DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251119009
引用格式: 张彭, 田艺, 于坤, 等. 紫外老化对聚乳酸植物纤维材料中有害物质迁移规律的影响研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(2): 3–9.
ZHANG P, TIAN Y, YU K, *et al*. Study on the effects of ultraviolet aging on the migration regularity of harmful substances in polylactic acid/plant fiber materials [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(2): 3–9. (in Chinese with English abstract).

紫外老化对聚乳酸植物纤维材料中有害物质迁移规律的影响研究

张 彭*, 田 艺, 于 坤, 杨 曦, 李童言
(河北省产品质量监督检验研究院, 石家庄 050000)

摘 要: 目的 研究紫外老化时间对植物纤维粉与聚乳酸(polylactic acid, PLA)复合食品接触材料中铅(Pb)、丙烯酰胺(acrylamide, AM)和 1,2-苯并异噻唑啉-3-酮(1,2-benzisothiazolin-3-one, BIT)迁移行为的影响规律, 并揭示其微观结构演变机制。**方法** 通过紫外加速老化实验模拟不同自然老化时长, 采用傅里叶变换红外光谱(Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)分析化学结构变化、扫描电子显微镜(scanning electron microscopy, SEM)观察材料表面形貌变化, 并利用电感耦合等离子体质谱法(inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS)和高效液相色谱法(high performance liquid chromatography, HPLC)分别定量测定在 4%乙酸和橄榄油食品模拟液中 Pb、AM 与 BIT 在不同迁移时间点(2 h 至 48 h)的迁移量。**结果** 长期紫外老化促进有害物质的迁移, 45 d 老化组 Pb、AM 和 BIT 的 48 h 迁移量分别增至 15.10、132.15 和 21.80 mg/kg, Pb 较 0 d 组增幅 46.7%, AM 增幅 56.1%, BIT 增幅 47.3%。SEM 显示材料表面产生微裂纹和孔洞, FTIR 表明 PLA 分子链发生光氧化断裂, 羰基和羟基峰增强。3 种物质迁移主要发生在前 24 h, 其迁移量占 48 h 迁移量比例均超过 60%。**结论** 建议添加紫外吸收剂或涂层提升材料的抗老化性能, 未采取抗紫外措施的材料, 根据老化实验的迁移量数据, 材料保质期建议不超过 240 d。

关键词: 聚乳酸; 植物纤维粉; 紫外老化; 迁移规律

Study on the effects of ultraviolet aging on the migration regularity of harmful substances in polylactic acid/plant fiber materials

ZHANG Peng*, TIAN Yi, YU Kun, YANG Xi, LI Tong-Yan
(*Hebei Institute of Product Quality Supervision and Inspection*, *Shijiazhuang* 050000, *China*)

ABSTRACT: Objective To investigate the effects regularity of ultraviolet aging duration on the migration behavior of lead (Pb), acrylamide (AM) and 1,2-benzisothiazolin-3-one (BIT) in polylactic acid (PLA)/plant fiber composite food contact material, and reveal their microstructural evolution mechanism. **Methods** Ultraviolet accelerated aging tests were conducted to simulate natural aging. The changes in chemical structure were analyzed by Fourier transform

收稿日期: 2025-11-19
基金项目: 国家市场监督管理总局科技计划项目(2023MK018)
第一作者/*通信作者: 张彭(1984—), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为食品包装材料检测与安全研究。E-mail: 18102889@qq.com

infrared spectroscopy (FTIR), and the surface morphology of the material was observed by scanning electron microscopy (SEM). Migration levels of Pb, AM, and BIT into 4% acetic acid and olive oil food simulants were quantitatively determined at different migration time points (2 h to 48 h) by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) and high performance liquid chromatography (HPLC), respectively. **Results** Long term ultraviolet aging promoted the migration of harmful substances. For the 45 d aging group, the 48 h migration amounts of Pb, AM and BIT increased to 15.10, 132.15 and 21.80 mg/kg, with increases of 46.7% (Pb), 56.1% (AM) and 47.3% (BIT) compared with the 0 d group. SEM observations showed that microcracks and pores formed on the material surface. FTIR analysis indicated photoxidative chain scission occurred in the PLA molecular chains, with the enhancement of carbonyl and hydroxyl peaks. Over 60% of the total 48 h migration for each substance occurred within the first 24 h. **Conclusion** It is recommended to add ultraviolet absorbers or coatings to improve the aging resistance of the material. For materials without anti-ultraviolet measures, based on the migration data of the aging experiment, the shelf life of the material is recommended to not exceed 240 d.

