

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2026.80300

# 顶空—气相色谱法测定食品接触材料中 4-甲基-1-戊烯和 1-癸烯迁移量

柳阿芳<sup>1</sup> 陈然兵<sup>2</sup> 李 政<sup>1</sup> 康 峰<sup>1</sup> 赵金尧<sup>1</sup>

(1. 湖南省产商品质量检验研究院, 湖南 长沙 410007; 2. 湖南省产商品评审中心, 湖南 长沙 410118)

**摘要:** [目的] 探究食品接触材料中 4-甲基-1-戊烯和 1-癸烯单体在 4% 乙酸、10% 乙醇、20% 乙醇及 50% 乙醇 4 种食品模拟液中迁移量的测定方法。[方法] 对比不同极性与规格色谱柱分离效果以优选色谱柱; 以峰面积为指标优化顶空平衡温度与时间; 以 4 种食品模拟物阴性样品浸泡液为基质, 进行低、中、高三水平加标试验, 测定并计算目标物迁移量的回收率与相对标准偏差, 进行方法学验证。[结果] 最佳试验条件为: HP-5 毛细管色谱柱 (30 m × 0.25 mm, 1 μm), 空平衡温度 80 °C、空平衡时间 40 min, 氢火焰离子化检测器检测, 外标法定量。两种目标物在 0.01~0.1 mg/L 质量浓度区间内线性良好 (相关系数均在 0.995 以上); 方法检出限 ( $S/N=3$ ) 为 0.000 1~0.002 mg/kg, 定量限 ( $S/N=10$ ) 为 0.000 3~0.006 mg/kg; 加标回收率为 81.0%~109%, 相对标准偏差 ( $n=6$ ) 为 1.3%~9.8%。[结论] 该方法具有便捷、灵敏的优势, 且准确度与精密度良好, 可满足食品接触用塑料材料中 4-甲基-1-戊烯和 1-癸烯单体迁移量的检测需求。

**关键词:** 顶空—气相色谱法; 食品接触材料; 4-甲基-1-戊烯; 1-癸烯; 迁移量

## Determination of migration level of 4-methyl-1-pentene and 1-decene from food contact materials using headspace-gas chromatography

Liu Afang<sup>1</sup> Chen Ranbing<sup>2</sup> Li Zheng<sup>1</sup> Kang Feng<sup>1</sup> Zhao Jinyao<sup>1</sup>

(1. Hunan Provincial Institute of Product and Goods Quality Inspection, Changsha, Hunan 410007, China;

2. Hunan Provincial Product Evaluation Center, Changsha, Hunan 410118, China)

**Abstract:** [Objective] This study aims to establish an analytical method for detecting the migration levels of 4-methyl-1-pentene and 1-decene monomers from food contact materials into four food simulants, including 4% acetic acid, 10% ethanol, 20% ethanol, and 50% ethanol. [Methods] Chromatographic columns of different polarities and specifications are compared to select the optimal column. The headspace equilibrium temperature and equilibrium time are optimized using peak area as the evaluation index. Methodological validation is performed by conducting recovery experiments at low, medium, and high spiking levels using the soaking solutions of the negative sample of the four food simulants as the matrix, and the recoveries and relative standard deviations of the migration levels of target analytes are determined and calculated. [Results] The optimal experimental conditions are as follows: HP-5 capillary chromatographic column (30 m × 0.25 mm, 1 μm), headspace equilibrium temperature of 80 °C, equilibrium time of 40 min, detection by flame ionization detector (FID), quantification by the external standard method. Both target compounds exhibit good linearity in the concentration range of 0.01~0.1 mg/L, with correlation coefficients all greater than 0.995. The limits of detection (LOD,  $S/N=3$ ) range from 0.000 1 to 0.002 mg/kg, and the limits of quantification (LOQ,  $S/N=10$ ) range from 0.000 3 to 0.006 mg/kg. The spiked average recoveries range from 81.0% to 109%, with relative standard deviations (RSD,  $n=6$ ) of 1.3%~9.8%. [Conclusion] This method is convenient and sensitive, with satisfactory accuracy and precision. It is suitable for the determination of 4-methyl-1-pentene and 1-decene monomer migration levels in plastic materials for food contact.

**基金项目:** 湖南省市场监督管理局科技计划项目 (编号: 2024KJJH18); 湖南省自然科学基金项目 (编号: 2024JJ8261)

**通信作者:** 陈然兵 (1974—), 男, 本科。E-mail: 316027885@qq.com

**收稿日期:** 2026-04-10 **改回日期:** 2026-07-11

**引用格式:** 柳阿芳, 陈然兵, 李政, 等. 顶空—气相色谱法测定食品接触材料中 4-甲基-1-戊烯和 1-癸烯迁移量[J]. 食品与机械, 2026, 42(7): 83-89.

**Citation:** Liu Afang, Chen Ranbing, Li Zheng, et al. Determination of migration level of 4-methyl-1-pentene and 1-decene from food contact materials using headspace-gas chromatography[J]. Food & Machinery, 2026, 42(7): 83-89.

