DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251107004
引用格式: 孙仁悦, 邹凯, 金莉莉, 等. 超高效液相色谱法测定食品接触用植物纤维/可降解塑料中 2,6-二异丙基苯胺和2,6-二异丙基苯酚的迁移量[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(2): 19–26.
SUN RY, ZOU K, JIN LL, *et al*. Determination of the migration of 2,6-diisopropylaniline and 2,6-diisopropylphenol from food-contact plant fiber/degradable plastics by ultra performance liquid chromatography [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(2): 19–26. (in Chinese with English abstract).

超高效液相色谱法测定食品接触用植物纤维/可降解塑料中 2,6-二异丙基苯胺和 2,6-二异丙基苯酚的迁移量

孙仁悦[1], 邹　凯[1], 金莉莉[1], 罗世鹏[2,3*], 刘桂华[2,3*]

(1. 常州工业及消费品检验有限公司, 常州　213000; 2. 江苏理工学院化学化工学院, 常州　213000;
3. 南京海关危险货物与包装检测中心, 常州　213000)

摘　要: 目的　建立超高效液相色谱法测定食品接触用植物纤维/可降解塑料中 2,6-二异丙基苯胺(2,6-diisopropylaniline, 2,6-DIPA)和 2,6-二异丙基苯酚(2,6-diisopropylphenol, 2,6-DIPP)迁移量的方法, 并对阳性植物纤维/聚乳酸(polylactic acid, PLA)样品中 2,6-DIPA 的迁移规律进行全面研究。**方法**　在优化液相色谱条件的基础上, 验证 2,6-DIPA 和 2,6-DIPP 在 4%乙酸、10%乙醇、20%乙醇、50%乙醇、95%乙醇(*V*:*V*)浸泡液中的线性关系和回收率, 从 4 个试验维度研究 2,6-DIPA 的迁移规律。**结果**　2,6-DIPA 和 2,6-DIPP 呈现出良好的线性关系, 检出限分别可达 0.010 mg/L 和 0.003 mg/L, 综合回收率在 72.0%~109.0%之间; 2,6-DIPA 的迁移量与乙醇浓度、迁移温度、迁移时间呈现正相关, 与迁移次数呈现负相关, 高温筛查试验可以替代部分试验条件。**结论**　综合迁移研究数据表明, 植物纤维/PLA 材质中 2,6-DIPA 的迁移量存在一定健康风险, 亟需从多环节关注。

关键词: 植物纤维/可降解塑料; 食品接触材料; 超高效液相色谱法; 迁移规律

Determination of the migration of 2,6-diisopropylaniline and 2,6-diisopropylphenol from food-contact plant fiber/degradable plastics by ultra performance liquid chromatography

SUN Ren-Yue[1], ZOU Kai[1], JIN Li-Li[1], LUO Shi-Peng[2,3*], LIU Gui-Hua[2,3*]

(1. *Changzhou Industrial and Consumable Products Inspection Co*., *Ltd*., *Changzhou* 213000, *China*;
2. *School of Chemistry and Chemical Engineering*, *Jiangsu University of Technology*, *Changzhou* 213000, *China*;
3. *Nanjing Customs District Testing Center for Dangerous Goods and Packaging*, *Changzhou* 213000, *China*)

收稿日期: 2025-11-07
基金项目: 海关总署科研项目(2023HK118); 江苏理工学院产教融合项目(KYHC25016)
第一作者: 孙仁悦(1999—), 女, 硕士, 初级工程师, 主要研究方向为食品接触材料检测。E-mail: 1635726820@qq.com
***通信作者:** 罗世鹏(1986—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为有机化学、非靶向高通量筛查技术研究。E-mail: spluo@jsut.edu.cn
刘桂华(1983—), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为食品接触材料合规检测技术开发、非靶向高通量筛查技术研究。
E-mail: liugh@dptc.org

ABSTRACT: Objective To establish a method for determination of the migration of 2,6-diisopropylaniline (2,6-DIPA) and 2,6-diisopropyphenol (2,6-DIPP) from food-contact plant fiber/degradable plastics by ultra performance liquid chromatography, and conduct a comprehensive study on the migration pattern of 2,6-DIPA from positive plant fiber/polylactic acid (PLA) samples. **Methods** Basing on optimized chromatographic conditions, the linear relationships and recoveries of 2,6-DIPA and 2,6-DIPP were validated in 4% acetic acid, 10% ethanol, 20% ethanol, 50% ethanol and 95% ethanol (*V*:*V*) soaking solution. The migration pattern of 2,6-DIPA was investigated from 4 dimensions. **Results** The method showed good linearity for both compounds, with limits of the detection of 0.010 mg/L (2,6-DIPA) and 0.003 mg/L (2,6-DIPP), and overall recoveries of 72.0%–109.0%. The migration amount of 2,6-DIPA was positively correlated with ethanol concentration, migration temperature and migration time, and negatively correlated with migration frequency. High temperature screening tests could replace some experimental conditions. **Conclusion** The integrated study indicates that the migration of 2,6-DIPA from plant fiber/PLA materials poses a potential health risk, requiring focused attention across various stages.