KEY WORDS: polylactic acid; plant fiber powder; ultraviolet aging; migration regularity

0 引 言

植物纤维因具有可再生、可生物降解、加工能耗低、加工适应性强和低细胞毒性被广泛用作聚合物的改性剂[1]或填料，在各个领域都有广泛的发展和应用[2−5]。聚乳酸(polylactic acid, PLA)是由淀粉糖化产生葡萄糖，发酵得到乳酸，通过缩聚反应合成脂肪族聚酯[6]，因其良好的降解性、生物相容性，是目前替代传统塑料的重要材料之一[7−9]；PLA/植物纤维复合材料不仅可改善二者的加工与物理性能，植物纤维的加入还可促进 PLA 的水传输和水解，从而改善其降解性能[10−11]。

紫外老化易导致此类材料中风险物质向食品迁移，直接关联材料使用性能和食品安全[12]。例如黄森林等[13]研究发现植物纤维-聚合物复合材料在老化初期由于光氧化质量下降，后期由于水分子在后续的氧化反应中进入裂缝使材料质量回升；邹婷等[14]发现了紫外照射影响对 PLA 黄麻复合材料的界面黏结性；SUN 等[15]的研究表明，紫外老化与机械磨损的协同作用会致使 PLA 等材料化学结构中的羰基等含氧官能团显著增加，为迁移提供了载体与通道；倪永标等[16]在植塑复合食品接触制品的迁移液中检测到金属元素、双酚 A 等超出相关标准限量；何金凤[17]的研究发现 PLA 因环境发生水解内部酯键断裂会导致金属元素的迁移量增加；BELBACHIR 等[18]利用傅里叶变换红外光谱(Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)研究了 PLA 挤出吹膜光降解过程中羰基波段(1700~1800 cm^{-1})显著变化。

本研究目标风险物质的选择基于风险筛查结果与实际应用需求：铅(Pb)与丙烯酰胺(acrylamide, AM)的确定源于项目组前期对该类产品的系统性风险筛查，Pb 和 AM 在该类产品中检出频率高、潜在健康风险显著；另外该类材料富含植物纤维成分，防霉性能测试结果表明，该材料的防霉性能未达到预期，实验过程中出现明显霉变现象，生产工艺中宜添加防霉剂以提高防霉性能，因此将 1,2-苯并异噻唑啉-3-酮(1,2-benzisothiazolin-3-one, BIT)确定为风险评价因子。

本研究以含 Pb、AM 及 BIT 组分的 PLA 植物纤维复合食品接触材料为对象，其中 AM 与 BIT 的添加量依据该类材料生产工艺常规添加量，Pb 含量参照风险筛查样品中的最高检出含量确定。通过紫外加速老化实验模拟材料自然老化过程，研究该类材料不同老化阶段下物质的迁移规律，并结合 FTIR、扫描电子显微镜(scanning electron microscopy, SEM)表征表面微观结构的变化与迁移行为的关系，为材料保质期预测及光稳定剂等助剂的添加提供理论判据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

秸秆粉(100 目，连云港苏锐秸秆加工厂)；PLA 颗粒(东莞东嘉锦塑胶原料有限公司)；乙酸(优级纯，国药集团化学试剂有限公司)；丙烯酰胺、1,2-苯并异噻唑啉-3-酮(优级纯)、乙醇(色谱纯)(上海阿拉丁生化科技股份有限公司)；乙酸铅(优级纯，天津市科密欧化学试剂有限公司)；溴化钾(光谱纯)、橄榄油(优级纯)(上海麦克林生化科技股份有限公司)；Pb 标准溶液、铋(Bi)标准溶液(质量浓度 1000 μg/mL，国家有色金属及电子材料分析测试中心)；丙烯酰胺标准物质(250 mg/支)、1,2-苯并异噻唑啉-3-酮(纯度≥99.8%)(上海安谱实验科技股份有限公司)。

1.2 仪器与设备

FA2204B 电子天平(精度 0.0001 g，上海精密科学仪器有限公司)；FZ102 粉碎机(中兴伟业仪器有限公司)；KL-2 开炼机(石家庄美思电线缆测试仪器有限公司)；DHG-9248A 鼓风干燥箱(石家庄鼎隆恒泰科技有限公司)；UV test 紫外老化箱(亚太拉斯材料测试技术有限公司)；

Nicolet iS50 傅里叶变换红外光谱仪(美国赛默飞世尔科技公司); Sigma500 扫描电子显微镜[卡尔蔡司光学(中国)有限公司]; Agilent 1100 高效液相色谱仪[安捷伦科技(中国)有限公司]; NexION350 电感耦合等离子质谱仪[珀金埃尔默企业管理(上海)有限公司]; TRIPLE QUAD 3500 高效液相色谱质谱联用仪(上海 SCIEX 爱博才思分析仪器贸易有限公司)。

