进行处理。由于包装材料的特性存在差异、消杀方式各不相同，消杀后产生的次生危害物在种类与形成规律上也不尽相同。

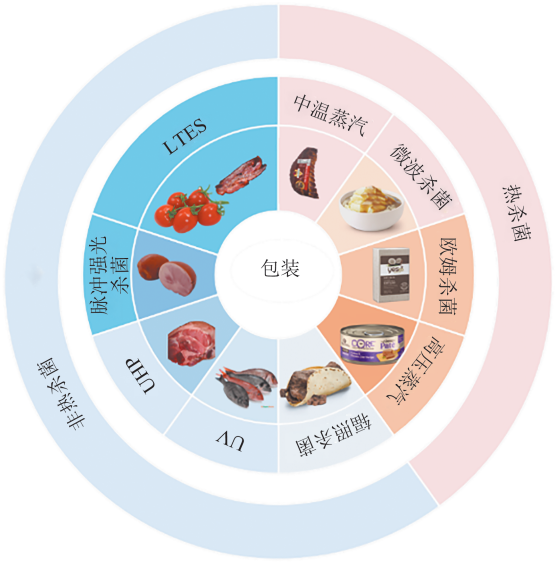
1.1 物理消杀产生的次生危害物

食品外包装的物理杀菌技术主要包括热杀菌和非热杀菌。其中，热杀菌主要包括蒸汽杀菌、微波杀菌和欧姆杀菌。相关研究表明，热杀菌可显著降低食品外包装的微生物数量。Zhao等[2]采用中温蒸汽杀菌处理真空包装发酵猪肉干的外包装，该方法可在保证食品理化品质的同时，将外包装表面的微生物数量控制在安全范围；气调包装后的胡萝卜经低功率微波热烫后，微生物生长得到显著抑制[3]；Tiravibulsin等[4]采用欧姆辅助热杀菌处理软包装椰奶，可有效去除包装表面的微生物。

非热杀菌技术包括辐照杀菌、超高压杀菌、紫外线杀菌、脉冲强光杀菌及低温等离子体杀菌等。其中，辐照杀菌的优势在于可穿透食品外包装，杀菌效果显著[5]，该技术主要包括电子束、X射线和γ射线3种类型[6]。将电子束辐照技术应用于聚合物膜时，既能在不添加化学试剂的情况下增强膜的机械性能，又可以实现对聚合物膜的杀菌[7]。尽管食品在特定辐照剂量（<10 kGy）下的安全性已得到证明，但辐照过程中仍需精确调控辐照剂量，防止食品感官品质与营养价值的大幅下降[8]。王安琪等[9]对真空包装后的鱼类产品进行超高压处理，发现在压强430 MPa、保压时间20 min、处理温度30 ℃的条件下，样品的菌落总数显著降低。需要注意的是，应用超高压杀菌技术时需要对食品进行密封包装，且因高压会导致食品体积缩小，故只能使用软包装材料。有研究表明，15 W紫外线灯在移动的食品包装材料上方垂直照射时，完全杀灭0~10 个/cm^2的细菌仅需4.8 s，完全杀灭100个/cm^2的细菌仅需5.6 s[10]。但紫外线杀菌技术也存在应用局限：一是紫外线波长可能对人体造成危害，二是紫外线易导致食品中有机分子结构破坏[11]。与辐照杀菌、超高压杀菌、紫外线杀菌技术相比，脉冲强光杀菌技术在处理复合包装香肠时，不仅能显著减少包装表面病原体数量、延长产品贮藏期，而且不影响产品质量[12]。除上述物理杀菌技术外，低温等离子体作为一种新型杀菌技术，目前应用较为广泛。与超高压杀菌的包装局限和紫外线杀菌的应用限制不同，低温等离子体杀菌不仅无此类局限，还具有高效的特点[13]，同时能抑制包装年糕表面大肠杆菌的生长[14]。

在次生危害物方面，蒸汽杀菌和欧姆杀菌的杀菌对象范围较窄，且不常用于食品的外包装杀菌，因此其是否产生次生危害物及危害物种类目前尚不明确；微波杀菌对包装材料要求较高，通常需使用高阻隔性聚合物，该技术一般不产生次生危害物[15]；经辐照处理的低密度聚乙烯（PE）膜中，可能存在自由基、脂肪烃、羧酸类、甲苯及苯酚等次生危害物[16]，而聚丙烯包装材料经辐照后会发生氧化反应，生成丙酮、2-甲基戊酮、异丁烷、乙酸甲酯等[17]；截至目前，尚无文献报道超高压杀菌[18]、脉冲强光杀菌和低温等离子体杀菌[19]过程

中存在次生危害物产生的情况。热杀菌和非热杀菌的种类及其适用的食品杀菌范围见图1。



UV—紫外线杀菌；UHP—超高压杀菌；LTES—低温等离子体杀菌。

图1　热杀菌和非热杀菌的种类及其适用的食品杀菌范围

Fig. 1　Thermal and non-thermal sterilization methods and their application scope in food sterilization

1.2　化学消杀产生的次生危害物

化学消杀是通过消毒剂杀灭食品包装表面的细菌与病毒，使用时需严格控制消毒剂浓度和作用时间，主要包括臭氧消毒、含氯消毒、二氧化氯消毒及表面活性剂消毒等。臭氧消毒主要分为气体熏蒸和臭氧水作用2种方式，其杀菌效果随湿度升高而增强。有研究表明，用臭氧对装载过食品的纸箱进行消毒时[20]，臭氧对纸箱表面自然菌的平均消杀率可达100%；但当臭氧作用于食品的塑料包装时，不仅会与塑料表面的氧化物反应生成羟基化合物、酮基化合物和羰基化合物，还可能导致部分增塑剂被释放出来。含氯消毒剂主要包括次氯酸钠和二氯异氰尿酸钠，其中次氯酸钠可使致病菌和微生物丧失活性，用150 mg/L次氯酸钠处理食品包装材料表面沾染的替代病毒φX174，作用10 min后，塑料与玻璃表面消杀率均达到100.00%[21]。二氯异氰尿酸钠作为含氯消毒剂的有效成分，用于食品外包装消杀时，其溶解于水后会产生氰尿酸晶体和次氯酸，其中氰尿酸晶体会残留在包装表面，成为次生危害物[22]。疫情期间，部分口岸规定进口冷链食品外包装需用二氧化氯消毒液处理30 min，而二氧化氯消毒液通常会导致包装材料表面残留氯酸盐和高氯酸盐[23]。表面活性剂因具有亲水亲油的性质，使用后易在包装材料表面残留。磺酸盐作为一种阴离子表面活性剂，其在特定条件下会产生含硫副产物，如溴醇磺酸盐、二卤溴磺酸盐和溴磺内酯磺酸盐。不同食品类别的消杀方式与次生危害物种类对应关系见表1。这些次生危害物若迁移到食品中，可能会对人体健康造成潜在风险，因此需系统研究并明确次生危害物的特性、影响因素及检测技术。