**Keywords:** headspace-gas chromatography; food contact material; 4-methyl-1-pentene; 1-decene; migration level

1-癸烯作为重要的 $\alpha$ -烯烃共聚单体,在与乙烯等烯烃进行共聚反应时,能够显著提升材料的加工适用性与使用性能,在食品包装、医疗器械及日用塑料制品等领域应用广泛<sup>[1]</sup>。4-甲基-1-戊烯同样是重要的有机化工原料与聚合单体,既可作为聚乙烯树脂的共聚单体以改善材料性能,也可与1-癸烯等单体共聚制备高性能塑料——聚4-甲基-1-戊烯(PMP)<sup>[2-3]</sup>。

以4-甲基-1-戊烯、1-癸烯为单体合成的PMP等聚合物,因化学稳定性好、耐高温、透明度高,在食品接触材料领域应用尤为普遍。然而,聚合物中未完全聚合的残留单体,在与食品接触过程中可通过迁移行为进入食品中,进而对消费者健康构成潜在安全风险。GB 4806.7—2023《食品安全国家标准 食品接触用塑料材料及制品》规定了聚4-甲基-1-戊烯(PMP,编号43、44)制品中4-甲基-1-戊烯、1-癸烯单体迁移量不得超过0.05 mg/kg。但在现行国家标准体系中,配套的检测方法尚不完善,给标准的落地实施带来了技术障碍。

目前食品接触材料中挥发性目标物迁移量的测定方法主要有气相色谱法<sup>[4-5]</sup>、顶空—气相色谱法<sup>[6-8]</sup>、气相色谱质谱法<sup>[9-12]</sup>、液相色谱法<sup>[13-14]</sup>、液相质谱法<sup>[15]</sup>等。其中,顶空—气相色谱法因具有前处理简单、无需复杂溶剂萃取、对挥发性目标物选择性好等优势,被广泛应用于食品模拟液中挥发性有机单体迁移量的检测。然而,梳理现有研究成果发现,同时针对食品接触材料中4-甲基-1-戊烯与1-癸烯迁移量的系统性检测方法研究较为匮乏,现有研究报道均未能满足酸性、水性、含乙醇或含油脂类食品模拟体系下的同步定量需求。

在已报道的相关研究中,白泽清<sup>[16]</sup>构建了气相色谱—质谱检测方法,用于测定食品接触塑料制品中1-癸烯的迁移量,但其仅适用于正己烷这类油性食品模拟物,难以满足水性、酸性及酒精类模拟体系的检测要求。国家标准方面,GB/T 23296.6—2009《食品接触材料 高分子材料 食品模拟物中4-甲基-1-戊烯的测定 气相色谱法》虽规定了4-甲基-1-戊烯的测定方法,但该标准规定适用范围局限于水、3%(质量浓度)乙酸溶液、10%(体积分数)乙醇溶液等传统水性食品模拟物及橄榄油,未明确酸性模拟物(4%乙酸)及含乙醇类食品模拟物(20%乙醇、50%乙醇等)中4-甲基-1-戊烯迁移量的测定方法,不能满足现有食品接触材料国家标准对于4-甲基-1-戊烯迁移量的测定要求。现有检测方法与研究适用范围存在明显局限性,无法契合现行食品安全国家标准的管控要求,难以实现食品接触材料中4-甲基-1-戊烯与1-癸烯迁移量的准确、高效、全面测定。

研究拟建立顶空—气相色谱法测定4-甲基-1-戊烯和

1-癸烯单体在4%乙酸、10%乙醇、20%乙醇和50%乙醇4种食品模拟液中的迁移量,旨在为食品接触塑料制品安全监管与质量把控提供科学有效的技术依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

乙酸、无水乙醇:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;  
N,N-二甲基乙酰胺(DMAC):色谱纯,天津市光复科技发展有限公司;

4-甲基-1-戊烯标准品:纯度98.4%,批号为2106435,上海安谱瑞世标准技术服务有限公司;

1-癸烯标准品:纯度98.6%,批号为2203437,上海安谱瑞世标准技术服务有限公司;

保鲜膜:材质为PMP,市售;

试验用水为一级纯水。

### 1.2 主要仪器设备

气相色谱仪:7890B型,安捷伦科技(中国)有限公司;  
顶空自动进样器:7697A型,安捷伦科技(中国)有限公司。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 仪器工作条件

(1) 顶空进样器条件:设置样品平衡温度为80℃,定量环温度为90℃,传输线温度为100℃;设置顶空平衡时间为40 min,顶空加压时长1 min,进样时长0.5 min。

(2) 气相色谱条件:HP-5毛细管色谱柱(长度30 m,内径0.25 mm,膜厚1  $\mu$ m);以高纯氮气为载气,恒定载气流速1.0 mL/min;分流比设置为5:1;设置进样口温度为200℃;检测器温度为230℃;柱升温程序:初始温度60℃保持8 min,以20℃/min的速率升温至220℃后,保持5 min。

