

DOI: 10.13718/j.cnki.xdsk.2026.07.005

任梦梦, 徐丹, 于宛婷, 等. 预制菜塑料包装中添加剂的迁移研究及安全评估 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2026, 48(7): 54-64.

预制菜塑料包装中添加剂的迁移研究及安全评估

任梦梦¹, 徐丹¹, 于宛婷¹, 李启彬¹,
詹宇杰², 任春美², 张弛³, 李莎^{2,4}

1. 西南大学 食品科学学院, 重庆 400715; 2. 重庆市食品药品检验检测研究院, 重庆 401120;
3. 重庆市计量质量检测研究院, 重庆 401123; 4. 国家市场监督管理总局重点实验室(调味品监管技术), 重庆 401120

摘要: 基于超高效液相色谱-质谱法对预制菜塑料包装中添加剂的迁移进行研究, 并对其安全性进行评估。根据预制菜的生产流程, 测定了包装在灭菌、贮藏、再加热过程中添加剂的迁移量; 探究了迁移物在不同食品接触介质、贮藏时间、接触温度、灭菌条件、包装材料、加热方式及次数等条件下的迁移规律; 采用毒理学关注阈值法(TTC)对预制菜塑料包装进行了安全评估。结果表明: 在 80 批次样品的迁移量测定中无超标样品; 添加剂的迁移量随着时间的延长和温度的升高而增大, 且包装材料的层数及类型对其迁移量具有显著影响。相比于常规加热, 微波加热条件下添加剂的迁移量更高, 且随加热次数的增加而减少。此外, 在迁移过程关键风险环节的识别中, 添加剂在灭菌过程的迁移量显著高于贮藏和再加热。通过安全性评估, 迁移物估计日摄入量(EDI)均低于 TTC 安全阈值。综合表明: 目前预制菜所采用的包装相对安全, 企业在选择包装材料时应着重考虑其阻隔性及灭菌环节对包装安全性的影响, 以保障产品的质量与安全。

关键词: 预制菜; 塑料包装; 添加剂; 迁移规律; 安全评估

中图分类号: TS206.4

文献标识码: A

文章编号: 1673-9868(2026)07-0054-11

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Migration study of additives in plastic packaging of prepared dishes and safety assessment

Ren Mengmeng¹, Xu Dan¹, Yu Wanting¹, Li Qibin¹,
Zhan Yujie², Ren Chunmei², Zhang Chi³, Li Sha^{2,4}

1. College of Food Science, Southwest University, Chongqing 400715, China;
2. Chongqing Institute for Food and Drug Control, Chongqing 401120, China;
3. Chongqing Academy of Metrology and Quality Inspection, Chongqing 401123, China;
4. Key Laboratory of Condiment Supervision Technology, State Administration for Market Regulation, Chongqing 401120, China

收稿日期: 2025-04-09

基金项目: 重庆市科研机构绩效激励引导专项(CSTB2023JXJL-YFX0086); 重庆市市场监督管理局科研计划项目(CQSJKJ2021027)。

作者简介: 任梦梦, 硕士研究生, 主要从事包装安全的研究。

Abstract: In this study, the migration of additives in plastic packaging of prepared dishes was investigated based on ultra performance liquid chromatography-mass spectrometry (UPLC-MS/MS), and their safety was assessed. Based on the production process of prepared dishes, we determined the migration of additives during sterilization, storage and reheating. At the same time, the migration rules of migrants were investigated under different food contact media, storage time, contact temperature, sterilization conditions, packaging materials, heating method and number of heating cycles. Finally, the safety assessment of plastic packaging of prepared dishes was carried out using the Threshold of Toxicological Concern (TTC) method. The results showed that in 80 batches of samples for migration determination, no samples exceeded the limits; the migration of the additives increased with time and temperature, and the number of layers and the type of packaging materials had significant impacts on their migration. Compared to conventional heating, the migration of additives under microwave heating conditions was higher and decreased with the increase in the number of heating cycles. In addition, in the identification of the key risk links in the migration process, the migration amounts of additives during the sterilization process were significantly higher than those during storage and reheating. The estimated daily intakes (EDI) of the migrants were all below the TTC threshold according to the safety assessment. Therefore, the packaging currently used for prefabricated dishes is relatively safe. When choosing packaging materials, enterprises should focus on considering their barrier properties and the impact of the sterilization process on the safety of the packaging to protect the quality and safety of the product.

Key words: prepared dishes; plastic packaging; additive; migration rules; safety assessment

近年来,随着生活方式的转变、冷链运输系统的不断发展以及相关政策的支持,预制菜产业实现了迅猛发展^[1]。这一产业的快速发展也带来了一系列的挑战,如包装安全、产品同质化、价格竞争等。这些问题不仅关系到消费者的健康和权益,同时也影响着整个行业的健康发展^[2]。

在国家明令禁止预制菜添加防腐剂的当下,包装作为预制菜加工生产过程中的重要环节,在保障其安全性、延长货架期方面发挥着重要作用^[3]。塑料因成本低廉、良好的阻隔性以及运输方便等优良性能,被广泛用作食品的包装材料。其优越的性能可满足大多数预制菜产品的包装要求,在运输和贮藏过程中,可有效防止产品出现微生物污染、变质等问题^[4]。因此,塑料包装目前已成为预制菜产品最常用的包装材料之一。

随着塑料包装材料的广泛使用,其衍生的食品安全问题日益成为学术界关注的焦点。塑料包装在与食品接触过程中,添加剂可能会迁移到食品中,从而产生安全隐患。目前,部分添加剂已被证实具有毒性,可能会对人体产生负面影响,如发育迟缓、精神疾病、肥胖、糖尿病和癌症等^[5-8]。因此,针对预制菜塑料包装材料中添加剂的迁移情况展开研究,具有极为重要的现实意义。

