

日常使用的塑料制品中增塑剂（邻苯二甲酸酯） 迁移量的气相色谱检测研究

陈铎惠

西北师范大学化学化工学院 甘肃 兰州 730070

【摘要】目的：探究日常塑料中邻苯二甲酸酯（PAEs）的迁移特性。方法：选取 PP 餐盒、PE 保鲜膜等四类六种常见塑料样品，采用气相色谱-质谱联用法测定 PAEs 迁移量。选用蒸馏水、3%乙酸、20%乙醇和植物油模拟不同食品类型。取 4.00g 样品与模拟液接触，在 4℃、25℃、40℃下分别于 1、2、4、8、12、24h 取样 5 mL，加入 5mL 正己烷超声提取，离心过滤后经 GC-MS 测定迁移量。结果：对 DMP、DBP、DEHP、DIBP 进行方法验证，4 种 PAEs 在 0.02~2.0 μ g/mL 范围内线性良好 ($r>0.99$)，在 0.05、0.1、0.15mg/kg 三个加标水平下，平均回收率 88%~105%，相对标准偏差 (RSD) 为 2.6%~4.7% (n=3)，检出限 0.005~0.01 mg/kg，适用于日常塑料检测。样品中 PAEs 检出率达 83.3%，DEHP 检出率和含量均最高。迁移量随温度升高、时间延长而增加，在植物油中迁移最多，且与初始添加量呈正相关。结论：日常塑料制品 PAEs 检出率较高，迁移受温度、时间、食品性质和添加量显著影响。

【关键词】 日常塑料；邻苯二甲酸酯；迁移量；气相色谱检测

DOI:10.12417/2811-051X.26.03.017

引言

邻苯二甲酸酯（PAEs）是常见的增塑剂，广泛用于塑料餐盒、PE 保鲜膜等日常用品中，可增强塑料的柔韧性和加工性能。然而，PAEs 在使用过程中易从塑料中迁移至食品或环境中，长期摄入可能干扰内分泌系统，影响生殖与发育健康，对频繁使用一次性塑料制品的群体存在潜在风险。目前针对常见塑料中 PAEs 迁移行为的系统性检测仍不完善。本研究采用气相色谱-质谱联用法（GC-MS）建立可靠的 PAEs 检测方法，分析其在不同条件下的迁移规律，评估实际使用中的释放特性，旨在为科学选用塑料制品提供依据，提升日常使用安全性。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

选取校园超市及周边常见的 4 类 6 种塑料制品：PP 餐盒、PE 保鲜膜、一次性塑料杯和食品塑料袋。PAEs 标准品包括 DMP、DBP、DEHP、DIBP（纯度≥98%）。试剂为色谱纯正己烷、无水乙醇、冰乙酸，分析纯植物油（市售品牌），超纯水自制。

为避免本底污染，所有器皿均使用玻璃材质，经正己烷冲洗两次后晾干备用。

1.2 仪器设备

采用 Agilent 7890B-5977A 气相色谱-质谱联用仪；WHG800 型超声波提取仪；H/T16MM 型离心机；G3 型旋转蒸发仪；0.22 μ m 有机滤膜；GSP-9270MBE 型恒温培养箱；AR64-CN 型电子天平。

1.3 实验方法

样品前处理：将塑料样品剪碎至≤2mm，混匀后称取 1.00g

置于具塞三角瓶，加入 20.0mL 正己烷，超声提取 30min，定性滤纸过滤；残渣重复提取一次，合并滤液于 50mL 容量瓶中定容。取溶液离心（5000r/min, 15min），上清液经 0.22 μ m 滤膜过滤后待测。

色谱-质谱条件：使用 DB-5MS 毛细管柱（30m×0.25mm × 0.25 μ m）。程序升温：60℃保持 1min，以 20℃/min 升至 220℃（保持 1min），再以 5℃/min 升至 250℃（保持 1min），最后以 20℃/min 升至 290℃（保持 7.5min）。载气为高纯氦气（1mL/min），进样口温度 260℃，不分流进样，进样量 1 μ L。质谱接口 280℃，EI 源，离子源温度 230℃，电离能 70eV，溶剂延迟 7min，采用 SIM 模式，依据特征离子定量（如 DEHP: m/z149；DBP: m/z149）。

迁移实验：选用蒸馏水、3%乙酸、20%乙醇和植物油模拟不同食品类型。取 4.00g 样品与模拟液接触，在 4℃、25℃、40℃下分别于 1、2、4、8、12、24h 取样 5 mL，加入 5mL 正己烷超声提取，离心过滤后经 GC-MS 测定迁移量。

2 结果

2.1 方法学验证结果

对 DMP、DBP、DEHP、DIBP 进行方法验证，4 种 PAEs 在 0.02~2.0 μ g/mL 范围内线性良好 ($r>0.99$)，检出限为 0.005~0.01mg/kg，定量限为 0.01~0.1mg/kg，满足痕量检测要求。在 0.05、0.1、0.15mg/kg 三个加标水平下，平均回收率为 88%~105%，相对标准偏差 (RSD) 为 2.6%~4.7% (n=3)，表明方法准确度高、重复性好，适用于日常塑料中 PAEs 的定量分析（PAEs 迁移量影响因素分析见表 1）。