KEY WORDS: plant fiber/degradable plastics; food contact materials; ultra performance liquid chromatography; migration patterns

0 引 言

植物纤维/可降解塑料是一种由竹纤维、秸秆纤维、木纤维等天然植物纤维与聚乳酸(polylactic acid, PLA)[1]、聚对苯二甲酸-己二酸丁二醇酯[poly(butylene adipate-co-terephthalate), PBAT][2]等可降解塑料基体复合而成的创新型环保材料。这类新材料不仅结合了植物纤维来源广、可再生、低成本的天然优势, 与可降解塑料可降解、易加工的环保特性[3], 同时将两者复合还可发挥增强力学性能、加速降解、减塑等协同作用, 现已广泛应用于食品接触材料领域。然而, 相较于单一的塑料制品, 此类复合材料也可能引入来源于植物纤维及可降解塑料两者双重的安全风险[4–5]。因此, 食品接触用植物纤维/可降解塑料的使用安全性值得进一步系统研究[6]。

2,6-二异丙基苯胺(2,6-diisopropylaniline, 2,6-DIPA)是一种在精细化工领域的重要中间体, 在农药、医药、染料及食品等工业中均有应用。在塑料工业中, 其广泛用作塑料发泡剂, 可有效提升塑料制品的机械性能和耐热稳定性[7], 同时它也是抗水解剂 N,N'-二(2,6-二异丙基苯基)碳二亚胺[bis(2,6-diisopropylphenyl)carbodiimide, BDICDI]的合成起始原料。而在可降解塑料中, 2,6-DIPA 主要由材料中 BDICDI 水解形成[8], BDICDI 可先转化为 2,6-二异丙基苯异氰酸酯, 继而通过水解作用形成稳定的 2,6-DIPA[9]。值得关注的是, CUI 等[10]研究发现 PBAT 地膜及地膜接触的土壤中的 2,6-DIPA 及其异氰酸酯含量分别可达 2.45 mg/g 与 14.37 μg/g。由于 2,6-DIPA 的分子结构与芳香族胺类相仿, 具有水溶性高、生物降解性差的特点, 对环境安全及人体健康存在潜在风险[11]。因此, 欧洲食品安全局规定食品接触材料中 2,6-DIPA 与 BDICDI 的迁移量总和不得超过 0.05 mg/kg[12]。

作为抗水解剂的合成原料, 2,6-DIPA 通常采用 2,6-二异丙基苯酚(2,6-diisopropylphenol, 2,6-DIPP)胺化法制得[13]。2,6-DIPP 作为化工领域中应用广泛的有机合成中间体, 在医药领域中常作为短效麻醉药使用[14]。经致畸敏感期毒性试验结果表明, 2,6-DIPP 作为注射乳剂剂量在 19.3 mg/kg 时, 可见动物致畸胎毒性反应[15]。因此, 若 2,6-DIPA 合成时, 2,6-DIPP 用量不当致其少量残留, 可能给添加 2,6-DIPA 的植物纤维/可降解塑料产品引入食品安全风险。

目前, 针对 2,6-DIPA 等同类芳香族伯胺及其合成产物已有相关检测方法标准发布[GB 31604.52—2021《食品安全国家标准 食品接触材料及制品 芳香族伯胺迁移量的测定》和 SN/T 4321—2015《食品接触材料 高分子材料食品模拟物中 N,N'-二(2,6-二异丙基苯基)碳二亚胺的测定液相色谱-质谱/质谱法》], 两者均采用液相色谱联用质谱法进行检测, 而 2,6-DIPA 和其生产前体 2,6-DIPP 的相关检测方法鲜见报道。鉴于两者结构的荧光特性, 本研究采用超高效液相色谱法搭载荧光检测器建立食品接触用植物纤维/可降解塑料中 2,6-DIPA 及 2,6-DIPP 迁移量检测方法。根据实际样品中两种物质的检出情况, 从食品模拟物种类、迁移次数、迁移温度与时间, 以及加速筛查试验 4 个维度, 全面评估它们的迁移风险, 旨在为此类食品接触材料及制品的风险管控提供科学依据与技术支撑。

1 材料与方法

1.1 仪器与试剂

2,6-DIPA (CAS 号 24544-04-5, 纯度 97%)、2,6-DIPP (CAS 号 2078-54-8, 纯度 99%)(坛墨质检科技股份有限公司); 乙醇、乙腈(色谱纯, 江苏强盛功能化学股份有限公

司); 乙酸(色谱纯, 上海泰坦科技股份有限公司)。

1290 型超高效液相色谱仪(带荧光检测器, 美国安捷伦公司); FM-LT 型荧光光谱仪(法国堀场公司); FastCore Super C_{18} 色谱柱(150 mm×4.6 mm, 2.6 μm, 广州菲罗门科学仪器有限公司); PURELAB Option-Q7/15 超纯水纯化系统(英国埃尔格公司); XS205 DU 万分之一分析天平(瑞士梅特勒托利多公司); FD-260 型烘箱(德国宾得公司)。

1.2　标准溶液制备

分别准确称取 20.0~30.0 mg 2,6-DIPA 和 2,6-DIPP, 使用乙腈溶解定容至 25 mL 容量瓶, 混匀, 得到质量浓度约 1000 mg/L 的标准储备液。随后, 准确移取对应体积储备液, 加入乙腈稀释至质量浓度 100 mg/L 的 2,6-DIPA 和 10 mg/L 的 2,6-DIPP 中间液。