#### 1.3.2 溶液配制

(1) 混合标准储备溶液A(1 000 mg/L)的配制:准确称取4-甲基-1-戊烯、1-癸烯标准物质各25 mg,用DMAC溶解后转移至25 mL容量瓶中,定容至刻度后摇匀,得到4-甲基-1-戊烯、1-癸烯质量浓度均为1 000 mg/L的混合标准储备溶液。

(2) 混合标准中间液B(10 mg/L)的配制:准确吸取100  $\mu$ L混合标准储备溶液A,加入至10 mL容量瓶中,用DMAC定容并充分摇匀,得到质量浓度为10 mg/L的混合标准中间液B。

(3) 标准工作曲线绘制:分别移取10 mL各食品模拟物(10%乙醇、4%乙酸、20%乙醇、50%乙醇)于5个顶空瓶中,再分别加入10, 20, 50, 80, 100  $\mu$ L混合标准中间液B,迅速加盖密封并充分混匀,得到目标物质量浓度依次

为0.01, 0.02, 0.05, 0.08, 0.10 mg/L的标准工作溶液。以标准工作溶液中4-甲基-1-戊烯、1-癸烯的质量浓度为横坐标, 各组分色谱峰响应面积为纵坐标绘制标准曲线, 采用外标法进行定量分析。

**1.3.3 样品前处理** 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实验通则》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》的要求, 分别选择4%乙酸、10%乙醇、20%乙醇和50%乙醇食品模拟物按全浸泡方式对样品进行迁移试验, 得到样品浸泡液。待样品浸泡液冷却或恢复至室温后, 取10.0 mL于20 mL顶空瓶中, 立即压盖密封, 得到样品测试液。未与样品接触过的食品模拟物按样品迁移试验条件进行处理, 得到空白浸泡液。待空白浸泡液冷却或恢复至室温后, 取空白浸泡液10.0 mL于20 mL顶空瓶中, 立即压盖密封, 得到空白测试液。

**1.3.4 色谱柱的选择** 通过试验对比不同极性 or 不同规格的色谱柱对食品模拟物中两种目标物的分离效果, 包括DB-5(30 m×0.25 mm, 0.25 μm)、HP-5(30 m×0.25 mm, 1 μm)、DB-1701(30 m×0.25 mm, 0.25 μm)、DB-Wax(30 m×0.25 mm, 0.25 μm), 筛选出适配的色谱柱。

### 1.3.5 顶空条件优化

(1) 顶空平衡温度: 顶空平衡温度分别设定为50, 60, 70, 80, 90 °C, 考察不同平衡温度下两种目标物色谱峰面积变化, 确定最佳顶空平衡温度。

(2) 顶空平衡时间: 顶空平衡时间分别设定为10, 20, 30, 40, 50, 60 min, 考察不同平衡时间下两种目标物色谱峰面积变化, 确定最佳顶空平衡时间。

**1.3.6 方法学验证** 选择PMP材质保鲜膜作为试验样品基质进行方法学验证。分别取10%乙醇、20%乙醇、50%乙醇、4%乙酸4种食品模拟物阴性样品浸泡液, 向其中分别添加低、中、高3个梯度浓度的混合标准溶液, 每个浓度梯度均设置6组平行试验样品, 并同时开展空白对照试验, 通过测试各组样品的色谱峰, 计算各食品模拟液中4-甲基-1-戊烯、1-癸烯迁移量的平均回收率和相对标准偏差。

## 2 结果与分析

### 2.1 色谱柱的选择

试验选取了4个不同极性 or 规格的色谱柱对食品模拟物中两种目标物的分离效果进行对比分析。结果表明, 采用DB-5色谱柱时, 4-甲基-1-戊烯与乙酸、乙醇组分的色谱峰无法实现有效分离, 结果如图1(a)、图1(b)所