塑料包装中添加剂的迁移受众多因素的影响,如时间^[9-10]、温度^[11-12]、食品类型^[13-15]、接触面积^[16]、厚度^[17-18]及加热方式等^[19-20]。本研究结合预制菜的实际应用场景,分别测定了其在灭菌、贮藏及再加热过程中添加剂的迁移量,以识别迁移过程中的关键风险环节;同时,深入预制菜企业调研,掌握目前预制菜企业常用的包装材料情况,并对其迁移量进行了测定,以帮助企业选择合适的包装材料;最后,采用毒理学关注阈值法(Threshold of Toxicological Concern, TTC)对其进行了安全评估,旨在为预制菜塑料包装的质量监管提供数据支撑和技术支持。

1 材料与方法

1.1 仪器与试剂

超高效液相色谱-四极杆飞行时间质谱仪(API 4000⁺),美国 AB SCIEX 公司;超声仪(XJ-700KT),

方需科技有限公司; 涡旋振荡仪(VORTEX 3), IKA; 氮吹仪(MD200-2), 杭州奥盛仪器有限公司; 电子天平(PR223ZH/E), 常州奥豪斯仪器有限公司; 恒温干燥箱(FD115), 德国 BINDER。

32 种添加剂的标准储备液(质量浓度为 100 $\mu\text{g/mL}$), 天津阿尔塔科技有限公司; 乙腈、乙酸(色谱纯), ACS 恩科化学公司; 甲酸(质谱纯), 美国 Sigma 公司; 异辛烷(色谱纯), 美国 TEDIA 公司; 无水乙醇(色谱纯), 重庆川东化工集团有限公司; 橄榄油, 艾斯瑞普广州食品有限公司; 实验用水为 Milli-Q 超纯水。

1.2 仪器条件

1.2.1 色谱条件

本研究采用前期已建立的方法, 色谱柱: ACQUITY UPLC BEH C18 色谱柱(100 mm $\times$ 2.1 mm $\times$ 1.7 μm); 柱温: 35 $^{\circ}\text{C}$; 流动相 A: 0.1%甲酸水, B: 乙腈。梯度洗脱: 0~3 min, 10% B; 3~5 min, 10%~30% B; 5~10 min, 30%~50% B; 10~15 min, 50%~56% B; 15~32 min, 56%~95% B; 32~32.05 min, 95%~10% B; 32.05~35 min, 10% B。流速: 0.35 mL/min; 进样量: 10 μL 。

1.2.2 质谱条件

离子源: 电喷雾离子源(ESI); 扫描方式: 正离子扫描; 检测方式: 多反应监测(MRM); 气帘气(N_2): 25 psi; 雾化气(N_2): 55 psi; 加热辅助气(N_2): 55 psi; 离子源温度: 500 $^{\circ}\text{C}$; 去簇电压: 50 V; 碰撞能量: 22 eV。32 种添加剂的质谱参数见表 1。

表 1 32 种添加剂的质谱参数

序号	标准品	CAS 号	保留时间/ min	定性定量 离子对	锥孔电压/ V	碰撞能量/ V
1	抗氧化剂 2246	119-47-1	26.27	358.3/177.1 [*]	50	22
				358.3/229.2	80	13
2	抗氧化剂 425	88-24-4	28.50	386.2/191.1 [*]	60	23
				386.2/257.1	60	15
3	己二酸	124-04-9	16.10	147.3/119.2 [*]	90	21
				147.3/91	140	32
4	硬脂酸	57-11-4	29.52	284.1/57.3 [*]	110	60
				284.1/88.3	120	32
5	油酸酰胺	301-02-0	26.33	282.3/69.2 [*]	50	15
				282.3/83.1	50	15
6	1-(联苯基-4-基)-2-甲基-2-吗啉基丙烷-1-酮	94576-68-8	10.32	309.8/195.1 [*]	90	37
				309.8/88.3	90	34
7	2,4-二乙基硫杂蒽-9-酮	82799-44-8	23.65	269.2/213.2 [*]	70	36
				269.2/241.4	70	31
8	2-苯甲酰基苯甲酸甲酯	606-28-0	12.09	241.1/209 [*]	8	16
				241.1/152	8	46
9	光引发剂 369	119313-12-1	8.17	367.3/190.3 [*]	60	27
				367.3/294.3	60	27
10	4,4'-双(二乙基氨基)二苯甲酮	90-93-7	17.76	324.8/176.1 [*]	100	39
				324.8/281.3	80	37