以 4%乙酸为溶剂, 吸取 1.00 mL 各中间液于 10 mL 量瓶中, 定容后混匀, 制得含 2,6-DIPA 10 mg/L、2,6-DIPP 1.00 mg/L 的混合标准中间液。随后经逐级稀释, 得到一组浓度梯度分别为 0.10~5.00 mg/L 与 0.01~0.50 mg/L 的系列混合标准工作液。其余 4 种食品模拟物的标准工作液均依上述方法配制。

1.3　迁移试验

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试验通则》和 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, 对植物纤维/可降解塑料餐具开展迁移试验, 设置 3 个平行样本。因浸泡液澄清透明、无悬浮杂质, 直接移取 1 mL 置于进样小瓶进行分析。采用阳性植物纤维/PLA 样品, 依据表 1 所列因素与条件, 从 4 个维度研究 2,6-DIPA 的迁移规律[17]。

表 1　迁移试验信息
Table 1　Migration test information

序号	考察因素	食品模拟物	迁移次数	迁移条件
1	食品模拟物类型	4%乙酸, 10%乙醇、20%乙醇、50%乙醇、95%乙醇	1 次	70 ℃, 2 h[16]
2	迁移试验次数	4%乙酸, 10%乙醇、20%乙醇、50%乙醇、95%乙醇	3 次	70 ℃, 2 h
3	长期迁移试验	4%乙酸、95%乙醇	1 次	20、40、60 ℃, 10 d
4	高温回流试验	4%乙酸、95%乙醇	1 次	回流温度, 4 h

注: 百分数为体积分数。

1.4　仪器条件

流速为 0.8 mL/min, 柱温为 40 ℃, 进样量为 5.0 μL; 荧光检测器波长的设定见表 2, 增益设为 18; 流动相为 0.1%磷酸水溶液(A)和甲醇(B), 梯度洗脱程序: 0~2 min, 70% A; 7~10 min, 25% A; 11~15 min, 70% A。

表 2　波长的设定
Table 2　Setting of wavelength

序号	时间/min	激发波长/nm	发射波长/nm	检测目标物
1	0	236	328	2,6-DIPA
2	8.5	271	305	2,6-DIPP

1.5　数据处理

本研究所有分析均基于 3 次独立样品测试。样品数据首先由 Agilent 工作站采集与计算, 继而采用 WPS Office Excel 2025 进行统计分析, 最终利用 Origin 2018 完成图表绘制。

2　结果与分析

2.1　色谱条件的优化

考虑到方法的普适性、经济性及目标物质的中等极性, 本研究选用 C_{18} 色谱柱进行分析测试, 对色谱条件中流动相与检测波长进行重点优化。

2.1.1　流动相的优化

尝试采用水和甲醇作为流动相进行色谱分离, 结果表明, 可能由于 2,6-DIPA 和 2,6-DIPP 结构相似, 导致保留时间相近, 未达到基线分离。通过优化, 将水相换成 0.1%的磷酸水溶液后, 二者分离效果良好, 其可能原因是在酸性条件下, 2,6-DIPA 离子化, 导致保留时间提前, 从而与 2,6-DIPP 良好分离。更换流动相之后的色谱图见图 1, 2,6-DIPA 和 2,6-DIPP 的保留时间分别在 7.92 min 和 10.74 min。

2.1.2　检测波长的确定

采用荧光光谱仪对两种物质的发射和激发光谱扫描, 得到 2,6-DIPA 和 2,6-DIPP 的激发/发射光谱图, 如图 2 和图 3 所示。

如图 2 所示, 2,6-DIPA 在激发波长 236 nm、发射波长 328 nm 时荧光响应最强, 故将此组合确定为其检测波长。对于 2,6-DIPP, 其在 271 nm 激发波长下于 297 nm 处有最大发射, 参考相关文献[18]之后, 为提升方法特异性与灵敏度, 最终将发射波长定为 305 nm。此外, 将检测器增益优化为 18, 此条件下既能满足检出限要求, 亦可获得峰形良好的色谱图。