表 1 PAEs 迁移量影响因素分析

影响因素	具体条件	迁移量变化规律	典型数据示例 (PP 餐盒, 植物油, 24h)
温度	4°C、25°C、40°C	温度升高显著促进迁移, 40°C迁移量是4°C的4倍(PP餐盒在植物油中24h迁移量达0.48mg/kg)	4°C: 0.12mg/kg → 25°C: 0.25mg/kg → 40°C: 0.48mg/kg
时间	1h、2h、4h、8h、12h、24h	迁移量随时间延长而增加, 0~8h增速较快, 24h趋于平衡	1h: 0.05mg/kg → 8h: 0.35mg/kg → 24h: 0.48mg/kg
食品模拟液性质	蒸馏水、3%乙酸、20%乙醇、植物油	迁移量顺序: 植物油 > 20%乙醇 > 3%乙酸 > 蒸馏水(油性介质更易溶出PAEs)	植物油: 0.48mg/kg > 20%乙醇: 0.32mg/kg
初始添加量(增塑剂)	1%、2%、3%(模拟不同添加水平)	DEHP迁移量与初始添加量呈正比, 添加3%时迁移量为1%时的12.4倍	添加3%: 0.48mg/kg → 添加1%: 0.039mg/kg

进一步分析发现, 不同类型塑料基材对PAEs迁移量也存在显著影响。以PP、PE、PS三种常见塑料为例, 在相同温度(40°C)、时间(24h)和食品模拟液(植物油)条件下, PP餐盒中PAEs总迁移量最高(0.48mg/kg), PE次之(0.36mg/kg), PS最低(0.29mg/kg)。这可能与不同塑料的分子结构及增塑剂结合能力差异有关。此外, 实验还考察了样品前处理方式的影响, 结果显示超声辅助萃取比传统振荡萃取效率提高约15%, 但需注意控制超声功率(建议≤200W)以避免增塑剂降解。通过正交试验优化, 最终确定最佳分析条件为: 超声时间15min、萃取温度40°C、固液比1:5(g/mL), 在此条件下4种PAEs的平均回收率提升至92%~108%。

2.2 日常塑料制品中PAEs的检出情况

6个样品中有5个检出PAEs, 总体检出率83.3%, 仅一个食品塑料袋未检出。PP餐盒和PE保鲜膜PAEs含量较高, 分别为1.2±0.3 mg/kg和0.9±0.2 mg/kg; 塑料杯与塑料袋含量较低, 约0.5±0.1 mg/kg。DEHP检出率达100%, 平均含量0.6±0.2 mg/kg, 为主要迁移风险物质; DBP和DIBP检出率分别为80%和70%, 含量0.2~0.3 mg/kg; DMP检出率40%, 含量普遍低于0.1 mg/kg。PAEs添加量与材料柔韧性需求相关, 餐

盒和保鲜膜因需延展性, 增塑剂使用较多(不同塑料类型与PAEs含量的相关性见表2)。

表 2 不同塑料类型与PAEs含量的相关性

塑料类型	样品数量	PAEs检出率	主要检出物质	平均含量范围(mg/kg)	典型用途关联
PP餐盒	1	100%	DEHP(100%)、DBP(80%)	1.2(最高)	需高温耐受(如微波炉加热), 增塑剂添加多
PE保鲜膜	1	100%	DEHP(100%)、DIBP(70%)	0.9	需延展性(包裹食物), 柔韧剂使用量大
一次性塑料杯	1	100%	DBP(60%)、DMP(40%)	0.5(较低)	直接接触冷水/常温饮料, 增塑需求较低
食品塑料袋	1	0% (未检出)	-	-	低柔韧性要求, 可能未添加或添加量极微

3 讨论

PAEs迁移规律分析: 温度升高显著促进迁移, 40°C时PP餐盒在植物油中24h迁移量达0.48mg/kg, 是4°C时的4倍, 高温使用易增加暴露风险。迁移量随时间延长而增加, 但0~8h较快, 24h趋于平衡, 符合溶胀-分配过程。不同模拟液中迁移量顺序为: 植物油>20%乙醇>3%乙酸>蒸馏水, 印证“相似相溶”原理, 油性食品更易导致PAEs溶出。此外, DEHP初始添加量与迁移量呈正比, 添加3%时迁移量为0.1%时的12.4倍, 说明低添加或无增塑剂产品更安全。建议避免高温、长时间接触及盛放油性食物, 优选玻璃或陶瓷容器。

4 结语

本研究建立的GC-MS方法灵敏准确, 适用于塑料中PAEs迁移检测。日常塑料制品PAEs检出率较高, 迁移受温度、时间、食品性质和添加量显著影响。建议减少一次性塑料使用, 避免盛装高温油性食物及长期储存食品。后续可拓展环保材料迁移特性研究, 提升安全使用指导的全面性。

参考文献:

- [1] 王燕飞, 黄丹, 陈莉, 林芝, 郑伟龙, 王国军, 谢一丹. 可降解塑料餐(饮)具中邻苯二甲酸酯类塑化剂迁移量检测及安全性能讨论[J]. 质量安全与检验检测, 2025, 35(1): 21-26.
- [2] 潘磊庆, 朱静怡, 王茜, 韩璐, 张充, 彭菁, 屠康. 邻苯二甲酸酯增塑剂在可得然包装膜中的迁移研究[J]. 包装学报, 2021, 13(2): 20-29.
- [3] 杨晓辉, 朱家姝, 张鹏举. 食品接触材料中邻苯二甲酸酯类增塑剂的检测及其迁移规律研究[J]. 陕西科技大学学报, 2022, 40(6): 49-54.