续表 1						
序号	标准品	CAS 号	保留时间/ min	定性定量 离子对	锥孔电压/ V	碰撞能量/ V
11	4-二甲氨基苯甲酸乙酯	10287-53-3	12.59	194.2/151*	80	31
				194.2/134	80	42
12	光引发剂 379	119344-86-4	8.93	381.3/190*	50	22
				381.3/308	50	18
13	光引发剂 907	71868-10-5	7.70	280.1/165.2*	50	30
				280.1/88.2	50	32
14	光引发剂 EHA	21245-02-3	25.42	278.2/166.2*	85	29
				278.2/151.2	85	42
15	光引发剂 ITX	5495-84-1	20.97	255.1/213.1*	70	30
				255.1/184.2	70	55
16	光引发剂 TPO	75980-60-8	16.09	349.1/147.1*	50	20
				349.1/119	50	26
17	米氏酮	90-94-8	13.33	269.2/148.2*	70	30
				269.2/120.2	70	30
18	2,4-二羟基二苯甲酮	131-56-6	11.02	215.1/137*	80	25
				215.1/105	80	35
19	4,4'-二氟二苯甲酮	345-92-6	13.78	219.1/123.1*	75	24
				219.1/95.1	75	35
20	2,2'-羟基-4-甲氧基二苯甲酮	131-53-3	12.08	245.2/121.1*	50	20
				245.2/93.2	50	35
21	2-羟基-4- <i>n</i> -己氧基苯甲酮	3293-97-8	26.29	299/137*	50	35
				299/105.1	50	36
22	2-羟基-4-正辛氧基二苯甲酮	1843-05-6	29.80	327/137*	50	30
				327/104.9	50	30
23	荧光增白剂 WS	91-44-1	12.56	232.1/188.1*	53	36
				232.1/160.1	53	40
24	荧光增白剂 PF	1041-00-5	20.02	291.1/107.1*	150	44
				291.1/77.1	58	73
25	荧光增白剂 OB	7128-64-5	32.74	431.2/415.2*	130	57
				431.2/401.2	130	56
26	荧光增白剂 EBF	2866-43-5	20.40	319.1/226.1*	75	41
				319.1/200.1	75	50

续表 1

序号	标准品	CAS 号	保留时间/ min	定性定量 离子对	锥孔电压/ V	碰撞能量/ V
27	荧光增白剂 KCB	5089-22-5	27.42	363.1/270.1 [*]	170	47
				363.1/244.1	170	51
28	紫外吸收剂 UV-9	131-57-7	14.56	229.1/150.9 [*]	50	16
				229.1/77.1	50	44
29	紫外吸收剂 UV-71	2440-22-4	18.53	226/120 [*]	50	20
				226/107	50	20
30	紫外吸收剂 UV-234	70321-86-7	32.12	448.2/370.1 [*]	50	20
				448.2/91	50	68
31	紫外吸收剂 UV-326	3896-11-5	31.43	316/107.1 [*]	45	25
				316/260	45	20
32	紫外吸收剂 UV-329	3147-75-9	29.83	324.4/92 [*]	40	45
				324.4/212.1	40	25

注: * 表示定量离子对。

1.3 样品中添加剂迁移量的测定

按照欧盟食品接触塑料法规 (EU) No10/2011 及《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) 的要求, 对样品进行迁移试验, 选用 4% 乙酸、10% 乙醇、异辛烷 3 种食品模拟物。将样品剪为 3 cm×4 cm 的长方形, 剪碎后放入干净的玻璃管中, 加入 20 mL 食品模拟液。结合预制菜的实际应用条件, 使用以下迁移条件来模拟预制菜包装经历的灭菌、贮藏以及再加热过程: 1) 水基模拟物 (4% 乙酸和 10% 乙醇) 的迁移条件为 121 ℃ 0.5 h、40 ℃ 10 d、100 ℃ 0.5 h; 2) 油脂类模拟物 (异辛烷) 的迁移条件为 60 ℃ 1.5 h、20 ℃ 2 d、60 ℃ 0.5 h。准确移取 1 mL 浸泡后的食品模拟液在 40 ℃ 下氮吹至近干, 用甲醇定容至 1 mL, 过 0.22 μm 有机相微孔滤膜后使用超高效液相色谱-质谱法 (UPLC-MS/MS) 分析。

1.4 迁移规律研究

1.4.1 时间对添加剂迁移量的影响

选取迁移量测定中检出量高的阳性样品作为研究对象, 将样品在 40 ℃ 条件下, 分别置于 4% 乙酸、10% 乙醇、异辛烷 3 种食品模拟物中, 放置时间分别为 0.5、1、2、4、6、24、48、72 h, 之后按照 1.3 节的操作测定添加剂的迁移量。

1.4.2 温度对添加剂迁移量的影响

将预制菜塑料包装在 20、40、60、80、100 ℃ 下放置 2 h 后, 按照 1.3 节的操作测定添加剂在 4% 乙酸、10% 乙醇、异辛烷 3 种食品模拟物中的迁移量。

1.4.3 加热方式及加热次数对添加剂迁移量的影响

异辛烷在微波加热下易爆炸, 出于安全考虑, 选择橄榄油作为油脂类模拟物。将样品剪为 3 cm×4 cm 的长方形, 剪碎后放入干净的玻璃管中, 加入 20 mL 橄榄油模拟液。对于常规加热, 将玻璃管在 100 ℃ 的烘箱中放置 30 min; 对于微波加热, 在中高火下加热 3 min。待冷却至室温后, 取 10 mL 橄榄油于干净的玻璃管中, 加入 5 mL 正己烷溶液, 超声提取 30 min, 并静置 30 min。取 2 mL 上清液, 在 40 ℃ 下氮吹至近干, 用甲醇定容至 1 mL, 过 0.22 μm 有机相微孔滤膜后使用 UPLC-MS/MS 分析。此外, 在两种条件下加

热后,将模拟液倒出,再次加入 20 mL 橄榄油模拟液,按照以上操作步骤,测定添加剂在加热 1 次、2 次、3 次后的迁移量。

1.4.4 灭菌条件对添加剂迁移量的影响

根据调研结果,目前预制菜企业常用的灭菌方式为热杀菌:1)对于蔬菜类预制菜,灭菌条件为 100 ℃ 15 min;2)对于荤素结合类预制菜,灭菌条件为 105~115 ℃ 20 min;3)对于纯肉类预制菜,灭菌条件为 121 ℃ 30 min。将样品在相应的时间及温度条件下放置后,对比 3 种灭菌条件下预制菜塑料包装中添加剂的迁移量。