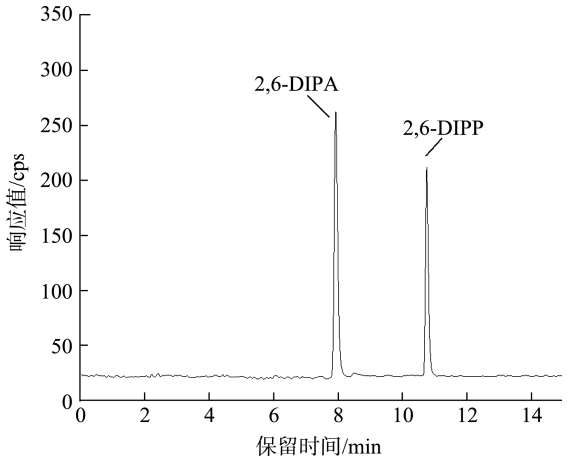


图 1 优化后的色谱图
Fig.1 Optimized chromatogram

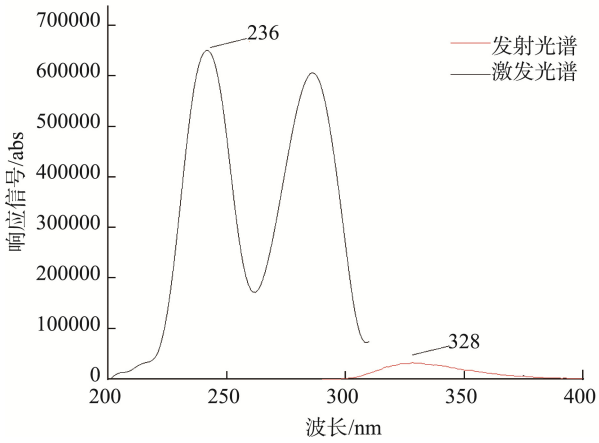


图 2 2,6-DIPA 的荧光光谱
Fig.2 Fluorescence spectrum of 2,6-DIPA

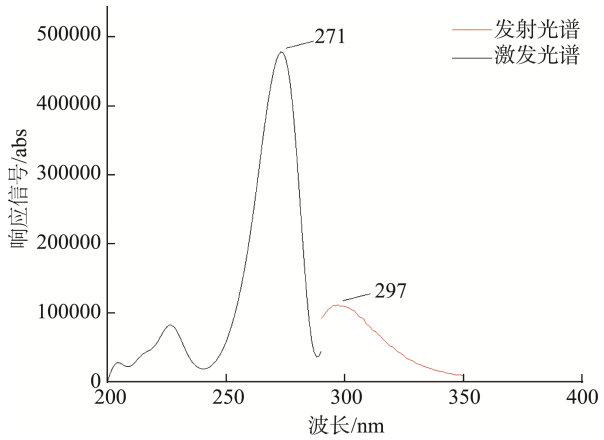


图 3 2,6-DIPP 的荧光光谱
Fig.3 Fluorescence spectrum of 2,6-DIPP

2.2 方法学考察

2.2.1 线性关系、检出限与定量限

采用系列标准工作溶液进行分析，以峰面积-质量浓度关系绘制标准曲线。如表 3 所示，两种物质在 5 种食品模拟物中均表现出良好的线性关系：2,6-DIPA 在 0.10~5.00 mg/L 范围内相关系数(r^2)为 0.9998~1.0000, LODs 为 0.010~0.030 mg/L, LOQs 为 0.04~0.08 mg/L; 2,6-DIPP 在 0.01~0.50 mg/L 范围内 r^2 为 0.9994~0.9998, LODs 为 0.003~0.004 mg/L, LOQs 为 0.01 mg/L。结果表明，该方法在各食品模拟物中均具备良好的检测灵敏度[19]。

2.2.2 准确度与精密度

根据 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》的要求，对本方法在 5 种食品模拟物中的准确度与精密度进行了验证：在阴性浸泡液中添加低、中、高 3 种浓度的标准溶液，每个浓度水平平行测定 6 次。结果(表 4)显示，2,6-DIPA 的加标回

表 3 线性方程、相关系数、LODs 和 LOQs
Table 3 Linear equations, correlation coefficients, LODs and LOQs

化合物	食品模拟物	标准曲线方程	r^2	LODs/(mg/L)	LOQs/(mg/L)
2,6-DIPA	4%乙酸	Y=1759.0127X–8.6857	1.0000	0.010	0.04
2,6-DIPP		Y=14429.5093X–75.5249	0.9997	0.004	0.01
2,6-DIPA	10%乙醇	Y=1782.2017X+0.8982	1.0000	0.030	0.08
2,6-DIPP		Y=18442.1979X+91.9805	0.9994	0.003	0.01
2,6-DIPA	20%乙醇	Y=1772.3449X+0.1133	0.9998	0.020	0.06
2,6-DIPP		Y=19611.8795X+101.8492	0.9998	0.003	0.01
2,6-DIPA	50%乙醇	Y=1794.6012X+56.4965	0.9998	0.030	0.08
2,6-DIPP		Y=19931.2647X+99.6779	0.9997	0.003	0.01
2,6-DIPA	95%乙醇	Y=1565.1837X+0.5504	0.9999	0.020	0.05
2,6-DIPP		Y=19165.5075X–20.2061	0.9996	0.003	0.01

注：检出限(limit of detection, LOD)；定量限(limit of quantitation, LOQ)。

表 4　方法的回收率及精密度试验(n=6)
Table 4　Recoveries and precision test of the method (n=6)

模拟物	2,6-DIPA			2,6-DIPP		
	添加值/(mg/L)	RSDs/%	回收率/%	添加值/(mg/L)	RSDd/%	回收率/%
4%乙酸	0.10	8.60	98.1	0.01	5.80	97.0
	0.50	1.60	97.9	0.05	5.90	101.0
	5.00	0.36	98.2	0.50	0.71	109.0
10%乙醇	0.10	6.40	97.4	0.01	14.00	84.0
	0.50	0.36	98.4	0.05	3.00	72.0
	5.00	0.15	97.4	0.50	0.20	91.2
20%乙醇	0.10	2.40	97.8	0.01	12.00	83.0
	0.50	0.92	101.0	0.05	0.94	75.0
	5.00	0.35	100.0	0.50	0.73	87.6
50%乙醇	0.10	4.30	80.9	0.01	13.00	99.0
	0.50	1.40	97.8	0.05	3.80	91.2
	5.00	0.65	98.6	0.50	1.70	93.0
95%乙醇	0.10	3.20	82.0	0.01	2.60	100.0
	0.50	4.60	99.0	0.05	0.95	97.4
	5.00	0.35	100.0	0.50	0.54	98.8

注: 相对标准偏差(relative standard deviation, RSD)。

收率为 80.9%~101.0%, RSDs 小于等于 8.60%; 2,6-DIPP 的回收率为 72.0%~109.0%, RSD 小于 14.00%。所有结果均表明, 该方法回收率良好、精密度符合分析测试要求。