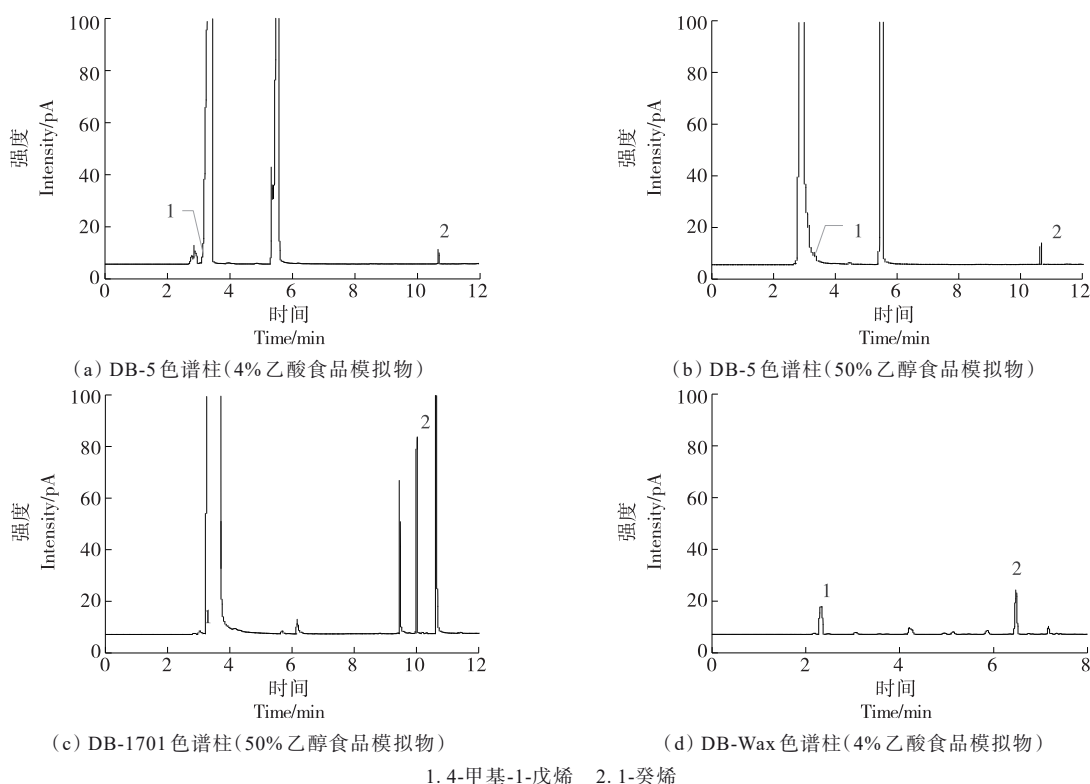


图1 不同极性 or 规格色谱柱下的食品模拟液标准色谱图

Figure 1 Standard chromatograms of food simulants obtained using chromatographic columns with different polarities or specifications

示;采用 DB-1701 色谱柱时,4-甲基-1-戊烯与乙醇色谱峰仍难以分离,如图 1(c)所示;而使用 DB-Wax 色谱柱时,两种目标物在各类食品模拟物中均可实现完全分离,但 4-甲基-1-戊烯峰形畸变并出现平头峰,如图 1(d)所示。当

采用 HP-5 色谱柱时,目标物之间、目标物与食品模拟物基质峰及 DMAC 溶剂峰均能达到基线分离,且色谱峰形良好,结果如图 2 所示。综合分离效果与峰形表现,最终选用 HP-5 色谱柱作为分离柱。

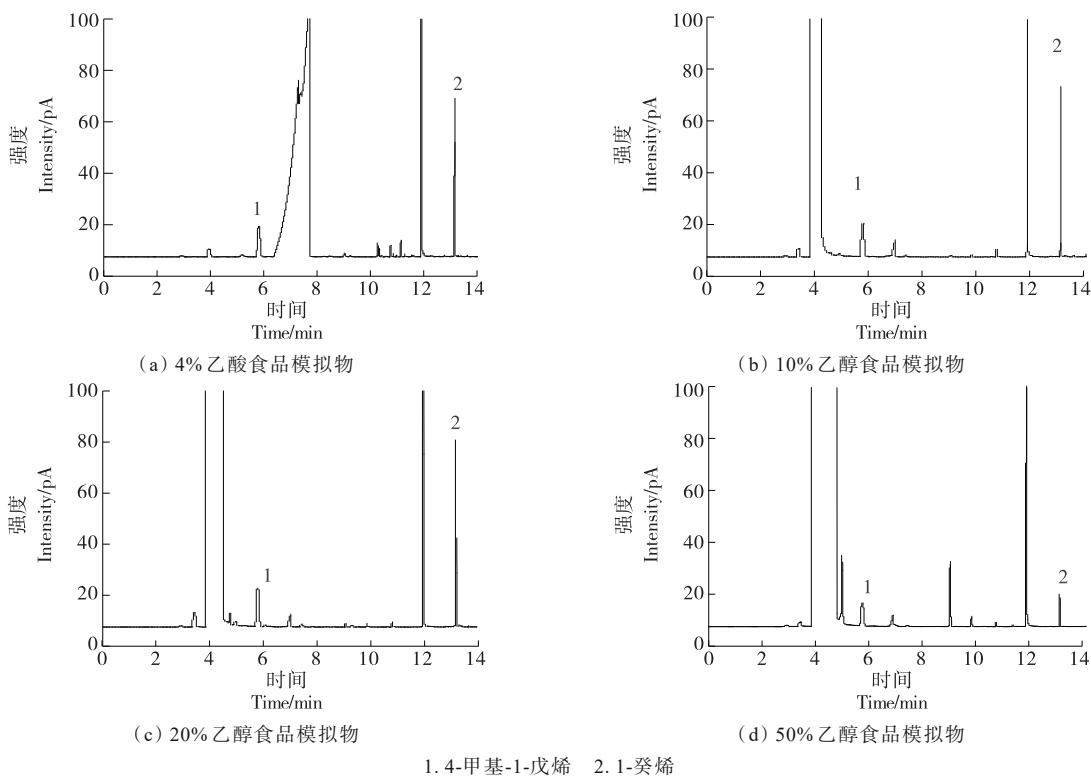


图 2 HP-5 色谱柱条件下各食品模拟物标准溶液的气相色谱图

Figure 2 Gas chromatograms of standard solutions for food simulants on HP-5 capillary column