1.4.5 不同过程对添加剂迁移量的影响

预制菜产品在包装后通常会进行灭菌,随后进行冷藏或冷冻贮藏及冷链运输,最后消费者需进行再次加热。根据 GB 31604.1—2023 冷藏冷冻贮藏最严苛的条件为 40 ℃ 10 d,本研究将预制菜塑料包装在灭菌(100 ℃ 15 min、110 ℃ 20 min、121 ℃ 30 min)、贮藏(40 ℃ 10 d)及再加热(常规加热 100 ℃ 30 min,微波加热中高火 3 min)过程中添加剂的迁移量进行了对比。

1.4.6 包装材料对添加剂迁移量的影响

根据调研,目前预制菜企业常用的包装材料主要包括 PET/PE、PA/PE、PA/RCP、PA/PP、BOPP/RCP、BOPP/PET/PE 和 PET/PE/PA。本研究对以上包装材料按 1.3 节操作测定其在油脂类模拟物中的迁移量。

1.5 安全评估

首先将迁移量与《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》(GB 9685—2016)规定的特定迁移限值(Specific Migration Limit, SML)进行对比和初步风险表征。当无法获取有效 SML 时,通过毒理学阈值法和每日膳食摄入量对迁移物进行风险评估。

化学物的暴露量按照美国食品药品监督管理局(FDA)提出的估计日摄入量(Estimated Daily Intake, EDI,用 E_{DI} 表示)进行计算:

$$E_{DI} = M \times F_1 \times C_F \quad (1)$$

式中: M 为理论允许最大迁移量, mg/kg, 由迁移试验得到; F_1 为每人每日食物消费量, kg, 食物摄入量为每人每天 3 kg; C_F 为消费因子, 指与特定包装材料所接触的食品占食品总摄入量的百分数(蒸煮袋为 0.05)。

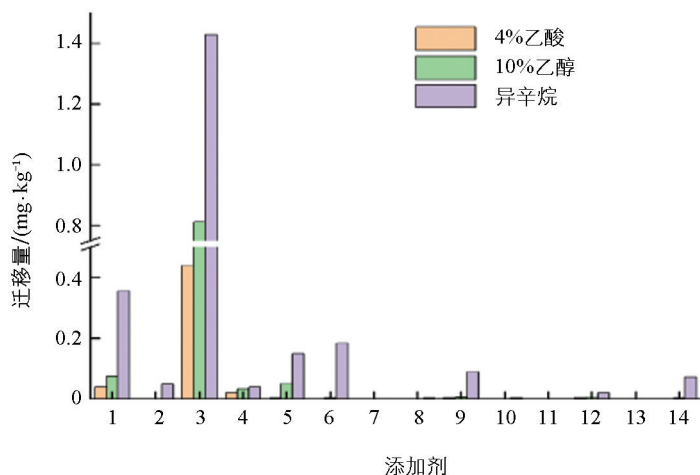
利用 Toxtree 平台中的 Cramer 决策树,根据物质结构将迁移物进行 TTC 毒性分级: Cramer I 类、II 类和 III 类,其 TTC 阈值分别为 1.8、0.54、0.09 mg/(人·d)^[21]。若每日摄入量低于相应的阈值,则表明该化合物对人体健康产生危害的可能性较低。

2 结果与分析

2.1 实际样品测定

本研究结合预制菜的实际应用条件,模拟了灭菌、贮藏及再加热过程。由图 1 可知,样品在油脂类模拟物异辛烷中的迁移量明显高于其余两种水基模拟物,这与类似研究的结果相一致^[22-23]。因此,本研究将

80 批次预制菜塑料包装样品在油脂类模拟物中的迁移量进行了测定,结果见表 2,其中抗氧化剂 2246、硬脂酸以及油酸酰胺的检出率在 98% 以上,所有物质的迁移量均较低,符合 GB 9685—2016 的要求。



添加剂 1~14 具体所指见表 2。

图 1 样品在 3 种食品模拟物中的迁移量

表 2 实际样品中添加剂迁移量的检出情况

序号	添加剂	检出率/%	迁移量/(mg·kg ⁻¹)
1	抗氧化剂 2246	100.00	0.105~0.377
2	己二酸	1.25	0~0.166
3	硬脂酸	100.00	0.400~3.156
4	油酸酰胺	98.75	0~0.175
5	1-(联苯基-4-基)-2-甲基-2-吗啉基丙烷-1-酮	2.50	0~0.130
6	2,4-二乙基硫杂蒽-9-酮	2.50	0~0.476
7	2-苯甲酰基苯甲酸甲酯	1.25	0~0.002
8	光引发剂 369	2.50	0~0.027
9	4,4'-双(二乙基氨基)二苯甲酮	2.50	0~0.237
10	荧光增白剂 OB	65.00	0~0.004
11	光引发剂 379	1.25	0~0.012
12	光引发剂 907	2.50	0~0.078
13	光引发剂 EHA	1.25	0~0.001
14	光引发剂 TPO	2.50	0~0.204

2.2 迁移规律研究

2.2.1 时间对添加剂迁移量的影响

由图 2 可知,在同一条件下,预制菜塑料包装中添加剂的迁移量随时间的延长而增加。迁移发生初期,迁移曲线斜率最大,此时的迁移速率最快;随着时间的延长,斜率逐渐变小,迁移速率逐渐下降,与相关研究的趋势基本相同^[24]。这主要由物质的扩散理论决定,随着时间推移,迁移物不断向食品模拟物中扩散,迁移量持续增加;同时,它们在包装中的含量不断下降,当达到一定程度后,迁移量逐渐趋于稳定。