2.3　实际样品测试

在开展迁移规律研究之前, 对购自线上和线下市场的 22 批不同材质(包括竹纤维/PLA、咖啡渣/PLA 等)的植物纤维/可降解塑料叉勺、吸管等餐具进行初筛。超高效液相色谱法分析结果(表 5)表明: 2,6-DIPA 的检出率为 9.1%, 其迁移量为 0.28~5.32 mg/kg, 检出率较低, 但是在植物纤维/PLA 材质样品中集中检出, 且迁移量超出法规阈值; 2,6-DIPP 在所有样品中均未检出。基于此, 后续选取迁移量较高的植物纤维/PLA 样品, 用于系统研究 2,6-DIPA 的迁移规律。

表 5　实际样品初筛结果
Table 5　Initial screening results of actual samples

化合物名称	样品数量/批	检出率/%	迁移量/(mg/kg)
2,6-DIPA	22	9.1	0.28~5.32
2,6-DIPP	22	0	-

注: -表示无相关数据。

2.4　迁移规律

2.4.1　食品模拟物类型对迁移量的影响

为探究 2,6-DIPA 在不同食品模拟物中的迁移风险差异, 选用阳性样品在 4%乙酸、10%乙醇、20%乙醇、50%乙醇及 95%乙醇(V:V)[20] 5 种模拟物中进行高温短时迁移试验。试验采用控制变量法, 除模拟物种类外, 面积体积比、迁移温度(70 ℃)、以及迁移时间(2 h)保持一致, 迁移结果图 4 所示。

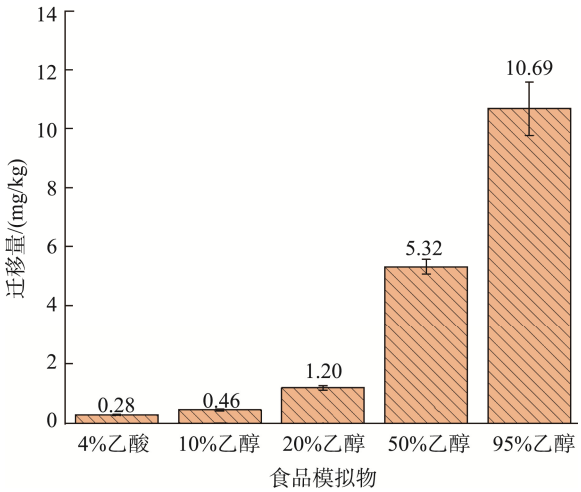


图 4　2,6-DIPA 在不同模拟物中的检测结果
Fig.4　Detection results of 2,6-DIPA in different simulants

结果表明, 2,6-DIPA 在全部模拟物中均有检出, 且在乙醇模拟物中的迁移量和乙醇体积分数呈明显正相关, 在 95%乙醇中达到峰值[21]。这可能是由于乙醇能够对 PLA 材料产生溶胀或渗透作用, 从而促进 2,6-DIPA 的析出[22]。

2.4.2　迁移试验次数对迁移量的影响

为考察重复使用次数对迁移量的影响, 在 70 ℃、2 h 的条件下, 使用 5 种食品模拟物对阳性样品依次进行 3 次连续浸泡试验。每次浸泡结束后, 更换为新的模拟物重复

条件浸泡。单次迁移量随浸泡次数的变化趋势如图 5 所示。

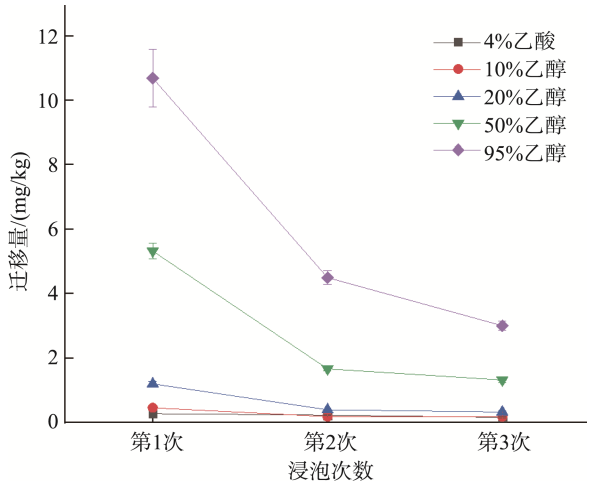


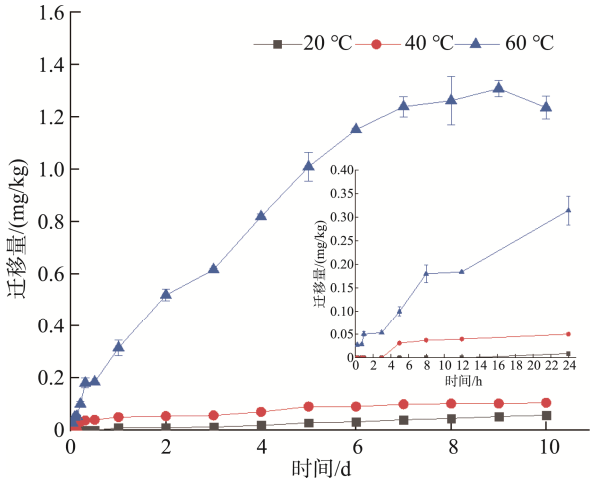
图 5 2,6-DIPA 迁移量随浸泡次数的变化

Fig.5 Change in 2,6-DIPA migration with soaking cycles

从迁移量随浸泡次数变化图可以看出，2,6-DIPA 在 5 种模拟物中，3 次迁移试验的迁移量都是呈现逐次递减的趋势，符合多数情况下食品接触材料的迁移情况[23]。