2　食品外包装消杀次生危害物的特性、影响因素及检测技术

2.1　消杀产生的次生危害物特性

物理消杀过程中产生的次生危害物具有致

表1　食品消杀方式与生成次生危害物种类的对应关系

Table 1　Correspondence between food sterilization methods and the secondary hazards generated

消杀类别	消杀方式	食品类别	包装	次生危害物种类	参考文献
物理消杀	微波杀菌	果蔬制品	聚合物包装	—	[24]
	欧姆杀菌	果蔬制品	塑料袋	—	[25]
	辐照杀菌	肉制品	聚酰胺薄膜	己内酰胺、2-环戊基环戊酮和醛	[26]
	超高压杀菌	肉制品	气调包装	—	[27]
	脉冲杀菌	果蔬制品	气调包装	—	[28]
	低温等离子体杀菌	果蔬制品	塑料盒包装	—	[29]
化学消杀	臭氧消毒	—	塑料	羟基、酮基和羰基化合物	[30]
	含氯消毒	—	PE涂层纸、聚丙烯塑料	氰尿酸晶体	[31-32]
	二氧化氯消毒	奶制品	—	氯酸盐和高氯酸盐	[33]
	表面活性剂消毒	—	—	溴醇磺酸盐、二卤溴磺酸盐和溴磺内酯磺酸盐	[34]

注：“—”表示文献中未提及。

癌、致畸和致突变的特点，因此备受消费者关注。脂肪烃、羧酸类等次生危害物不仅会影响包装内食品的感官特性，还会缩短产品保质期[35]。甲苯[36]和苯酚[37]均可扩散到食品中，从而对人体造成伤害。辐照后的氧化产物丙酮、2-甲基戊酮、异丁烷、乙酸甲酯等主要对包装材料的机械性能产生影响。食品包装材料表面印刷的油墨成分，经辐照杀菌后会分解产生自由基，此类自由基的生物活性较高，易与其他物质发生化学反应。除辐照外，自动氧化与酶促氧化也会生成不同种类的自由基，少量且受控的自由基对人体无害，但超过限量后危害程度会显著增加，因此开发高效的自由基清除剂已成为当前的重要研究内容[38]。

在4种化学消杀方式中，臭氧与塑料表面的氧化物反应，生成羟基化合物、酮基化合物和羰基化合物，这些化合物不仅会使塑料表面变得粗糙，降低其光泽度与透明度，还会导致塑料材料的拉伸强度、抗冲击性等力学性能下降，进而使塑料制品经臭氧消毒后更易破损、脆裂。含氯消毒剂产生的次生危害物氰尿酸晶体易残留在包装表面，进入人体后可能造成肾小管上皮细胞坏死或增生、中性粒细胞浸润及矿化与纤维化[22]。二氧化氯消毒剂的次生危害物为氯酸盐和高氯酸盐，它们会抑制甲状腺对碘的吸收。2020年欧盟最新法规规定了婴幼儿食品中氯酸盐和高氯酸盐的限量标准；我国在GB 5749—2022《生活饮用水卫生标准》中也明确规定生活饮用水中高氯酸盐限值为0.07 mg/L、氯酸盐限值为0.70 mg/L[39]，但目前尚无针对其他食品中这2种物质的限量法规要求[40]。磺酸盐类表面活性剂会在包装表面产生含硫次生危害物（如溴醇磺酸盐、二卤溴磺酸盐和溴磺内酯磺酸盐等），这些物质可使细胞毒性提升数倍。然而，表面活性剂产生的次生危害物是否会迁移到食品中仍需进一步研究。

2.2 次生危害物形成的影响因素

食品外包装消杀过程中会产生次生危害物，但其生成需要满足特定条件。研究表明，次生危害物的形成主要与pH、温度及作用时间相关。

2.2.1 pH

化学消杀后次生危害物的生成与pH密切相关。例如，在臭氧消毒过程中，随着pH升高，臭氧分子会分解产生自由基，进而增强对有机物的降解能力；在含氯消毒过程中，pH越高，次氯酸分解产生的氯酸根离子越多，次生危害物生成量也随之增加。在二氧化氯消毒过程中，氯酸盐的形成速率同样受pH的影响：当pH为0~2.0时，氯酸盐形成速率与氢离子浓度呈正比；当pH为2.0时，氯酸盐形成速率最小；当pH为2.0~3.4时，氯酸盐形成速率随pH升高逐渐上升；而在pH为3.4~9.5时，氯酸盐形成速率基本保持恒定[41]。

2.2.2 温度

次生危害物的反应以氧化还原反应、取代反应和加成反应为主。在一般条件下，反应温度越高，次生危害物生成量越大。例如，温度会显著影像化三氯甲烷（TCM）的生成速率，其在20 ℃的生成速率比在6 ℃时快45%[42]。在消杀过程中还存在一些不稳定的次生危害物，当实际反应温度超过其最佳反应温度时，这类次生危害物会发生分解，导致其生成量下降。Huang等[43]在研究温度对卤代乙腈（HANs）生成的影响时发现，尽管温度升高会促进HANs形成，但当温度达到45 ℃时，HANs的生成量反而会有所降低。

2.2.3 作用时间

随着作用时间的延长，次生危害物生成量不断增加，直至达到平衡。但对于稳定性较差的次生危害物，作用时间对其生成量的影响呈现不同规律：在反应初期，其生成量会显著升高，达到峰值后则逐渐降低。崔晓宇等[44]在研究消毒副产物的生成规律时发现，随着反应时间的延长，二氯乙酸（DCAA）、三氯乙酸（TCAA）和TCM的浓度持续升高；而二氯乙腈（DCAN）、三氯硝基甲烷（TCNM）和1，1，1-三氯丙酮（1，1，1-TCP）等副产物在前12 h内浓度增长较快，超过12 h后，这几种副产物的增长速率明显减缓。

2.3 次生危害物的检测技术

次生危害物的检测技术主要包括色谱法和质谱法。单独使用离子色谱法可以测定饮用水中副产物亚氯酸盐（ClO_2^-）、氯酸盐（ClO_3^-）、DCAA和TCAA含量[45]。色谱法虽适用于次生危害物的定量分析，但定性分析难度较大，而质谱法进行定量分析需要一系列分离纯化操作，因此将2种方法结合，可形成兼具定量与定性分析能力的检测技术。针对食品外包装物理消杀过程中可能产生的自由基、脂肪烃、甲苯、苯酚等次生危害物，研究人员采