2.2.2 温度对添加剂迁移量的影响

在迁移时间 2 h 条件下,考察了迁移温度(20、40、60、80、100 ℃)对添加剂迁移量的影响。由图 3 可知,在相同迁移时间下,各添加剂的迁移量均随温度的升高而增加。根据自由体积理论,迁移物一方面需要有足够的能量克服链带来的阻力,另一方面需要足够的空间进行循环和扩散。温度升高既为迁移物克服聚合物链阻力提供了足够的能量,又通过增强链流动性扩大了聚合物中的自由空间^[25]。因此,温度越高,迁移越快。此外,添加剂在异辛烷中的迁移量显著高于 4%乙酸和 10%乙醇,这是因为根据相似相溶原理,塑料中添加剂多为有机化合物,与油脂类模拟物结构相似,分子间作用力更强,因而更易于发生迁移,最终导致其在油脂类模拟物中的迁移量显著高于水基模拟物。

2.2.3 加热方式及加热次数对添加剂迁移量的影响

本研究比较了常规加热及微波加热条件下进行重复加热后添加剂的迁移量,结果见图 4。在两种加热条件下,微波加热的迁移量明显高于常规加热,这主要是由于微波加热是通过微波与食物中的水分子等极性分子相互作用,使分子产生剧烈振动而发热。这种内部加热方式使包装材料和食品在短时间内温度快速上升,添加剂在分子热运动的驱动下,能够快速地从包装材料内部向食品迁移;常规加热主要是通过热传导、对流等方式从食物外部逐渐向内部传递热量。加热过程相对缓慢,包装材料温度上升也较为缓慢,因此整体迁移量相对微波加热更低。此外,将添加剂在不同加热次数下的迁移量进行了显著性分析,第 1 次加热时的迁移量均显著高于第 2 次和第 3 次($p<0.05$)。这可能是由于材料在初次加热过程中,内部结构发生了一定程度的改变,一些易于迁移的物质迅速释放,随着加热次数的增多,材料中迁移物的含量逐渐降低,因此迁移量随之减少。

2.2.4 灭菌条件对添加剂迁移量的影响

目前,预制菜企业常用的杀菌方式为热杀菌,本研究对比了 3 种灭菌条件,结果见图 5。在 3 种模拟物中,121 ℃ 30 min 条件下的迁移量均显著高于其余两种($p < 0.05$)。这主要是由于随着时间的延长和温度的升高,包装材料中添加剂分子的热运动愈发剧烈,包装材料的结构在高温长时间作用下也可能发生变化,如孔隙增大、分子间作用力减弱等,使得添加剂更容易从包装材料迁移到食品中。而较低温度和较短时间的处理条件下,添加剂分子热运动相对缓和,包装材料结构也较为稳定,从而迁移量相对较小。

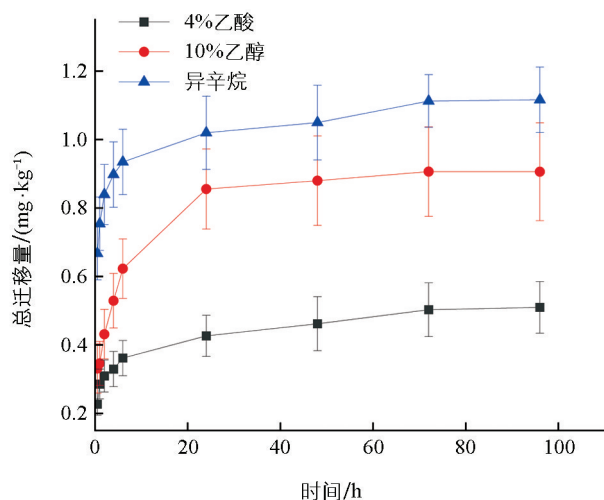


图 2 添加剂在不同时间下的总迁移量

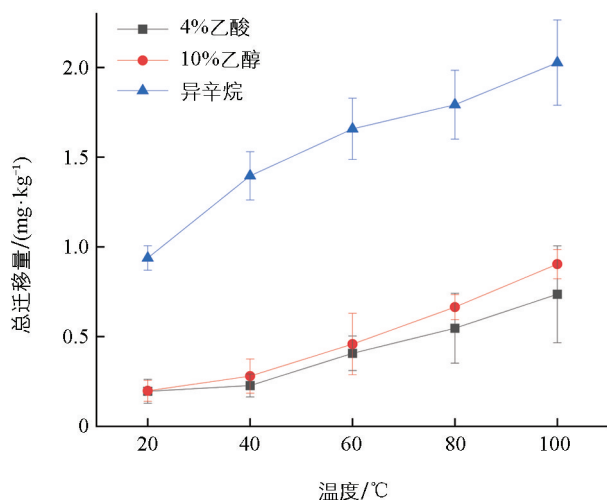
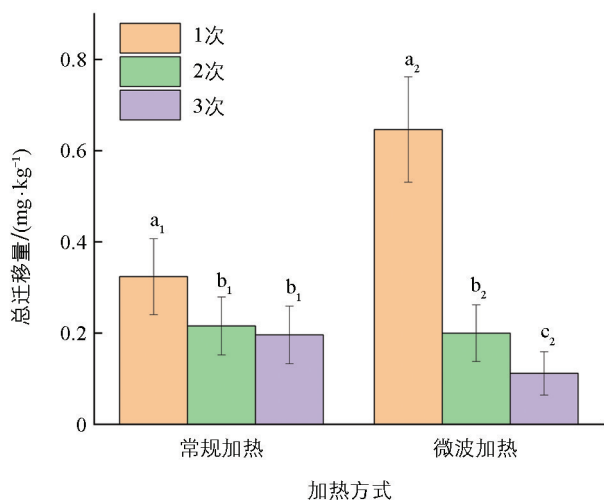