1.3　实验方法

1.3.1　试样的制备

将 BIT(占混合料总质量 0.146%)、AM(占混合料总质量 1.46%)、醋酸铅(以 Pb 计占混合料总质量 0.002%)与部分 PLA 颗粒、秸秆粉等其他配料按比例精密称重后, 放入粉碎机中交替粉碎(粉碎 5 s, 冷却 10 s 为 1 个周期, 共 4 个周期); 然后使用高速剪切均质机混匀, 物料液化为浆状; 将剩余秸秆粉与上述浆料使用粉碎机进行粉碎后, 放置入广口容器, 多次搅拌进一步混匀; 最后加入剩余 PLA 颗粒, 置于热压机中, 在 200 ℃条件下加热 15~20 min, 完成预混; 经开炼机二次混炼, 最终压制成形。

1.3.2　迁移实验

根据 GB 5009.156—2016《食品安全国家标准 食品接触材料及制品迁移物预处理方法通则》、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》规定, 以 S/V=6 dm^2/kg(食品接触材料接触面积/食品模拟物体积)对样品进行全浸没迁移实验, 使用相应体积的 4%乙酸(体积分数)、橄榄油作为食品模拟液, 每个迁移实验进行 3 个平行, 同时做空白实验。分别在 60 ℃的迁移温度下进行 2~48 h 迁移实验, 测定食品模拟物中 Pb、AM 和 BIT 的迁移量。

1.3.3　迁移量计算

样品向食品模拟物的迁移量按式(1)计算。

$$x=\frac{(c_1-c_0)\times V}{S}\times\frac{S}{V\times\rho}=\frac{c_1-c_0}{\rho} \tag{1}$$

式中: x 为食品模拟物试样溶液中待测物质的迁移量, mg/kg; c_1 为食品模拟物试样溶液中待测物质的质量浓度, mg/L; c_0 为空白实验溶液中待测元素的质量浓度, mg/L; V 为食品模拟物的体积, L; S 为样品与食品模拟物的接触面积, dm^2; ρ 为食品模拟物的密度, 按照 1 kg/L 计。

1.3.4　紫外加速老化实验设计

以 GB/T 16422.3—2022《塑料 实验室光源暴露试验方法 第 3 部分: 荧光紫外灯》7.3 参照暴露循环实验条件 1, 采用 UVA-340(1A 型)灯型, 设置 8 h 干燥(340 nm 处 0.76 W/m^2 • nm, 黑板温度 60 ℃±3 ℃)与 4 h 凝露(关闭紫外灯, 黑板温度 50 ℃±3 ℃)交替循环程序。紫外加速老化实验的加速因子(acceleration factor, AF)是实验条件老化的速率与自然条件下老化速率的比值, 量化需综合经验数据、实验室标准及材料特性综合考量, 本研究的实验目的为耐久性评估, 选择较低的加速因子(AF=8), 自然老化实验相当于 8 倍的实验室老化时间。实验设计 0、15、30、45 d 紫外老化实验组(以下简称 0 d 组、15 d 组、30 d 组、45 d 组), 相当于未老化、120、240 和 360 d 自然老化时间。

1.3.5　扫描电子显微镜检测

将不同老化组的样片固定于铜制样品台, 喷镀 40 nm 金膜, 加速电压 5 kV, 采用扫描电子显微镜放大不同倍数进行拍摄。

1.3.6　傅里叶变换红外光谱仪扫描检测

刮取不同老化组的样片表面碎屑, 与溴化钾混合研磨后压片, 使用 FTIR 测试分析。

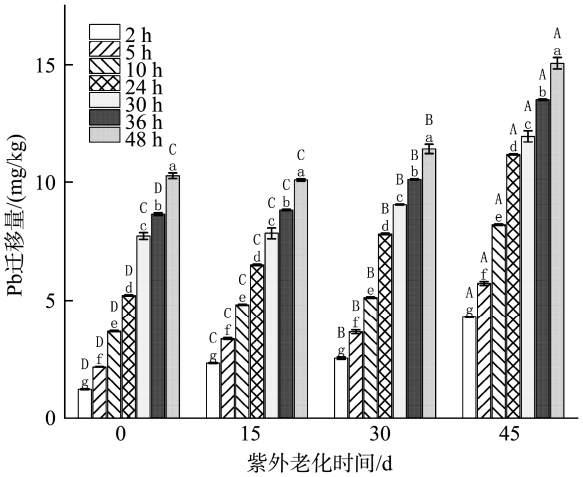
1.4　数据处理

数据处理采用 Microsoft Excel 2019 软件, 迁移量数据以 3 次独立实验的平均值±标准偏差表示; 使用 IBM SPSS Statistics 26 进行单因素方差分析, 平均值差值的显著性水平设定为 0.05, 采用 Origin 2024 软件对实验数据结果作图。