2.4.3 迁移试验温度、时间对迁移量的影响

根据短期(2 h)迁移试验，选用性质差异显著的 4%乙酸与 95%乙醇溶液进行长期(10 d)迁移试验，首日于 15、30、45 min 及 1、2、3、5、8、12、24 h 进行密集取样，之后间隔 1 d 取样分析[24]，2,6-DIPA 在两种模拟物中的长期迁移动力学曲线分别见图 6 和图 7。



注：右下方小图表示 24 h 内迁移量的变化情况。

图 6 2,6-DIPA 在 4%乙酸溶液中的长期迁移

Fig.6 Long-term migration of 2,6-DIPA in 4% acetic acid solution

迁移结果表明，在 4%乙酸溶液中(图 6)，2,6-DIPA 的迁移量有明显差异，前 24 h 内，40 ℃和 60 ℃迁移量的增长速度分别是 20 ℃的 5 倍和 30 倍，这说明随着温度的升高，迁移速率会显著增加[25–26]。24 h 后，20 ℃、40 ℃的迁移量较小，60 ℃的迁移量在第 7 d 达到迁移平衡。在 95%乙醇溶液中(图 7)，温度对迁移的促进作用更为明显，前 24 h 中，40 ℃和 60 ℃迁移量的增长速度分别是 20 ℃的 22 倍和 97 倍。24 h 后，40 ℃的迁移量始终处于上升状态，60 ℃的迁移量在第 3 d 趋于迁移平衡，说明适当提高温度能加剧分子热运动，从而缩短迁移试验所需时间[27–28]。

综合长期迁移试验结果，2,6-DIPA 在 20 ℃、40 ℃，10 d 的迁移均未达到平衡，在 60 ℃，10 d 的迁移量先在短期内迅速升高后趋于平衡，整体迁移量随温度和时间的增加而升高，直至到达平衡点。

2.4.4 加速迁移筛查试验考察

将阳性样品在回流温度下浸泡 4 h，比较回流试验迁移量和长期迁移试验(20、40、60 ℃，10 d)的平衡迁移量之间的差异，从而推算出与长期迁移试验结果之前的涵盖关系，对比效果图见图 8。

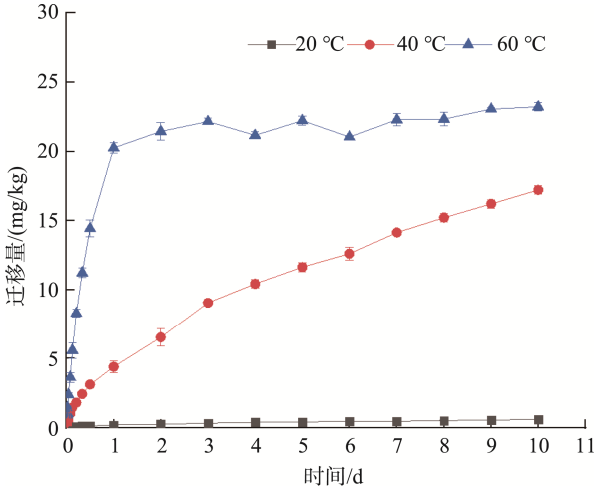


图 7 2,6-DIPA 在 95%乙醇溶液中的长期迁移

Fig.7 Long-term migration of 2,6-DIPA in 95% ethanol solution

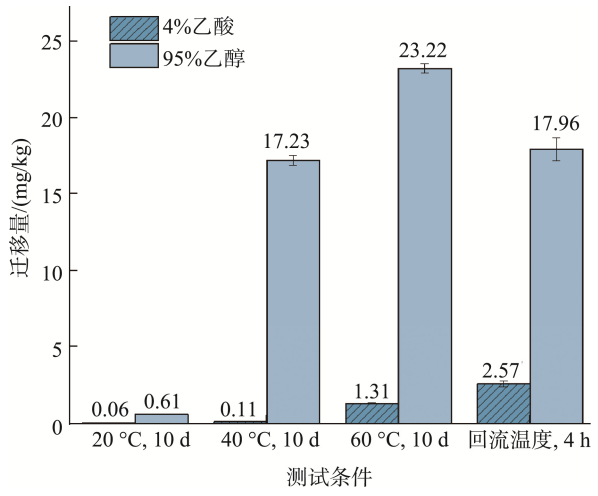


图 8 4 种测试条件下的对比图

Fig.8 Comparison chart under 4 kinds of testing conditions

根据高温回流试验结果, 2,6-DIPA 在“回流温度, 4 h”的迁移量, 可替代除“95%乙醇、60 ℃、10 d”外的大部分迁移条件, 这表明植物纤维/PLA 材质延续了 PLA 的耐热性特点, PLA 为线性聚合结构, 侧链缺乏活性基团, 致使其耐热性较差[29–30]。