## 2.2 顶空条件选择

**2.2.1 顶空平衡温度** 由图 3 可知,当平衡温度在 80 °C 以下时,随着顶空平衡温度的增加,4-甲基-1-戊烯和 1-癸烯峰面积明显增大;当平衡温度在 80 °C 及以上时,4-甲基-1-戊烯和 1-癸烯在各食品模拟物中响应值均相对较大且达到稳定。考虑到过高温度可能易造成模拟液中基质杂质、弱挥发性干扰组分大量挥发,增加色谱基线干扰与杂峰干扰;另一方面过高温度可能引发体系压力异常、容器密封失效等问题,影响检测重复性与方法稳定性。综合考虑,确定 80 °C 为最佳顶空平衡温度。

**2.2.2 顶空平衡时间** 由图 4 可知,顶空平衡时间会直接影响 4-甲基-1-戊烯和 1-癸烯两种目标物的挥发析出效率,进而显著影响色谱响应信号强度。在较短平衡时间条件下,目标物未能充分从基质中挥发至顶空气相;随着平衡时间不断延长,顶空体系中目标物浓度逐步提升,响应信号持续升高;当顶空平衡时间为 40 min 时,4-甲基-1-戊烯和 1-癸烯响应值达到较高水平。综合考虑目标物灵敏度及试验分析效率,确定 40 min 作为最佳顶空平衡

时间。

## 2.3 方法的线性范围、检出限与定量限

分别以 3 倍信噪比(3S/N)及 10 倍信噪比(10S/N)对应的目标物在各食品模拟液中的质量分数作为方法检出限(LOD)及定量限(LOQ),具体见表 1。由表 1 可知,4-甲基-1-戊烯和 1-癸烯在质量浓度为 0.01~0.1 mg/L 时线性关系良好,相关系数均在 0.995 以上,当迁移试验中的面积/体积与实际使用情形下的面积/体积相同时,目标物在各食品模拟物中的方法检出限(3S/N)在 0.000 1~0.002 mg/kg,定量限在 0.000 3~0.006 mg/kg。50% 乙醇食品模拟物下 4-甲基-1-戊烯和 1-癸烯的 LOD/LOQ 高于其他食品模拟物。主要原因是:与另外 3 种食品模拟物相比,50% 乙醇在顶空条件下挥发量大、蒸气压高,占据顶空气相空间,与弱极性的 4-甲基-1-戊烯、1-癸烯发生气-液分配竞争,降低目标物在顶空平衡气相中的浓度,导致色谱响应减弱、灵敏度下降,造成 LOD/LOQ 高于其他食品模拟物。

## 2.4 回收率与精密度试验

由表 2 可知,4-甲基-1-戊烯、1-癸烯在 4% 乙酸、10%

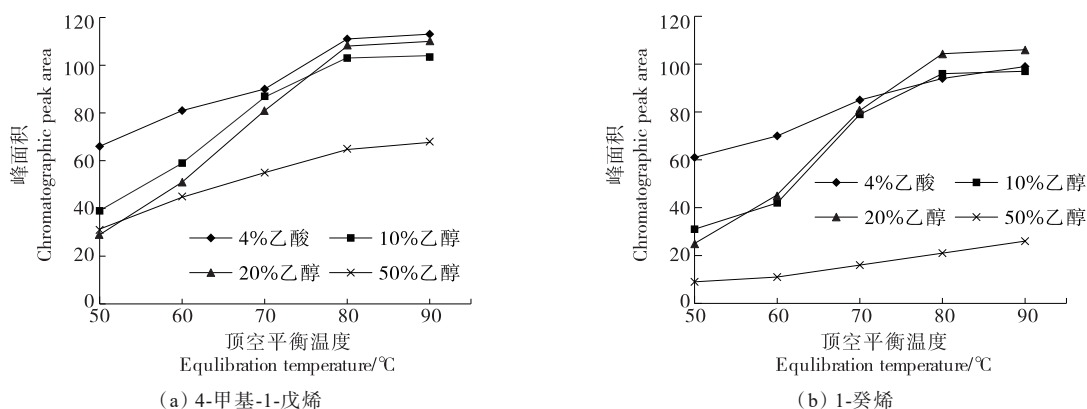


图3 不同顶空平衡温度下的色谱峰面积

Figure 3 Chromatographic peak area at different headspace equilibrium temperatures

