

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

陈绎惠

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 $\mu\text{g/mL}$ 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 $\geq 98\%$ ）。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 型旋转蒸发器；0.22 μm 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 $\leq 2\text{mm}$ ，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 μm 滤膜过滤后待测。

色谱-质谱条件：使用 DB-5MS 毛细管柱（30m \times 0.25mm \times 0.25 μm ）。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）。载气为高纯氮气（1mL/min），进样口温度 260℃，不分流进样，进样量 1 μL 。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 $\mu\text{g/mL}$ 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℃、25℃、40℃	温度升高显著促进迁移，40℃迁移量是4℃的4倍（PP餐盒在植物油中24h迁移量达0.48mg/kg）	4℃：0.12mg/kg→25℃：0.25mg/kg→40℃：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℃）、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℃、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

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,朱家妹,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.

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℃时 PP 餐盒在植物油中 24h 迁移量达 0.48mg/kg，是 4℃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。