用固相萃取-气相色谱法、卤素特异性检测器（XSD）耦合检测法、三维荧光光谱多变量分析法等技术，建立了相应的次生危害物检测方法。针对化学消杀过程中可能产生的氯酸盐、高氯酸盐等次生危害物，采用气相色谱电子捕获检测器法、气相色谱质谱检测器法、气相色谱-串联三重四极杆质谱法（GC-MS/MS）、超高效液相色谱电喷雾电离三重四级杆质谱法（UPLC/ESI-tqMS）、高分辨率质谱法（HRMS）、全二维气相色谱-单四极杆质谱法并联电子捕获检测器法等，建立了相应的次生危害物检测方法。

传统的色谱-质谱联用技术存在耗时长、维修流程复杂且成本高的问题，极大地限制了其对次生危害物的分析效率。近年来，开发快速高效的次生危害物检测方法已成为该领域的研究热点。Huo等[46]发现，不同形状与形态的纳米传感器（AuNPs）作为探针，可用于设计检测各类有害物质的纳米生物传感器。另有研究基于泡沫镍纳米复合材料构建电化学传感器，实现了对食品中亚硝酸盐的检测[47]。随着自动化技术的发展，功能性核酸传感技术因具有灵敏度高、特异性强、成本低、操作简便等优势，在有害物质检测（尤其是现场快速检测）领域展现出良好的技术应用前景。通过范德华力、静电相互作用、氢键及形状互补性，适配体能够特异性识别危害物[48]。已有研究表明，生物传感器可检测苯、亚硝胺[49]等物理消杀过程可能产生的次级危害物，也可检测食品中的加工污染物[50]，但目前适配体-生物传感器联用检测方法尚未具体用于检测消杀过程产生的次生危害物。

光谱成像技术是检测次生危害物的有效工具，该技术主要包括太赫兹（THz）光谱、高光谱成像和拉曼光谱[51]等。其中，THz光谱主要用于检测5-羟甲基糠醛、丙烯酰胺等化学污染物和外源性异物等物理污染物，但该技术存在穿透力低、灵敏度低、检测限高等缺点[52]。相比之下，高光谱成像和拉曼光谱不仅可以检测化学污染和物理污染，还能检测真菌、食源性病毒等生物污染；且拉曼光谱技术与显微镜等辅助技术结合时，可实现对微/纳塑料（micro/nano-plastics，MNPs）这类新型污染物的检测[53]。但高光谱成像成本较高[54]，因此在无需获取成像信息的场景下，研究人员会优先选择光谱技术；而拉曼光谱的局限性在于仅适用于小体积样品的检测[55]。

不同消杀方式产生的次生危害物对应的检测方法见表2。目前，将色谱法与前处理技术结合，或与质谱法联用检测次生危害物是较为常见的手段（如离子色谱-串联质谱法、超高效液相色谱-串联质谱法等）。由于生物传感器与光谱技术在食品外包装表面次生危害物检测中的应用较少，因此未在表中列举相关案例。

由表2中前处理过程可以看出，多数次生危害物存在于待检测食品中，这表明食品外包装消杀产生的次生危害物已从包装材料表面迁移至食品中。该迁移过程会降低食品的感官品质，还可能对人体健康造成潜在危害。因此，构建迁移模型并明确影响迁移的因素可有效评估消杀后包装食品的安全性；同时，系统总结迁移风险有助于制定针对性预防措施，对控制食品污染、提高食品安全性具有重要意义[60]。

3 次生危害物的迁移模型及影响迁移的因素

3.1 次生危害物经“包装材料—食品”路径的迁移模型

食品包装是影响食品安全的重要环节，因此研究食品包装材料中次生危害物的迁移过程具有重要意义。迁移模型可用于预测次生危害物的迁移量，其构建不仅需要考虑包装材料的层数、传质特性，还需要考虑各种外部环境因素对迁移的影响。有效构建迁移模型不仅能大幅缩短试验周期，还可为研发更安全的包装材料提供理论支撑。作者基于Fick扩散定律阐述迁移模型，根据食品与包装材料的接触方式，将迁移模型分为单层模型、双层模型和多层模型。

3.1.1 单层模型

单层模型指包装材料由单层聚合物组成，主要包括Crank模型、Piringer模型、Weibull模型，见表3。其中，Crank模型的表达式相对简单，其适用前提是假设迁移物浓度较高。Weibull模型因参数简单、模型适应性强而得到广泛应用，该模型的2个参数本身不具备物理意义，但其作为基于试验数据建立的经验模型，能通过预测值真实反映迁移过程。纪水琳[61]针对荧光增白剂建立了Weibull模型与Crank模型，并对两者进行了比

表2 消杀过程中产生的次生危害物检测方法

Table 2 Methods for detecting secondary hazards generated from sterilization process

次生危害物种类	次生危害物	前处理	检测方法	检测限	参考文献
含氯消毒副产物	氰尿酸	采用KOH溶液进行预处理后，通过纤维素过滤器去除不溶性颗粒	离子色谱法	3.6 μg/L	[56]
二氧化氯消毒副产物	氯酸盐、高氯酸盐	经甲酸水溶液提取、乙腈沉淀蛋白质、乙腈饱和正己烷除去脂肪，以甲酸铵水溶液和乙腈为流动相进行梯度洗脱	超高效液相色谱-串联质谱法	高氯酸盐7.5 μg/kg、氯酸盐15.0 μg/kg	[57]
		用水萃取和乙腈沉淀蛋白质后，用MCX柱纯化样品，然后采用甲胺水溶液和乙腈为流动相进行梯度洗脱，在离子色谱柱上分离	离子色谱串联质谱法	高氯酸盐1.5 μg/kg、氯酸盐15.0 μg/kg	[58]
		用水和甲醇提取大米样品中的次生危害物，并通过固相萃取纯化	反相超高效液相色谱-串联质谱法	高氯酸盐10 μg/kg、氯酸盐20 μg/kg	[59]

表3 单层模型

Table 3 Single-layer models

模型	表达式	字母含义	研究结果	参考文献
Crank模型	$M_t=2C_0\sqrt{\frac{D_t}{\pi}}$	t为迁移时间，C_0为最初的迁移物浓度，M_t为t时刻的迁移量，D_t为t时刻的扩散系数	用Crank模型和Weibull模型检测荧光增白剂的迁移量，发现Weibull模型的拟合度更高	[61]
Piringer模型	$D=10^4\exp\left(A_p-0.315M_r^{2\beta}+0.003M_r-\frac{C+10\,454}{T}\right)$	A_p为固定参数，M_r为相对分子质量，T为热力学温度，β为形状参数，C为常数，D为扩散系数	根据Piringer模型的数据拟合得到扩散系数和分配系数，分析影响迁移的因素	[62]
Weibull模型	$\frac{M_t-M_\infty}{M_0-M_\infty}=\exp\left[-\left(\frac{t}{\tau}\right)^\beta\right]$	M_t为t时刻的迁移量，M_∞为达到平衡时的迁移量，t为迁移时间，τ为时间参数（与迁移速度相关），β为形状参数	通过检测2,6-二叔丁基对甲酚、四苯丙酸季戊四醇酯的迁移量，建立Weibull和Piringer模型，发现Weibull模型更接近实际值	[63]