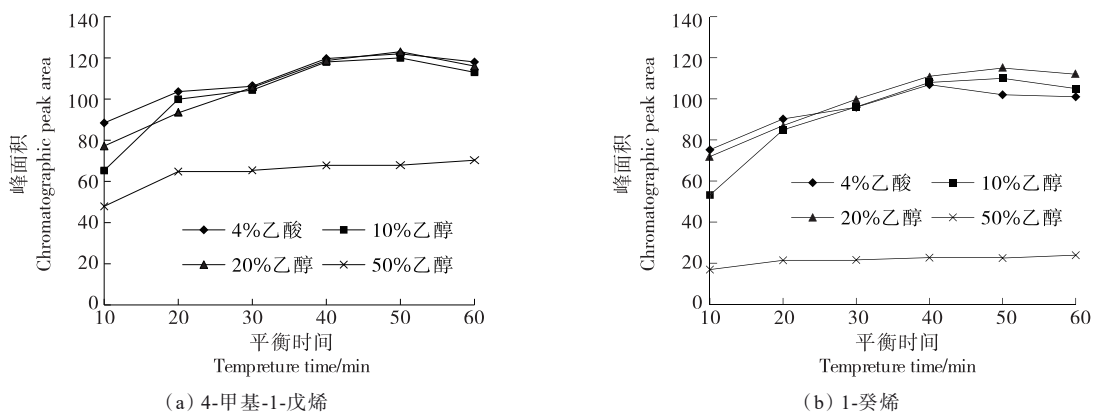


图4 不同顶空平衡时间下的色谱峰面积

Figure 4 Chromatographic peak area at different headspace equilibrium time

表1 线性与范围、检出限、定量限

Table 1 Linearity and range, limit of detection (LOD), and limit of quantitation (LOQ)

| 目标物       | 食品模拟物  | 线性范围/<br>( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) | 线性方程               | 相关系数    | 检出限/<br>( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) | 定量限/<br>( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) |
|-----------|--------|--------------------------------------------|--------------------|---------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|
| 4-甲基-1-戊烯 | 4% 乙酸  | 0.01~0.1                                   | $y=870.1x-4.57$    | 0.995 0 | 0.000 5                                    | 0.002                                      |
|           | 10% 乙醇 | 0.01~0.1                                   | $y=985.1x-5.55$    | 0.996 1 | 0.000 5                                    | 0.002                                      |
|           | 20% 乙醇 | 0.01~0.1                                   | $y=1\,170.7x-3.90$ | 0.997 6 | 0.000 3                                    | 0.001                                      |
|           | 50% 乙醇 | 0.01~0.1                                   | $y=628.0x+0.49$    | 0.999 6 | 0.002                                      | 0.006                                      |
| 1-癸烯      | 4% 乙酸  | 0.01~0.1                                   | $y=811.4x-3.95$    | 0.996 0 | 0.000 1                                    | 0.000 3                                    |
|           | 10% 乙醇 | 0.01~0.1                                   | $y=990.2x-5.83$    | 0.995 3 | 0.000 1                                    | 0.000 3                                    |
|           | 20% 乙醇 | 0.01~0.1                                   | $y=1\,164.3x-3.67$ | 0.996 9 | 0.000 1                                    | 0.000 3                                    |
|           | 50% 乙醇 | 0.01~0.1                                   | $y=191.7x+0.11$    | 0.999 7 | 0.002                                      | 0.006                                      |

乙醇、20%乙醇、50%乙醇4种食品模拟物中平均加标回收率分别为81.0%~102%, 82.0%~109%, 81.0%~100%, 83.0%~100%, 相对标准偏差( $n=6$ )分别为5.2%~9.8%, 6.6%~9.2%, 4.9%~6.1%, 1.3%~6.3%。该测定方法回收率和相对标准偏差均较好,符合GB 31604.59—2023《食品安全国家标准 食品接触材料及制品化学分析方法验证

通则》要求,适合不同食品模拟物中4-甲基-1-戊烯、1-癸烯的测定。

从试验结果来看,低水平(0.01 mg/kg)加标样品回收率整体低于中、高水平,可能目标物处于微量痕量级别时,目标物挥发损耗及仪器基线噪声等影响更为突出,导致低水平点位回收结果略低于中、高水平。

表 2 目标物在各空白基质样品浸泡液中的加标回收试验结果

| Table 2 Results of the spiked recovery test of the target compound in the soaking solution of the blank matrix sample |        |                            |      |      |                              |       |       |         |      |       |          |     |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|----------------------------|------|------|------------------------------|-------|-------|---------|------|-------|----------|-----|-----|
| 目标物                                                                                                                   | 食品模拟物  | 加标量/(mg·kg <sup>-1</sup> ) |      |      | 平均测定值/(mg·kg <sup>-1</sup> ) |       |       | 平均回收率/% |      |       | 相对标准偏差/% |     |     |
|                                                                                                                       |        | 低                          | 中    | 高    | 低                            | 中     | 高     | 低       | 中    | 高     | 低        | 中   | 高   |
| 4-甲基-1-戊烯                                                                                                             | 4% 乙酸  | 0.01                       | 0.05 | 0.10 | 0.008 1                      | 0.045 | 0.091 | 81.0    | 90.0 | 91.0  | 5.2      | 9.0 | 8.2 |
|                                                                                                                       | 10% 乙醇 | 0.01                       | 0.05 | 0.10 | 0.008 2                      | 0.053 | 0.109 | 82.0    | 106  | 109.0 | 6.6      | 8.9 | 7.0 |
|                                                                                                                       | 20% 乙醇 | 0.01                       | 0.05 | 0.10 | 0.008 2                      | 0.046 | 0.084 | 82.0    | 92.0 | 84.0  | 6.0      | 4.9 | 5.3 |
|                                                                                                                       | 50% 乙醇 | 0.01                       | 0.05 | 0.10 | 0.008 6                      | 0.044 | 0.083 | 86.0    | 88.0 | 83.0  | 5.9      | 6.3 | 4.3 |
| 1-癸烯                                                                                                                  | 4% 乙酸  | 0.01                       | 0.05 | 0.10 | 0.010 1                      | 0.051 | 0.101 | 101     | 102  | 101   | 9.7      | 9.8 | 8.4 |
|                                                                                                                       | 10% 乙醇 | 0.01                       | 0.05 | 0.10 | 0.008 3                      | 0.049 | 0.100 | 83.0    | 98.0 | 100   | 7.5      | 8.7 | 9.2 |
|                                                                                                                       | 20% 乙醇 | 0.01                       | 0.05 | 0.10 | 0.008 1                      | 0.050 | 0.086 | 81.0    | 100  | 86.0  | 5.2      | 6.1 | 5.1 |
|                                                                                                                       | 50% 乙醇 | 0.01                       | 0.05 | 0.10 | 0.009 5                      | 0.050 | 0.093 | 95.0    | 100  | 93.0  | 1.5      | 1.3 | 5.3 |