图 3 添加剂在不同温度下的总迁移量



小写字母不同表示 $p < 0.05$, 差异有统计学意义, 下同。

图 4 添加剂在不同加热方式及加热次数下的总迁移量

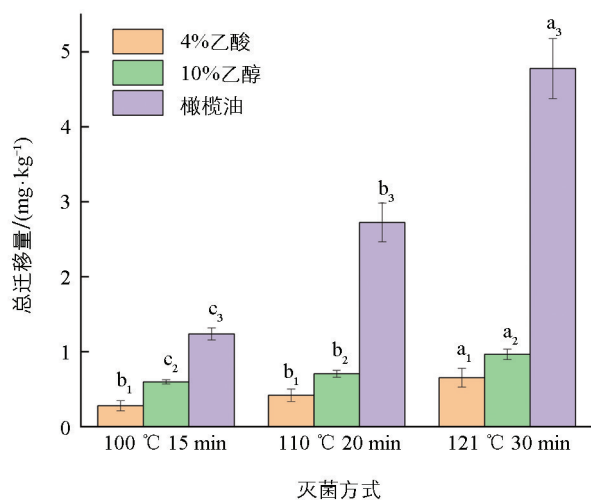


图 5 添加剂在不同灭菌条件下的总迁移量

2.2.5 包装材料对添加剂迁移量的影响

目前预制菜企业包装材料主要包括 PET/PE、PA/PE、PA/RCP、PA/CPP、BOPP/RCP、BOPP/PET/PE 和 PET/PE/PA, 以在油脂类模拟物中经过灭菌、贮藏以及再加热后的总迁移量见图 6。BOPP/PET/PE 和 PET/PE/PA 的总迁移量显著低于其余包装材料($p < 0.05$), 这可能是由于二者为 3 层复合, 其余为双层复合, 且 BOPP、PET、PA 材料具有高结晶度和致密分子排列, 阻隔性能好, 添加剂不易渗透进入食品模拟液中, 因此迁移量较少, 而 PA/RCP、BOPP/RCP 等因含低结晶材料如 RCP, 其分子间隙较大, 阻隔性弱, 导致其迁移量较高。

2.2.6 不同过程对添加剂迁移量的影响

初始生产完成后, 制备好的菜肴需经过包装、灭菌等后续加工工序制成预制菜成品, 随后进行冷藏或

冷冻贮藏及运输, 此外, 消费者食用前还需对其进行再次加热。本研究比较了不同过程对添加剂迁移量的影响, 由图 7 可知, 包装材料在灭菌过程中的迁移量显著高于贮藏和再加热过程($p<0.05$), 主要是由于在灭菌阶段, 高温环境加速了塑料包装中化学物质的分子运动, 从而添加剂分子更容易从包装材料迁移到食品中。相比之下, 贮藏过程一般处于低温环境, 分子活性受到抑制, 迁移量随之降低。消费者再加热时, 温度虽有所升高, 但持续时间较短, 远不及灭菌过程中长时间的高温作用。因此, 对于预制菜企业而言, 在选择包装材料时, 必须着重考虑灭菌环节对包装安全性的影响, 以确保产品在整个生命周期内的质量与安全。

目前尚未有针对预制菜研发的专用塑料包装材料, 市面上的预制菜基本都是采用普通食品所用的包装。在以往研究中, 针对普通塑料包装材料的迁移量测定通常仅模拟贮藏阶段, 本研究根据预制菜的实际情况, 模拟灭菌、贮藏和再加热阶段, 结果显示: 灭菌阶段添加剂的迁移量显著高于贮藏阶段。由此可见, 相较于常规食品包装, 预制菜因加工环节存在高温高压等特殊条件, 其塑料包装材料的安全性风险更为突出。