较，发现Weibull模型更符合实际迁移趋势。Piringer模型的预测结果通常偏高，Reinas等[64]通过该模型对比2种抗氧化剂的迁移情况，发现模型计算的总体迁移值比实际迁移值高出几个数量级，因此Piringer模型可用于预测迁移物的最大迁移量。相较于Crank模型，Weibull模型的优势在于无需考虑迁移过程的具体机制，可直接针对迁移结果展开研究；另外，与传统的Piringer模型相比，Weibull模型能通过准确描述迁移规律，更好地反映迁移物的实际迁移情况。综上可知，Weibull模型的适用性更强。PE、聚氯乙烯（PVC）等聚合物包装材料较适合采用单层模型预测其次生危害物的迁移情况。

3.1.2 双层模型

双层模型指包装材料由双层聚合物构成，L_1和L_2分别为A层和B层的厚度，见图2。其核心假设为2层材料间呈理想接触状态：在初始时间，迁移物仅存在于A层中，B层中无迁移物。在Crank模型基础上，基于Fick扩散定律建立Begley-Hollifield模型，该模型的前提假设是“2层材料相同”，且设定A层的迁移物浓度恒定，B层迁移物初始浓度为0，同时B层与食品直接接触。在接触的过程中，迁移物需从A层扩散至B层，最终进入食品。另一类双层模型为Laoubi-Vergnaud模型，其建模条件为：不考虑2层材料共挤时的迁移行为，仅考虑A层向B层的单向迁移，且迁移物未扩散至B层外侧。通过对比验证发现，Laoubi-Vergnaud模型和Begley-Hollifield模型均能解释双层材料中迁移物的迁移现象，但Laoubi-Vergnaud模型的预测结果与试验结果更为接近，而Begley-Hollifield模

型的预测值远高于实际迁移值，因此Laoubi-Vergnaud模型在双层模型的迁移预测中实用性更强。在实际应用中，聚丙烯（PP）+PE、聚对苯二甲酸乙二醇酯（PET）+PE、尼龙（PA）+PE等常见双层复合结构，因具有较好的防渗透性能和抗撕裂性能，较适合采用双层模型进行迁移预测。

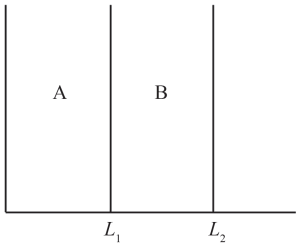


图2　双层材料结构示意图

Fig. 2　Schematic diagram of double-layer material structure

3.1.3　多层模型

以三层模型为例，其原生层在两端，迁移物位于中间层，即C、E层为原生层，D层为迁移物层，L_3、L_4和L_5分别为C层、D层和E层的厚度，见图3。由于原生层与中间层之间存在浓度差，会驱动迁移物从原生层向两边迁移，但该模型并未考虑迁移物与食品的接触过程以及共挤时的迁移。相较于双层模型，三层材料的分析与计算难度明显增加，通常需要在计算双层模型的基础上，结合第一层与第二层的厚度进行积分运算，最终得到C层和D层的迁移量。黄秀玲等[65]发现Laoubi-Vergnaud模型可用于纸塑复合包装材料中化合物的迁移预测，因此该模型可用于求解多层薄膜的迁移问题。但截至目前，关于如何应用多层模型预测次生危害物仍是有待解决的问题。在实际应用中，三层结构的通气膜、防雾膜、高强度膜，以及四层结构的聚偏二氯乙烯（PVDC）、乙烯－乙烯醇共聚物（EVOH）、PA和PE，均具备较高的氧气阻隔性能，适合采用多层模型开展其迁移预测。

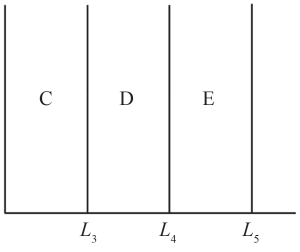


图3　三层材料结构示意图

Fig. 3　Schematic diagram of three-layer material structure

3.2　影响迁移的因素

次生危害物的迁移主要与次生危害物种类、温度、作用时间及食品包装材料等因素相关。

3.2.1　次生危害物种类

目前市面上常用的包装材料以塑料和纸质为主。包装材料类型不同，次生危害物的迁移过程也会随之变化。对于塑料包装材料，可能存在的次生危害物主要包括TCM、脂肪烃、羧酸类物质、甲苯和苯酚等；对于纸质包装材料，可能存在的次生危害物主要包括甲醛和有机氯化物等。该研究的迁移对象主要来源于消杀后产生的次生危害物，不同消杀方式会产生不同类型的次生危害物；但在实际场景中，消杀处理未必能完全去除包装材料自身携带的危害物，甚至部分原有危害物可能与消毒剂发生反应产生新的危害物，导致包装材料表面危害物种类进一步增加。不同种类的危害物各有其独特的迁移规律，是引发次生危害物迁移的重要因素之一。

3.2.2　温度和作用时间

除包装材料外，温度和作用时间对次生危害物的迁移也有重要影响。温度升高会加快危害物的迁移速率，这也是部分食品包装袋需标注最高使用温度的原因。一般情况下，迁移动力学与一阶反应近似，迁移程度与迁移时间的平方根呈正比，即迁移时间越长，次生危害物的迁移程度通常越大。陈文林[66]在研究塑料包装中苯乙烯迁移行为时发现，苯乙烯的迁移量会随着温度和作用时间的变化而改变。另有研究表明，邻苯二甲酸酯类物质在迁移时，若浸泡时间相同，模拟液中塑化剂的迁移量会随着温度的升高而增加；若温度保持一致，迁移量则会随着浸泡时间的延长而增加[67]。

3.2.3　食品包装材料

一般情况下，纸质材料的多孔结构会促进物质迁移，因此纸质材料的次生危害物迁移速率通常高于PE和PP等塑料。即使同为塑料材料，不同种类塑料的迁移速率也各不相同。例如，PET和PA的总体迁移速率低于PE，这种差异可能与聚合物的结晶度相关——结晶度会直接影响聚合物的阻隔性和机械性能等[68]。即使是采用单一聚合物，迁移速率也可能因包装形式的不同而变化。此外，包装材料的厚度也是影响迁移的重要因素

之一。与薄层材料相比，次生危害物迁移需要更长的时间才能扩散至厚层材料内部；对于从模拟物或食品成分吸收到聚合物内部的分子，其迁移过程也可能呈现类似规律[69]。

4 次生危害物迁移的潜在风险及预防迁移的措施

4.1 消杀产生的次生危害物迁移的潜在风险

4.1.1 影响感官品质

由于包装材料成分复杂，经消杀处理后，次生危害物会从包装表面析出并迁移进入食品，可能导致食品感官品质劣变，如产生异味、改变颜色及出现污点等。例如，塑料包装中的单体残留物在与聚合物基质结合状态下通常稳定且无毒，但一旦迁移到食品中并与食品发生相互作用，就会降低包装食品的营养价值与感官品质[70]。有研究表明，白酒包装容器中迁移出的金属离子会对白酒的感官品质、安全性及稳定性产生影响[71]。