3 结论

研究建立了顶空一气相色谱法用于测定食品接触材料中 4-甲基-1-戊烯和 1-癸烯单体在 4% 乙酸、10% 乙醇、20% 乙醇和 50% 乙醇 4 种食品模拟液中的迁移量。具体检测方法:将迁移试验所得样品浸泡液置于顶空瓶中,设置顶空平衡温度为 80 ℃、顶空平衡时间为 40 min,加热使组分达到液一气平衡,顶空气经 HP-5 毛细管色谱柱(30 m×0.25 mm,1 μm)分离后,采用氢火焰离子化检测器检测,外标法定量。研究结果表明,所建立的检测方法可有效实现 4% 乙酸、10% 乙醇、20% 乙醇及 50% 乙醇 4 种食品模拟液中目标单体的快速分离与测定。两种目标物在 0.01~0.1 mg/L 质量浓度范围内线性关系良好(相关系数均在 0.995 以上),方法检出限( $S/N=3$ )为 0.000 1~0.002 mg/L,定量限( $S/N=10$ )为 0.000 3~0.006 mg/L;加标回收率为 81.0%~109%,相对标准偏差为 1.3%~9.8%。建立的检测方法操作简单、分离效果好,且具有较高的灵敏度及精密度,适用于食品接触材料中 4-甲基-1-戊烯和 1-癸烯迁移量的快速分析测试。

参考文献

[1] 吕春胜, 成名, 翟雪, 等. 乙烯与 1-癸烯共聚及其共聚物微观结构[J]. 石油学报(石油加工), 2019, 35(6): 1 123-1 129.  
Lu C S, Cheng M, Zhai X, et al. Copolymerization of ethylene with 1-decene and its microstructure[J]. Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section), 2019, 35(6): 1 123-1 129.

[2] 吴芳宇, 林亚凯, 汪林, 等. 聚 4-甲基-1-戊烯膜的制备与应用研究进展[J]. 高分子通报, 2022(5): 1-9.  
Wu F Y, Lin Y K, Wang L, et al. Research progress in preparation and application of poly(4-methyl-1-pentene) membranes[J]. Polymer Bulletin, 2022(5): 1-9.

[3] 李泽壮, 刘经伟, 徐骏, 等. 4-甲基-1-戊烯合成及应用研究进展[J]. 精细石油化工, 2025, 42(5): 78-80.

Li Z Z, Liu J W, Xu J, et al. Research progress on synthesis and application of 4-methyl-1-pentene[J]. Speciality Petrochemicals, 2025, 42(5): 78-80.

[4] 赵金尧, 柳阿芳, 万富, 等. 气相色谱法测定食品接触材料中的 12 种丙烯酸酯类单体在水性食品模拟物中的迁移量[J]. 理化检验: 化学分册, 2021, 57(6): 493-499.  
Zhao J Y, Liu A F, Wan F, et al. GC determination of 12 acrylate monomers amounts migrated from food contact materials to aqueous food simulants[J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part B: Chemical Analysis, 2021, 57(6): 493-499.

[5] 邹哲祥, 李耀平, 林艳, 等. 气相色谱法测定食品包装材料中五种抗氧化剂迁移量[J]. 分析试验室, 2017, 36(9): 1 067-1 070.  
Zou Z X, Li Y P, Lin Y, et al. Determination of the migration of five antioxidants in food packaging materials by gas chromatography[J]. Chinese Journal of Analysis Laboratory, 2017, 36(9): 1 067-1 070.

[6] 刘智, 杜悦, 张卫红. 顶空一气相色谱法测定食品接触材料及制品中异戊二烯迁移量[J]. 化学分析计量, 2020, 29(6): 98-100, 112.  
Liu Z, Du Y, Zhang W H. Determination of isoprene migration in food contact materials and products by headspace-gas chromatography[J]. Chemical Analysis and Meterage, 2020, 29 (6): 98-100, 112.