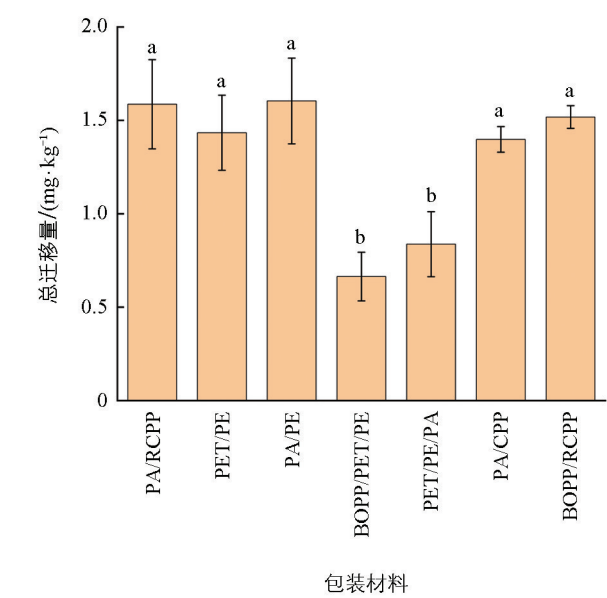


图 6 添加剂在不同包装材料中的总迁移量

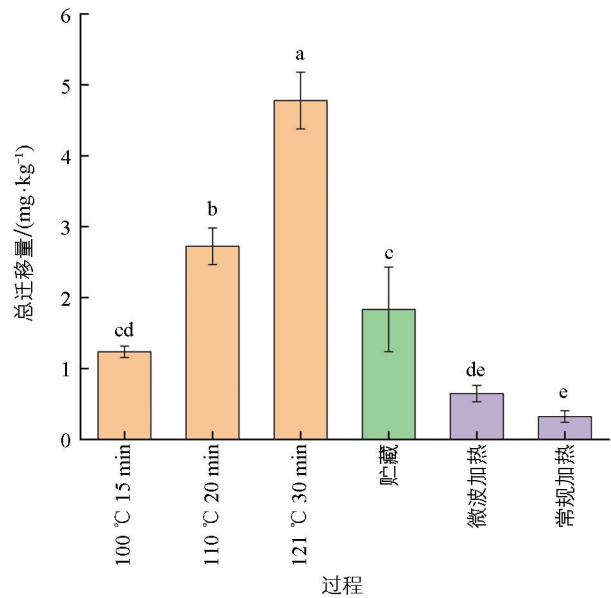


图 7 添加剂在不同过程中的总迁移量

2.3 安全性评估

风险物的安全评估需要结合暴露量、有关限量及 Cramer 分类下的 TTC 理论安全阈值。参考 GB 9685—2016, 抗氧化剂 2246 最大迁移量应低于 1.5 mg/kg, 荧光增白剂 OB 应低于 0.6 mg/kg, 己二酸、硬脂酸和油酸酰胺按生产需要适量使用, 其余添加剂没有相应的限值, 因此采用毒理性关注阈值法进行风险评估。14 种风险物的最大迁移量、限量、EDI 值及 TTC 安全阈值见表 3。结果显示: 添加剂的最大迁移量均低于对应的限量, 且 EDI 值低于 TTC 安全阈值, 因此, 初步评估这 14 种化合物的安全风险较低, 但若食用过量预制菜产品, 则可能超过安全阈值, 从而产生安全风险。

表 3 14 种迁移物的最大迁移量与法规限量及 TTC 安全阈值的比较

添加剂	最大迁移量/ (mg · kg ⁻¹)	限量/ (mg · kg ⁻¹)	Cramer 分类	EDI 值/ (mg · 人 ⁻¹ · d ⁻¹)	TTC 安全阈值/ (mg · 人 ⁻¹ · d ⁻¹)
抗氧化剂 2246	0.377	1.5	Ⅲ	0.057	0.09
己二酸	0.166	按生产需要适量使用	I	0.025	1.80
硬脂酸	3.156	按生产需要适量使用	I	0.473	1.80
油酸酰胺	0.175	按生产需要适量使用	Ⅲ	0.026	0.09
1-(联苯基-4-基)-2-甲基-2-吗啉 基丙烷-1-酮	0.130	—	Ⅲ	0.020	0.09

续表 3

添加剂	最大迁移量/ (mg · kg ⁻¹)	限量/ (mg · kg ⁻¹)	Cramer 分类	EDI 值/ (mg · 人 ⁻¹ · d ⁻¹)	TTC 安全阈值/ (mg · 人 ⁻¹ · d ⁻¹)
2,4-二乙基硫杂蒽-9-酮	0.476	—	Ⅲ	0.071	0.09
2-苯甲酰基苯甲酸甲酯	0.002	—	Ⅲ	0.001	0.09
光引发剂 369	0.027	—	Ⅲ	0.004	0.09
4,4'-双(二乙氨基)二苯甲酮	0.237	—	Ⅲ	0.036	0.09
荧光增白剂 OB	0.004	0.6	Ⅲ	0.001	0.09
光引发剂 379	0.012	—	Ⅲ	0.002	0.09
光引发剂 907	0.078	—	Ⅲ	0.012	0.09
光引发剂 EHA	0.001	—	Ⅲ	0.001	0.09
光引发剂 TPO	0.204	—	Ⅲ	0.031	0.09

3 结论

本研究通过超高效液相色谱-质谱法(UPLC-MS/MS)检测结合毒理学关注阈值法(TTC)评估,系统揭示了预制菜塑料包装中添加剂的迁移规律及安全风险。研究结果表明:

1) 80 批次样品的添加剂迁移量测定中,其结果均符合 GB 9685—2016 规定的安全限值,且所有迁移物的 EDI 值均未超出 TTC 安全阈值,这表明目前预制菜企业所采用的包装在安全性方面具有较好的保障。

2) 在迁移过程关键风险环节的识别中,灭菌阶段添加剂的迁移量是贮藏和再加热阶段的 3~5 倍。由此可知,预制菜因加工环节存在高温高压等特殊条件,其塑料包装材料的安全风险更为突出,因此,亟需建立适配预制菜特性的包装安全标准与检测体系。

3) 3 层复合包装材料凭借其高结晶度与致密分子排列,在阻隔性能上相较于双层复合包装材料展现出显著优势,能够有效抑制添加剂的迁移,这表明包装的层数及材料类型会对添加剂迁移产生重要影响。

基于上述研究成果,建议预制菜企业在选择包装材料时,应着重考虑灭菌环节对包装安全性的潜在影响,优先选用非热灭菌技术,如辐照灭菌、高压脉冲电场灭菌等;同时应根据产品特性选用高阻隔性材料,以保障产品的质量与安全。

本研究不仅为消费者食用预制菜提供安全信心、降低公众对其包装安全性的担忧,同时也为预制菜生产企业选择包装材料、相关部门制定和完善包装材料安全标准及加强监管提供支持,助力健全预制菜行业的监管体系。鉴于本研究存在检测范围有限且缺乏长期累积暴露风险评估的局限性,未来可借助非靶向筛查技术建立更全面的检测体系,结合毒理学等多学科方法,系统评估消费者长期摄入的潜在健康风险,为预制菜产业的高质量发展提供科学支撑。

参考文献:

[1] 赵超凡,陈树俊,李文兵,等. 预制菜产业发展问题分析 [J]. 现代食品科技, 2023, 39(2): 104-109.