4.1.2 影响人体健康

在食品外包装消杀产生的次生危害物中，迁移到食品再被人体摄入的次生危害物浓度通常小于初始浓度，即便如此，多数次生危害物对人体仍具有较强的毒性。其中，部分有机溶剂可能导致人体慢性中毒，有机卤素化合物对肝脏毒性较高，有机氮化物对皮肤毒性较高，邻苯二甲酸酯类物质则可能影响人体生殖系统，造成生殖能力下降。次生危害物迁移研究通常并非局限于单一或几种物质，这些物质的迁移情况取决于包装材料的接触层、接触时间、接触温度等多种因素。因此，次生危害物是否会对人体健康构成更高风险，还需结合具体条件进一步判断[72]。

4.2 预防次生危害物迁移的措施

4.2.1 改变消毒剂的类型

针对化学消毒过程中消毒剂与包装材料相互作用的问题，一般可通过改变消毒剂类型减少次生危害物的产生，进而降低次生危害物迁移的概率。与含氯消毒相比，二氧化氯消毒能有效减少有机卤代副产物的生成[73]，虽然几乎不形成三卤甲烷[74]，但仍会生成三氯甲醇和溴二氯甲醇等其他卤代副产物[75]。近年来，二氧化氯与氯的复合消毒剂备受关注。有研究发现，二氧化氯与含氯消毒剂联合使用时的抗菌效果优于单一消毒剂[76]，且复合消毒剂还能促进微生物降解、减少次生危害物的形成量并降低其毒性。此外，采用二氧化氯进行预氧化处理有助于减少氯等有机副产物的生成，同时降低副产物的遗传毒性与细胞毒性[77]。

4.2.2 改变消杀方式

要控制次生危害物的迁移，也可以通过改变消杀方式将迁移量降至最低。包装材料经辐照处理后，其中的抗氧化剂会迁移到食品中，且迁移量随着辐照强度的增大而增加[78]。对聚乳酸基纳米银复合膜的研究结果表明，经超高压处理过的复合膜，其纳米银粒子的迁移量低于未经超高压处理的复合膜，且在压强达到200 MPa时迁移量最小[79]。高文婧等[80]对食品包装材料开发中具有潜力的生物可降解聚合物——复合蛋白膜进行了约10 min、低能率的等离子体处理，发现该消杀方式不仅能杀灭薄膜表面的菌落，还可改变薄膜表面结构，提升包装材料的阻隔性能与热稳定性。

4.2.3 开发新型包装材料

除上述2种方式外，还可通过改变包装材料的性质降低次生危害物迁移的概率。目前，多数复合包装材料在抗菌性和保鲜性方面表现优异，复合之后的包装材料能有效杀灭微生物；另外，近些年研究的基于噬菌体的食品包装薄膜可特异性杀灭食源性病原体，且不会伤害有益细菌或对人类造成感染[81]，但这类材料是否存在次生危害物迁移仍需进一步探究。次生危害物迁移是开发新型食品包装材料必须优先考虑的安全问题，尽管新型食品包装材料的开发在成本和技术难度上仍面临诸多挑战，但其应用前景广阔，未来有望研发出更加高效、环保、安全的功能性食品包装材料[82]。

5 展望

针对食品外包装消杀产生的次生危害物风险不明的问题，未来的方向可能会侧重于研究次生危害物现场查验技术及相关产品，并结合高精准检测方法，实现次生风险一体化高效查验。同时，如何有效去除消杀后产生的次生危害物仍有待进一步研究，这也对风险查验技术提出了更高的要求。相关研究人员可基于上述技术与方法，建立能减少次生危害物产生的消杀方法，确保在消杀

过程中及消杀后均不会产生污染环境、危害人体健康的物质，最终实现“有效消毒、绿色环保”的目标。

参考文献

[1] 王崇民. 中国疾病预防控制中心在冷链食品外包装分离出新冠活病毒[J]. 食品安全导刊，2020(31)：14.
WANG C M. A novel coronavirus living virus isolated from cold chain food packaging by China Center for Disease Control and Prevention[J]. China Food Safety Magazine，2020(31)：14.(in Chinese)

[2] ZHAO C Q，DAI J P，CHEN F F，et al. The effect of different sterilization methods on the shelf life and physicochemical indicators of fermented pork jerky[J]. Frontiers in Nutrition，2023，10：1240749.

[3] EZEANAKA M C，张憨，陈凯，等. 微波热烫和气调包装对中央厨房用胡萝卜理化特性及品质的影响[J]. 食品与生物技术学报，2022，41(5)：46-55.
EZEANAKA M C，ZHANG M，CHEN K，et al. Influence of microwave blanching and modified atmosphere packaging on physiochemical properties and quality of carrot used in central kitchen processing[J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2022，41(5)：46-55.(in Chinese)

[4] TIRAVIBULSIN C，LORJAROENPHON Y，UDOMPIJITKUL P，et al. Sterilization of coconut milk in flexible packages *via* ohmic-assisted thermal sterilizer[J]. LWT-Food Science and Technology，2021，147：111552.

[5] 岳玲，孔秋莲，颜伟强，等. 电子束辐照对冷鲜鸡肉的杀菌效果[J]. 食品与生物技术学报，2018，37(12)：1319-1323.
YUE L，KONG Q L，YAN W Q，et al. Research on electron beam irradiation on sterilizing effects of refrigerated chicken[J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2018，37(12)：1319-1323.(in Chinese)

[6] 姚钢，李冰，孙福伟，等. γ射线对胚芽米蛋白结构、乳化特性和食用品质的影响[J]. 食品科学技术学报，2022，40(2)：62-71.
YAO G，LI B，SUN F W，et al. Effects of γ-rays pretreatment on protein structure，emulsifying properties and edible quality of germ rice[J]. Journal of Food Science and Technology，2022，40(2)：62-71.(in Chinese)

[7] HAJI-SAEID M，SAMPA M H O，CHMIELEWSKI A G. Radiation treatment for sterilization of packaging materials[J]. Radiation Physics and Chemistry，2007，76(8/9)：1535-1541.