[7] 柳阿芳, 赵金尧, 万富, 等. 顶空一气相色谱法测定聚乙烯食品接触材料中 1-己烯、1-辛烯和乙酸乙烯酯在食品模拟物中的迁移量[J]. 理化检验: 化学分册, 2020, 56(10): 1 073-1 078.  
Liu A F, Zhao J Y, Wan F, et al. Headspace-GC determination of amounts of 1-hexene, 1-octene and vinyl acetate migrated from polyethylene food-contacting materials into food simulants[J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part B: Chemical Analysis, 2020, 56(10): 1 073-1 078.

[8] 余婧, 徐文洪, 汪修意. 顶空一气相色谱法分析 PVC 食品包装材料中氯乙烯、偏二氯乙烯、环氧氯丙烷的迁移量[J]. 化学分析计量, 2023, 32(6): 46-51.

- Yu J, Xu W Y, Wang X Y. Analysis of migration amount of vinyl chloride, vinylidene chloride and epichlorohydrin in PVC food packaging material by headspace-gas chromatography[J]. Chemical Analysis and Meterage, 2023, 32(6): 46-51.
- [9] 胡薇月, 胡瞰月. GC-MS测定食品接触材料中的5-亚乙基-2-降冰片烯迁移量[J]. 食品安全导刊, 2025(6): 54-59.
- Hu W Y, Hu J Y. Determination of food contact materials by GC-MS in the 5-ethylene-2-norbornene migration amount[J]. China Food Safety Magazine, 2025(6): 54-59.
- [10] 陈雄, 方宣启, 郑利军, 等. 气相色谱—质谱法测定聚乙烯食品接触材料中11种有机污染物的残留量及其迁移量[J]. 理化检验: 化学分册, 2022, 58(5): 588-593.
- Chen X, Fang X Q, Zheng L J, et al. Determination of residues of 11 organic pollutants and their migration in polyethylene food contact materials by GC-MS[J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part B: Chemical Analysis, 2022, 58(5): 588-593.
- [11] 罗序英, 胡爱生, 罗小芳. 同位素稀释—气相色谱—质谱法测定食品接触纸制品中3-氯-1,2-丙二醇和1,3-二氯-2-丙醇的迁移量[J]. 理化检验: 化学分册, 2022, 58(1): 51-57.
- Luo X Y, Hu A S, Luo X F. Determination of migration amounts of 3-chloro-1, 2-propanediol and 1, 3-dichloro-2-propanol in food contact paper products by gas chromatography-mass spectrometry with isotope dilution[J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part B: Chemical Analysis, 2022, 58(1): 51-57.
- [12] 贝荣华, 陈湘颖, 董犇, 等. 气相色谱—质谱法测定食品接触材料中2-甲基-1,3-丙二醇和新戊二醇的迁移量[J]. 分析测试学报, 2021, 40(11): 1 657-1 662.
- Bei R H, Chen X Y, Dong B, et al. Determination of migration of 2-methyl-1, 3-propanediol and 2, 2-methyl-1, 3-propanediol in food contact materials by gas chromatography-mass spectrometry[J]. Journal of Instrumental Analysis, 2021, 40(11): 1 657-1 662.
- [13] 望秀丽, 全王桦. 超高效液相色谱法测定PEEK塑料中4,4'-二氟二苯甲酮和对苯二酚的迁移量[J]. 塑料科技, 2023, 51(7): 76-79.
- Wang X L, Quan W S. Determination of 4,4'-difluorobenzophenone and hydroquinone in PEEK plastics by ultra performance liquid chromatography[J]. Plastics Science and Technology, 2023, 51(7): 76-79.
- [14] 胡云, 邹勇平, 周元元, 等. 高效液相色谱法测定聚乳酸吸管中甲醛迁移量[J]. 食品与机械, 2024, 40(2): 51-56, 90.
- Hu Y, Zou Y P, Zhou Y Y, et al. Migration quality of formaldehyde in the polylactic acid straw detected by HPLC[J]. Food & Machinery, 2024, 40(2): 51-56, 90.
- [15] 闫顺华, 杨光勇, 穆晓娟. 液相色谱—串联质谱法测定聚对苯二甲酸乙二醇酯食品包装材料中4种醛迁移量[J]. 化学分析计量, 2024, 33(4): 26-30.
- Yan S H, Yang G Y, Mu X J. Determination of 4 aldehydes migration in polyethylene terephthalate food packaging materials by liquid chromatography tandem mass spectrometry[J]. Chemical Analysis and Meterage, 2024, 33(4): 26-30.
- [16] 白泽清. 气相色谱—质谱法测定食品接触用塑料制品1-癸烯迁移量[J]. 现代食品, 2024, 30(5): 205-207, 219.
- Bai Z Q. Determination of 1-decene migrated from plastic products for food contact by gas chromatography mass spectrometry[J]. Modern Food, 2024, 30(5): 205-207, 219.