上述迁移结果表明, 4 个试验条件下 2,6-DIPA 的最大迁移量均超过了迁移限量 0.05 mg/kg, 说明植物纤维/PLA 材质中 2,6-DIPA 存在一定迁移风险, 基于此, 本研究后续将深入探索 2,6-DIPA 及其前体脱水剂 BDICDI 在食品模拟物中的完整迁移转化规律。对于生产商家, 可以改进生产工艺; 对于监管机构, 需要关注物质的靶向迁移情况; 对于消费者, 可谨慎在“高温、高酒精、长期”条件下使用植物纤维/可降解塑料制品。

3　结　论

本研究采用超高效液相色谱-荧光检测器建立了 5 种食品模拟物中 2,6-DIPA 和 2,6-DIPP 的检测方法, 该方法具备良好的分离度和准确度。在对植物纤维/可降解塑料食品接触材料中两种目标物的迁移研究结果表明: (1)在对 22 批实际样品的筛查中, 2,6-DIPP 迁移风险小, 2,6-DIPA 只在植物纤维/PLA 制品中有检出, 且迁移量超过了法规阈值, 迁移风险较大; (2)在不同食品模拟物中, 2,6-DIPA 在 95%乙醇模拟物中迁移量最高; 2,6-DIPA 随着温度的升高, 迁移量增大; 随着时间的增加, 迁移量逐渐增加后趋于平衡; (3)重复使用的材料, 使用次数越多, 其迁移风险越小。监管机构在对食品用植物纤维/PLA 的授权过程中, 建议可关注 2,6-DIPA 的迁移情况。

参考文献

[1] TAIB NAB, RAHMAN MR, HUDA D, *et al*. A review on poly lactic acid (PLA) as a biodegradable polymer [J]. Polymer Bulletin, 2023, 80(2): 1179–1213.

[2] 金玉杰, 王康, 李祎. 农作物秸秆改性可降解聚合物复合材料研究进展[J]. 塑料包装, 2025, 35(4): 29–33.
JIN YJ, WANG K, LI W. Progress of research on degradable polymer composites modified by crop straws [J]. Plastics Packaging, 2025, 35(4): 29–33.

[3] HAIDER TP, VÖLKER C, KRAMM J, *et al*. Plastics of the future? the impact of biodegradable polymers on the environment and on society [J]. Angewandte Chemie International Edition, 2019, 58(1): 50–62.

[4] GUAN M, ZHONG H, WANG Z, *et al*. Chemical contaminants from food contact materials and articles made from or containing wood and bamboo-a review [J]. Food Additives & Contaminants: Part A, 2023, 40(3): 434–453.

[5] ZHANG H, SU QZ, SHANG GQ, *et al*. Elucidation of non-intentionally added substances from plant fiber plastic composites by UPLC-QTOF/MS [J]. Foods, 2023, 12: 678.

[6] 孙李炜, 彭友雪, 雷文, 等. 熔融沉积法 3D 打印天然植物纤维/可降解塑料复合材料的进展[J]. 塑料, 2024, 53(4): 139–144, 165.
SUN LW, PENG YX, LEI W, *et al*. Progress in 3D printing of natural plant fiber/degradable plastic composite by melting deposition [J]. Plastics, 2024, 53(4): 139–144, 165.

[7] 廖文文, 刘智凌, 王宇, 等. 2,6-二异丙基苯胺的制备[J]. 湖南化工, 1999(1): 18–19.
LIAO WW, LIU ZL, WANG Y, *et al*. The preparation of 2,6-diisopropylaniline [J]. Fine Chemical Intermediates, 1999(1): 18–19.

[8] CAI K, LIU Q, LIN Y, *et al*. Amine switchable hydrophilic solvent vortex-assisted homogeneous liquid-liquid microextraction and GC-MS for the enrichment and determination of 2,6-DIPA additive in biodegradable film [J]. Molecules, 2024, 29(9): 2068.

[9] 向美, 蔡凯, 高维常, 等. 生物降解地膜添加剂 2,6-二异丙基苯胺对烟苗生长、生理特性及氮代谢的影响[J]. 中国烟草学报, 2022, 28(2): 77–84.
XIANG M, CAI K, GAO WC, *et al*. Effects of 2,6-diisopropylaniline additive in biodegradable mulch film on the growth, physiological properties and nitrogen metabolism of tobacco seedlings [J]. Acta Tabacaria Sinica, 2022, 28(2): 77–84.

[10] CUI H, GAO W, LIN Y, *et al*. Development of microwave-assisted extraction and dispersive liquid-liquid microextraction followed by gas chromatography-mass spectrometry for the determination of organic additives in biodegradable mulch films [J]. Microchemical Journal, 2021, 160. DOI: 10.1016/j.microc.2020.105722

[11] 洪小燕, 温裕云, 林芳, 等. 土壤及沉积物中 25 种芳香胺的固-液-液萃取及气相色谱-质谱测定方法初步研究[J]. 分析测试学报, 2010, 29(1): 31–34.
HONG XY, WEN YY, LIN F, *et al*. Preliminary study of 25 aromatic amines in soil and sediment matrices with solid-liquid-liquid extraction combining with GC-MS [J]. Journal of Instrumental Analysis, 2010, 29(1): 31–34.

[12] EFSA Panel on Food Contact Materials. Scientific opinion on the safety evaluation of the substance bis (2,6-diisopropylphenyl) carbodiimide for use in food contact materials [J]. EFSA Journal, 2010, 8(12): 1928.