[8] 梅俊，许振琨，郁慧洁，等. 冷链物流中海水鱼的腐败机制及保鲜技术研究进展[J]. 食品与生物技术学报，2022，41(7)：84-99.
MEI J，XU Z K，YU H J，et al. Research progress on spoilage mechanism and preservation technology of marine fish in cold chain logistics[J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2022，41(7)：84-99.(in Chinese)

[9] 王安琪，黄睿，胡晓苹，等. 超高压工艺优化及其对即食金鲳鱼质构的影响[J]. 食品研究与开发，2017，38(5)：123-128，142.
WANG A Q，HUANG R，HU X P，et al. Optimization of high pressure processing and its effect on the texture of product of golden pompano[J]. Food Research and Development，2017，38(5)：123-128，142.(in Chinese)

[10] 孙书静. 食品无菌包装技术的发展概况[J]. 塑料包装，2015，25(3)：13-15.
SUN S J. The development of food aseptic packaging technology[J]. Plastics Packaging，2015，25(3)：13-15.(in Chinese)

[11] LI X Y，ZHAO Y F，ZHANG L H，et al. Research progress of disinfection and sterilization in cold chain of fresh foods[J]. Science and Technology of Food Industry，2021，42(11)：414-418.

[12] KRAMER B，WUNDERLICH J，MURANYI P. Inactivation of *Listeria innocua* on packaged meat products by pulsed light[J]. Food Packaging and Shelf Life，2019，21：100353.

[13] 邓伟丽，吴佳敏，黄惠梅，等. 低温等离子体对甘蔗汁杀菌效果及品质的影响[J]. 食品与生物技术学报，2023，42(8)：77-86.
DENG W L，WU J M，HUANG H M，et al. Effects of cold plasma on microbial decontamination and quality of sugarcane juice[J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2023，42(8)：77-86.(in Chinese)

[14] 马海乐，陈文庆. 基于电磁波和等离子体的固态食品新兴物理杀菌技术研究现状与展望[J]. 食品科学技术学报，2023，41(4)：1-15.
MA H L，CHEN W Q. Research status and prospect of emerging physical sterilization technology of solid food based on electromagnetic wave and plasma[J]. Journal of Food Science and Technology，2023，41(4)：1-15.(in Chinese)

[15] THANAKKASARANEE S，SADEGHI K，SEO J. Packaging materials and technologies for microwave applications：a review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition，2023，63(23)：6464-6483.

[16] 赵胜男，李佳怡，杨青华，等. 辐照对常见塑料食品包装材料物理化学性能的影响[J]. 包装工程，2022，43(9)：31-38.
ZHAO S N，LI J Y，YANG Q H，et al. Effect of

irradiation on physical and chemical properties of common plastic food packaging materials[J]. Packaging Engineering,2022,43(9):31-38.(in Chinese)

[17] BERNSTEIN R,THORNBERG S M,ASSINK R A,et al. Insights into oxidation mechanisms in gamma-irradiated polypropylene, utilizing selective isotopic labeling with analysis by GC/MS, NMR and FTIR [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2007, 265 (1):8-17.

[18] 步营,何玮,胡显杰,等. 超高压对蓝蛤酶解液风味及其蛋白质结构的影响[J]. 食品科学技术学报,2021,39(1):104-116.
BU Y, HE W, HU X J, et al. Effects of ultra-high pressure on flavor and protein structure of enzymatic hydrolysates of *Aloididae aloidi* [J]. Journal of Food Science and Technology, 2021, 39 (1): 104-116. (in Chinese)

[19] 刘书成,徐杰,徐雯晴,等. 低温等离子体对水产品常见微生物灭活效果影响的研究进展[J]. 食品与生物技术学报,2023,42(2):1-9.
LIU S C, XU J, XU W Q, et al. Research progress on inactivation of common microorganisms in aquatic products by cold plasma[J]. Journal of Food Science and Biotechnology,2023,42(2):1-9.(in Chinese)

[20] 杨仕青,陈娜,吴欣荣,等. 集装箱内食用动物产品外包装臭氧消毒方法的研究[J]. 广东畜牧兽医科技,2014,39(3):36-38,44.
YANG S Q, CHEN N, WU X R, et al. Ozone disinfection of the outer packaging of the edible animal products in the cargocontainer[J]. Guangdong Journal of Animal and Veterinary Science, 2014, 39(3): 36-38, 44. (in Chinese)

[21] 张静敏. 三种消毒方法对食品及包装表面病毒消杀效果研究[D]. 天津:天津科技大学,2021.

[22] 易志伟,谢丹. 二氯异氰尿酸钠用于食品生产场所消毒的危害分析[J]. 中国食品卫生杂志,2010,22(4):378-380.
YI Z W, XIE D. Hazard analysis on sodium dichloroisocyanurate used as a disinfectant in food production establishment[J]. Chinese Journal of Food Hygiene,2010,22(4):378-380.(in Chinese)

[23] 梁钰莹,唐楚林,汤曜名,等. UPLC-MS/MS测定餐具洗涤剂及餐具表面氯酸盐含量[J]. 食品工业,2023,44(9):297-301.
LIANG Y Y, TANG C L, TANG Y M, et al. Determination of chlorate content in tableware detergents and tableware surface by UPLC-MS/MS[J]. The Food Industry,2023,44(9):297-301.(in Chinese)

[24] PENG J, TANG J M, LUAN D L, et al. Microwave pasteurization of pre-packaged carrots [J]. Journal of Food Engineering,2017,202:56-64.

[25] GRATZ M, SEVENICH R, HOPPE T, et al. Gentle sterilization of carrot-based purees by high-pressure thermal sterilization and ohmic heating and influence on food processing contaminants and quality attributes[J]. Frontiers in Nutrition,2021,8:643837.

[26] FELIX J S, MANZOLI J E, PADULA M, et al. Plastic packaging with polyamide 6 used for meat foodstuffs and cheese: caprolactam migration and effect of irradiation: a review[J]. Alimentos e Nutricao,2008,19(3):361-370.

[27] HUI-JUAN Z, JIAN P. The synergistic effect of modified atmosphere packaging with CO and ultrahigh pressure on the sterilization and color protection of chilled pork [J]. Food Research and Development, 2021, 42 (12):84-89.

[28] 韦雪,郑鄢燕,赵晓燕,等. 脉冲强光联合气调包装对鲜切马铃薯杀菌及褐变的影响[J]. 新疆农业大学学报,2022,45(2):110-118.
WEI X, ZHENG Y Y, ZHAO X Y, et al. Effects of pulsed light combined with modified atmosphere packaging on sterilization and browning of fresh-cut potatoes[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2022,45(2):110-118.(in Chinese)

[29] 刘振蓉,赵武奇,高贵田,等. 低温等离子体处理对猕猴桃浊汁品质的影响[J]. 中国食品学报,2021,21(6):195-202.
LIU Z R, ZHAO W Q, GAO G T, et al. Effect of low temperature plasma treatment on the quality of cloudy kiwi juice [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21 (6): 195-202. (in Chinese)

[30] SONG Y H, DUNLEAVY M, LI L. How to make plastic surfaces simultaneously hydrophilic/oleophobic? [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2023, 15 (25): 31092-31099.