[2] 张晓华,张长峰,刘柳,等. 我国预制菜产业发展现状与前景 [J]. 保鲜与加工, 2024, 24(12): 132-137.

[3] 刘爱民,全潇洋,张怡,等. 浅议预制菜产业技术风险分析与对策 [J]. 农产品加工, 2024(22): 19-24.

[4] 税小林,孙钦秀,夏秋瑜,等. 预制菜包装技术的发展概况及趋势 [J]. 包装工程, 2023, 44(13): 132-140.

[5] 卞诚霞,孟维坤,苏冠勇,等. 食品包装塑料添加剂的暴露评估研究进展 [J]. 江苏预防医学, 2024, 35(3): 277-282.

[6] Vincoff S, Schleupner B, Santos J, et al. The known and unknown: investigating the carcinogenic potential of plastic additives [J]. Environmental Science & Technology, 2024, 58(24): 10445-10457.

[7] Sendra M, Pereiro P, Figueras A, et al. An integrative toxicogenomic analysis of plastic additives [J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 409: 124975.

[8] Muncke J, Andersson A M, Backhaus T, et al. A vision for safer food contact materials; Public health concerns as drivers for improved testing [J]. *Environment International*, 2023, 180: 108161.

[9] 肖昭竞, 阮燕, 童兰艳, 等. 塑料食品接触材料中 12 种多溴联苯醚迁移量的测定及其迁移规律研究 [J]. *分析试验室*, 2025, 44(12): 1830-1839.

[10] 吴敏莲, 黄伟乾, 吴国利, 等. 超高效液相色谱法测定食品接触材料中 5 种丙烯酸类化合物的迁移量及其迁移规律探讨 [J]. *理化检验-化学分册*, 2024, 60(9): 915-921.

[11] 傅群, 黄强, 王尚军, 等. 塑料包装含油食品中邻苯二甲酸酯的迁移风险 [J]. *食品工业*, 2022, 43(9): 300-304.

[12] 吴敏莲, 黄伟乾, 吴国利, 等. 超高效液相色谱法测定食品接触材料中 5 种丙烯酸类化合物的迁移量及其迁移规律探讨 [J]. *理化检验-化学分册*, 2024, 60(9): 915-921.

[13] 蒋小良, 曾铭, 郭敏, 等. 食品塑料包装材料中光稳定剂 HS-770 迁移量测定及迁移规律研究 [J]. *中国口岸科学技术*, 2021, 3(6): 60-64.

[14] He Y J, Qin Y, Zhang T L, et al. Migration of (non-) intentionally added substances and microplastics from micro-wavable plastic food containers [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 417: 126074.

[15] 蔡翔宇, 陈璐, 吴玉杰, 等. 高效液相色谱-串联质谱法同时测定聚对苯二甲酸乙二醇酯/聚乙烯复合食品接触材料中 16 种抗氧化剂特定迁移量 [J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(15): 5974-5982.

[16] 陈旭明, 李锐. 食品用塑料包装中双酚 F 和双酚 S 迁移规律的分析 [J]. *塑料包装*, 2021, 31(3): 49-52.

[17] 靳茂礼, 黄雪静, 剧京亚, 等. PVC 塑料食品包装中的 2 种荧光增白剂迁移规律研究 [J]. *食品工程*, 2019(2): 33-37.

[18] Ji S L, Zhang J Z, Peng Y, et al. Migration kinetics of fluorescent whitening agents from polyethylene food packaging to food simulants [J]. *European Food Research and Technology*, 2020, 246(8): 1551-1561.

[19] Pack E C, Lee K Y, Jung J S, et al. Determination of the migration of plastic additives and non-intentionally added substances into food simulants and the assessment of health risks from convenience food packaging [J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2021, 30: 100736.

[20] Kim H S, Lee K Y, Jung J S, et al. Comparison of migration and cumulative risk assessment of antioxidants, antioxidant degradation products, and other non-intentionally added substances from plastic food contact materials [J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2023, 35: 101037.

[21] 卢诗强, 常一凡, 林勤保, 等. 食品接触用水性涂布纸中半挥发性迁移物的筛查及安全评估 [J]. *包装工程*, 2024, 45(11): 145-152.

[22] 罗尔伦, 李芸, 王维茜, 等. 气相色谱-质谱联用法测定塑料食品接触材料中 3 种非邻苯塑化剂含量及其迁移量 [J]. *食品科技*, 2023, 48(11): 281-286.

[23] 黄雪琳, 刘敏慧, 杨丽, 等. 食品塑料包装材料中光稳定剂在食品模拟物中迁移规律的研究 [J]. *包装与食品机械*, 2021, 39(2): 33-36.

[24] 李巧玲, 孙哲浩, 赵晓丹, 等. 快餐和巧克力包装纸中矿物油迁移行为的研究 [J]. *中国食品添加剂*, 2022, 33(10): 92-98.

[25] Samsudin H, Auras R, Mishra D, et al. Migration of antioxidants from polylactic acid films; a parameter estimation approach and an overview of the current mass transfer models [J]. *Food Research International*, 2018, 103: 515-528.

责任编辑 周仁惠