[13] 姜瑞霞, 谢在库, 张成芳, 等. 2,6-二异丙基苯酚胺化制备 2,6-二异丙基苯胺反应的热力学分析[J]. 化学工程师, 2001(5): 36–39.
JIANG RX, XIE ZK, ZHANG CF, *et al*. Thermodynamic estimation of preparation of 2,6-diisopropylaniline by amination of 2,6-diisopropylphenol [J]. Chemical Engineer, 2001(5): 36–39.

[14] ELSOM J. Propofol wastage in anaesthesia: Implications and environmental outcomes [J]. The Veterinary Nurse, 2024, 15(1): 30–34.

[15] 任建平, 郭绍明, 许锦良. 2,6-二异丙基苯酚注射乳剂对小鼠的致畸敏感期毒性试验: 低碳生活与健康损害论坛——中国环境诱变剂学会风险评价专业委员会全国第十三届学术会议暨第四届第 5 次委员会会议[C]. 中国内蒙古海拉尔, 2011.
REN JP, GUO SM, XU JL. Teratogenic sensitivity period toxicity study of 2,6-diisopropylphenol injection emulsion in mice: Low-carbon lifestyle and health damage forum [C]. Hailar Inner Mongolia China, 2011.

[16] SIMONETTI G, RICCARDI C, POMATA D, *et al*. Studies of potential migration of hazardous chemicals from sustainable food contact materials [J]. Foods, 2024, 13(5): 645.

[17] 孙仁悦, 庄培花, 金莉莉, 等. 植物纤维/密胺食品接触材料中半挥发性有机物的安全性研究[J]. 包装工程, 2025, 46(15): 169–176.

SUN RY, ZHUANG PH, JIN LL, *et al*. Safety of semi-volatile organic compounds in plant fiber/melamine food contact materials [J]. Packaging Engineering, 2025, 46(15): 169–176.

[18] 颜珲璘. 水产品中丙泊酚麻醉剂残留检测方法的研究[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2019.
YAN HL. Detection of propofol anesthetic residue in aquatic products [D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2019.

[19] 孙仁悦. 食品接触用新型可降解塑料中风险物质筛查检测研究[D]. 常州: 江苏理工学院, 2024.
SUN RY. Study on screening and detection of risky substances in new degradable plastics for food contact use [D]. Changzhou: Jiangsu University of Technology, 2024.

[20] 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.
YANG XH, ZHU JS, ZHANG PJ. Study on determination and migration rule of phthalate esters plasticizers in food contact materials [J]. Journal of Shaanxi University of Science & Technology, 2022, 40(6): 49–54.

[21] 陈沙, 喻俊磊, 朱作为, 等. 食品接触材料塑料中 16 种多环芳烃的迁移规律[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(16): 105–109.
CHEN S, YU JL, ZHU ZW, *et al*. Study on migration law of 16 kinds of polycyclic aromatic hydrocarbons in food contact material plastic [J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(16): 105–109.

[22] DRAGAN VK, PETROVICS N, KIRCHKESZNER C, *et al*. The kinetics of swelling and migration: A case study of plasticized polylactic acid food contact plastics tested with ethanolic food simulants [J]. Express Polymer Letters, 2024, 18(4): 391–405.

[23] 葛丹阳, 刘桂华, 姜欢. 高效液相色谱法检测食品接触用硅橡胶制品中 2,4-二氯苯甲酸的迁移量[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(2): 435–442.
GE DY, LIU GH, JIANG H. Detection of the migration of 2,4-dichlorobenzoic acid in silicone rubber products for food contact by high performance liquid chromatography [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(2): 435–442.

[24] 孙仁悦, 金莉莉, 邹凯, 等. 可降解食品接触材料中三种新型增塑剂的迁移量检测方法及迁移规律研究[J]. 塑料科技, 2024, 52(8): 132–137.
SUN RY, JIN LL, ZOU K, *et al*. Study on the determination method and the migration rules of three new plasticizers in degradable food contact material [J]. Plastics Science and Technology, 2024, 52(8): 132–137.

[25] MUZEZA C, NGOLE-JEME V, MSAGATI TAM. The mechanisms of plastic food-packaging monomers' migration into food matrix and the implications on human health [J]. Foods, 2023, 12(18): 3364.

[26] 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.
LIN 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.

[27] 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.
WU ML, HUANG WQ, WU GL, *et al*. Determination of migrations of 5 acrylic compounds in food contact materials by ultra performance liquid chromatography and discussion of their migration rules [J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part B: Chemical Analysis), 2024, 60(9): 915–921.

[28] 曹瑜, 钟泽辉, 唐聪. 食品接触材料中有害物质迁移的研究进展[J]. 包装工程, 2023, 44(15): 112–121.
CAO Y, ZHONG ZH, TANG C. Research progress on the migration of harmful substances in food contact materials [J]. Packaging Engineering, 2023, 44(15): 112–121.

[29] 陈中碧, 郭盛, 张秀刚, 等. 聚乳酸耐热改性的研究进展[J]. 塑料科技, 2024, 52(6): 138–143.
CHEN ZB, GUO S, ZHANG XG, *et al*. Research progress on heat resistant modification of polylactic acid [J]. Plastics Science and Technology, 2024, 52(6): 138–143.

[30] 张丽媛, 韦存茜, 杨建平. 可降解塑料在食品相关产品方面的应用及质量安全要求[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(7): 2303–2308.
ZHANG LY, WEI CX, YANG JP. Application research of degradable materials for food contact products and related quality and safety requirements [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2020, 11(7): 2303–2308.

(责任编辑: 于梦娇 韩晓红)