[31] BECHLIN T R, GRANELLA S J, CHRIST D, et al. Evaluation of grain and oil quality of packaged and ozonized flaxseed [J]. Journal of Stored Products Research,2019,83:311-316.

[32] 于千帆,王金鹏,曹锦轩,等. 冷链食品病毒控制及其次生危害研究进展[J]. 食品安全质量检测学报,2023,14(17):276-284.
YU Q F, WANG J P, CAO J X, et al. Research progress of virus control and secondary hazards in cold chain food [J]. Journal of Food Safety and Quality, 2023, 14(17):

276-284.(in Chinese)
[33] INTERNATIONAL D F. Prevention of the development of chlorate in the dairy chain[J]. Bulletin of the International Dairy Federation,2023,526:1-31.
[34] LI J R, LIU W D, SUN L H, et al. Effect of emulsification on surfactant partitioning in surfactant-polymer flooding[J]. Journal of Surfactants and Detergents,2019,22(6):1387-1394.
[35] DE ROJAS GANTE C, PASCAT B. Effects of B-ionizing radiation on the properties of flexible packaging materials[J]. Packaging Technology and Science,1990,3(2):97-115.
[36] 姜婉悦,张君,朱金艳,等. 烘焙纸中残留甲苯向食品模拟物中迁移分析[J]. 包装工程,2023,44(19):85-91.
JIANG W Y, ZHANG J, ZHU J Y, et al. Analysis of migration of residual toluene from baking paper to food simulants[J]. Packaging Engineering,2023,44(19):85-91.(in Chinese)
[37] 李英,孙小颖,吴景武,等. 高效液相色谱法测定食品接触材料中苯酚和4-叔丁基苯酚迁移量[J]. 分析试验室,2011,30(9):120-123.
LI Y,SUN X Y,WU J W,et al. Determination of phenol and *p*-*t*-butyl-phenol migrated from food contact materials by high performance liquid chromatography[J]. Chinese Journal of Analysis Laboratory,2011,30(9):120-123.(in Chinese)
[38] MISHRA R, KUMAR N, SACHAN N. Thiophene and its analogs as prospective antioxidant agents: a retrospective study[J]. Mini Reviews in Medicinal Chemistry, 2022, 22(10):1420-1437.
[39] 刘俊芳,张忠. 浅谈《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)和《生活饮用水标准检验方法》[GB/T 5750系列(2023)]实施对农村饮水安全水质检测工作的变化及建议[J]. 食品安全导刊,2023(8):144-146,150.
LIU J F, ZHANG Z. Discussion on the changes and suggestions of GB 5749—2022 and GB/T 5750 series (2023) in the implementation of rural drinking water safety and quality testing[J]. China Food Safety Magazine,2023(8):144-146,150.(in Chinese)
[40] 习娟. 婴幼儿乳粉中氯酸盐和高氯酸盐的来源和控制措施[J]. 中国食品工业,2023(18):60-62.
XI J. Sources and control measures of chlorate and perchlorate in infant milk powder[J]. China Food Industry,2023(18):60-62.(in Chinese)
[41] LEVANOV A V, ISAIKINA O Y, GASANOVA R B, et al. Kinetics of chlorate formation during ozonation of aqueous chloride solutions[J]. Chemosphere,2019,229:68-76.
[42] AMBAUEN N,MUFF J,TSCHEIKNER-GRATL F,et al. Application of electrochemical oxidation in cold climate regions: effect of temperature, pH and anode material on the degradation of bisphenol A and the formation of disinfection by-products[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering,2020,8(5):104183.
[43] HUANG C H, CHEN C Y, WANG G S. Temperature dependence of characteristics of organic precursors, bromide, and disinfection byproduct formation[J]. Science of The Total Environment,2019,662:746-754.
[44] 崔晓宇,辛会博,孙兴滨. 模拟泳池水中氯化消毒副产物的生成规律[J]. 中国环境科学,2019,39(4):1485-1492.
CUI X Y,XIN H B,SUN X B. Formation of disinfection by-products in chlorination of simulated swimming pool water[J]. China Environmental Science,2019,39(4):1485-1492.(in Chinese)
[45] 张谦. 离子色谱法测定饮用水中消毒副产物的研究[J]. 轻工标准与质量,2022(3):74-76.
ZHANG Q. Study on determination of disinfection by-products in drinking water by ion chromatography[J]. Standard & Quality of Light Industry,2022(3):74-76.(in Chinese)
[46] HUO B Y,HU Y L,GAO Z X,et al. Recent advances on functional nucleic acid-based biosensors for detection of food contaminants[J]. Talanta,2021,222:121565.
[47] 张也,马亮,李亚蕾,等. 基于泡沫镍载纳米材料的电化学传感器检测肉制品中亚硝酸盐[J]. 食品与生物技术学报,2023,42(9):90-98.
ZHANG Y,MA L,LI Y L,et al. Electrochemical sensor based on nickel-foamed nanocomposites for detecting nitrite in meat products[J]. Journal of Food Science and Biotechnology,2023,42(9):90-98.(in Chinese)
[48] HAYASHI T,OSHIMA H,MASHIMA T,et al. Binding of an RNA aptamer and a partial peptide of a prion protein: crucial importance of water entropy in molecular recognition[J]. Nucleic Acids Research,2014,42(11):6861-6875.
[49] 杨慧娟,谭芦兰,唐宏刚,等. 肉制品中亚硝胺控制的研究进展[J]. 食品科学技术学报,2019,37(5):72-76.
YANG H J, TAN L L, TANG H G, et al. Review on progress of control of nitrosamines in meat products[J]. Journal of Food Science and Technology,2019,37(5):72-76.(in Chinese)
[50] THAKUR M, WANG B, VERMA M L. Development and applications of nanobiosensors for sustainable agricultural and food industries: recent developments, challenges and perspectives[J]. Environmental

Technology & Innovation，2022，26：102371.

[51] XIE C Q，ZHOU W D. A review of recent advances for the detection of biological，chemical，and physical hazards in foodstuffs using spectral imaging techniques [J]. Foods，2023，12(11)：2266.

[52] WANG Q，HAMEED S，XIE L J，et al. Non-destructive quality control detection of endogenous contaminations in walnuts using terahertz spectroscopic imaging [J]. Journal of Food Measurement and Characterization，2020，14(5)：2453-2460.

[53] FANG C，LUO Y L，NAIDU R. Advancements in Raman imaging for nanoplastic analysis：challenges，algorithms and future perspectives [J]. Analytica Chimica Acta，2024，1290：342069.

[54] 刘翠玲，秦冬，孙晓荣，等. 基于高光谱图像与光谱特征融合技术的鸡蛋新鲜度无损判别模型的建立[J]. 食品科学技术学报，2022，40(6)：172-182.
LIU C L，QIN D，SUN X R，et al. Establishment of non-destructive discriminant model for eggs freshness grade based on fusion technology of image and spectral features of hyperspectral [J]. Journal of Food Science and Technology，2022，40(6)：172-182.(in Chinese)

[55] DHAKAL S，CHAO K L，QIN J W，et al. Identification and evaluation of composition in food powder using point-scan Raman spectral imaging [J]. Applied Sciences，2017，7(1)：1.

[56] WEI Y Y，YANG Y，CHEN B Y，et al. Green detection of trace cyanuric acid and free chlorine together *via* ion chromatography[J]. Chemosphere，2022，292：133378.

[57] LIJIA Z，XUE H，JING W，et al. Simultaneous determination of chlorate and perchlorate residues in infant milk powder by UPLC-MS/MS[J]. China Brewing，2021，40(6)：162-166.

[58] ZHANG H，HUO Z L，LIU H L，et al. A novel ion chromatography tandem mass spectrometry (IC-MS/MS) method for the determination of Chlorate and prechlorate in freshly brewed coffee [J]. Microchemical Journal，2021，165：106167.

[59] FENG C，HONG-XIN J，MING Z，et al. Determination of chlorate and perchlorate in rice by reversed-phase ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry[J]. Journal of Food Safety and Quality，2019，10(23)：7853-7857.

[60] ALAMRI M S，QASEM A A A，MOHAMED A A，et al. Food packaging's materials：a food safety perspective[J]. Saudi Journal of Biological Sciences，2021，28(8)：4490-4499.

[61] 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.

[62] 凌云，雍炜，边煜，等. 基于确定性迁移模型研究聚乙烯食品接触材料中紫外吸收剂的迁移规律[J]. 中国食品卫生杂志，2021，33(6)：733-738.
LING Y，YONG W，BIAN Y，et al. Study of the migration law of UV absorbants in polyethylene food contact materials based on deterministic migration model [J]. Chinese Journal of Food Hygiene，2021，33(6)：733-738.(in Chinese)

[63] 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 H T，LIU Y，GAO X，et al. Study on migration model of antioxidants in food contact polypropylene plastics [J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry，2015，43(3)：399-403.(in Chinese)

[64] REINAS I，OLIVEIRA J，PEREIRA J，et al. Migration of two antioxidants from packaging into a solid food and into Tenax®[J]. Food Control，2012，28(2)：333-337.

[65] 黄秀玲，王志伟，李明. 纸塑复合包装材料中化学物迁移的改进预测模型及其通用性[J]. 化工学报，2009，60(12)：3153-3158.
HUANG X L，WANG Z W，LI M. Modified migration model of chemical substances from paper through plastic coating layer and its universality [J]. Journal of the Chemical Industry and Engineering Society of China，2009，60(12)：3153-3158.(in Chinese)

[66] 陈文林. 食品级发泡聚苯乙烯中苯乙烯迁移研究[D]. 杭州：浙江理工大学，2015.

[67] 樊继彩，薛鸣，王姝婷，等. 温度和时间对塑化剂从食品包装材料向食品模拟物中迁移影响的研究[J]. 中国卫生检验杂志，2021，31(24)：2978-2981.
FAN J C，XUE M，WANG S T，et al. Migration of phthalate esters from food packaging materials into food simulants and the influence of temperature and time on migration [J]. Chinese Journal of Health Laboratory Technology，2021，31(24)：2978-2981.(in Chinese)

[68] ETXABIDE A，YOUNG B，BREMER P J，et al. Non-permanent primary food packaging materials assessment：identification，migration，toxicity，and consumption of substances[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety，2022，21(5)：4130-4145.

[69] WAGNER J，CASTLE L，OLDRING P K T，et al. Factors affecting migration kinetics from a generic epoxy-phenolic food can coating system [J]. Food Research International，2018，106：183-192.

[70] MUZEZA C，NGOLE-JEME V，MSAGATI T A M. The mechanisms of plastic food-packaging monomers'

migration into food matrix and the implications on human health[J]. Foods，2023，12(18)：3364.

[71] 李清亮，赵振宇，曾稳稳，等. 基于无机元素的白酒聚类分析[J]. 酿酒科技，2020(8)：46-50.
LI Q L，ZHAO Z Y，ZENG W W，et al. Cluster analysis of Baijiu based on inorganic elements[J]. Liquor-Making Science & Technology，2020(8)：46-50.(in Chinese)

[72] MENG W K，SUN H，SU G Y. Plastic packaging-associated chemicals and their hazards：an overview of reviews[J]. Chemosphere，2023，331：138795.

[73] ECHIGO S，ZHANG X R，MINEAR R A，et al. Differentiation of TOCl and TOBr in TOX measurement[J]. Abstracts of Papers of the American Chemical Society，1999，217：736.

[74] HUA G H，RECKHOW D A. Comparison of disinfection byproduct formation from chlorine and alternative disinfectants[J]. Water Research，2007，41(8)：1667-1678.

[75] HAN J R，ZHANG X R，LIU J Q，et al. Characterization of halogenated DBPs and identification of new DBPs trihalomethanols in chlorine dioxide treated drinking water with multiple extractions[J]. Journal of Environmental Sciences，2017，58：83-92.

[76] HAN J R，ZHANG X R，LI W X，et al. Low chlorine impurity might be beneficial in chlorine dioxide disinfection[J]. Water Research，2021，188：116520.

[77] LI T，SHANG C，XIANG Y Y，et al. ClO_2 pre-oxidation changes dissolved organic matter at the molecular level and reduces chloro-organic byproducts and toxicity of water treated by the UV/chlorine process[J]. Water Research，2022，216：118341.

[78] 宁慧男，张钦发，莫宜澄，等. 辐照技术对食品及包装材料迁移规律的影响[J]. 食品科技，2020，45(2)：74-78.
NING H N，ZHANG Q F，MO Y C，et al. Effect of irradiation technology on migration of food and packaging materials[J]. Food Science and Technology，2020，45(2)：74-78.(in Chinese)

[79] 迟海. 超高压处理对聚乳酸纳米食品包装材料的性能影响及迁移研究[D]. 昆明：昆明理工大学，2019.

[80] 高文婧，雷桥，吴浩，等. 低温低功率等离子体处理对复合蛋白基薄膜结构性能的影响[J]. 食品与发酵工业，2022，48(6)：103-109，116.
GAO W J，LEI Q，WU H，et al. Effects of low-temperature and low-power plasma treatment on the structure and properties of composite protein-based films[J]. Food and Fermentation Industries，2022，48(6)：103-109，116.(in Chinese)

[81] WAGH R V，PRIYADARSHI R，RHIM J W. Novel bacteriophage-based food packaging：an innovative food safety approach[J]. Coatings，2023，13(3)：609.

[82] ZHANG X R，YANG C G，YANG K. Novel antibacterial metals as food contact materials：a review[J]. Materials，2023，16(8)：3029.

（责任编辑：刘冬梅）