2　结果与分析

2.1　Pb 迁移量与老化时间的相关性

如图 1 所示, 在老化初期(0~30 d), Pb 迁移量随老化时间延长呈缓慢上升趋势, 同一迁移时间下不同老化组存在显著差异, 说明该阶段紫外老化对材料的改变对 Pb 的迁移产生促进作用。2 h 迁移量: 0 d 组为(1.22±0.02) mg/kg, 30 d 组增至(2.53±0.05) mg/kg, 增幅为 107%。老化至 45 d 时, Pb 迁移量出现显著增长, 2 h 迁移量达(4.28±0.03) mg/kg, 较 0 d 组增长 249%。这一增长趋势在较长时间的迁移中更为突出: 48 h 迁移量达(15.10±0.20) mg/kg, 与 0 d 未老化组相比增幅 46.7%。



注: 不同大写字母表示不同老化时间的同一迁移时间组间具有显著差异(P<0.05), 不同小写字母表示同一老化时间的不同迁移时间组间具有显著差异(P<0.05), 图 2~3 同。

图 1　不同迁移时间下 Pb 迁移量随老化时间的变化

Fig.1　Changes of Pb migration with aging time under different migration time

24 h 迁移量 0 d 组为[(5.77±0.01) mg/kg, 15 d 组增至(6.52±0.03) mg/kg, 45 d 组跃升至(11.22±0.03) mg/kg, 较 0 d 组增幅 115.4%; 该组 24 h 迁移量占 48 h 迁移量的 74.5%, 表明材料中 Pb 的迁移量集中在 24 h 前。

迁移量的显著提升表明, 45 d 紫外老化导致材料发生结构性改变, 可能由于 PLA 分子链发生光氧化断裂并生成可溶性小分子碎片, 植物纤维与 PLA 基体间界面结合失效形成迁移通道, 材料表面及内部微裂纹发生扩展贯通。此现象与 LIU 等[19]关于紫外辐射加速聚合物结构降解并促进有害物质释放的研究结论相符。

2.2 AM 迁移量与老化时间的相关性

如图 2 所示, 紫外老化对 AM 迁移行为的影响呈现阶段性特征, 0~30 d 组组间显著性差异明显, 15 d、30 d 组 24 h 迁移量(40.99 mg/kg、47.26 mg/kg)均低于 0 d 组同期, 表明此老化阶段内紫外辐射对材料结构的改变抑制了 AM 的迁移; 45 d 组 AM 迁移量明显增加, 48 h 迁移量[(132.15±4.07) mg/kg]较 0 d 增幅 56.1%, 其中 24 h 迁移量[(83.25±2.46) mg/kg], 较 0 d 组[(55.29±0.03) mg/kg]显著提升, 占其 48 h 迁移量的 61.1%, 推断老化超过 30 d 后, 材料老化与迁移时间产生协同效应, 显著加速了 AM 在前 24 h 内的释放。

另外, 与 Pb 迁移规律不同的是, 在老化初期(15 d), AM 的迁移量低于未老化组, 这可能与老化初期材料发生的复杂物理结构变化和化学组分变化有关。

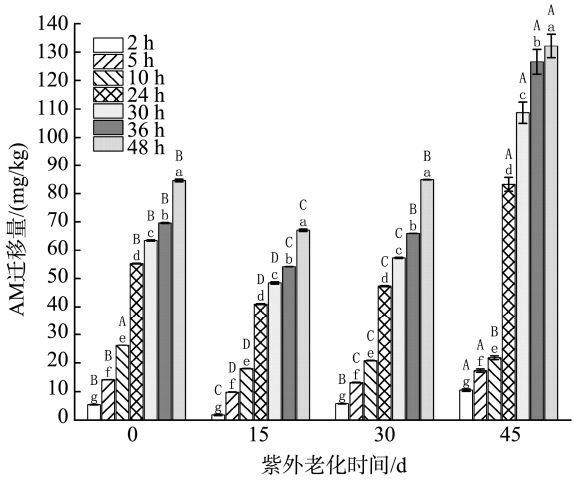


图 2 不同迁移时间下 AM 迁移量随老化时间的变化

Fig.2 Changes of AM migration with aging time under different migration time

2.3 BIT 迁移量与老化时间的相关性

由图 3 可知, 0~30 d 老化期间, BIT 迁移量波动小, 但同一迁移时间下不同老化组的迁移量存在显著差异, 同时 2 h 迁移量的相对标准偏差(relative standard deviation, RSD)从 0 d 的 0.39%升至 30 d 的 1.58%, 说明材料结构复杂性增加。45 d 组迁移量显著增加[48 h: (21.80±0.20) mg/kg, 较 0 d 组增加 47.3%], 同时数据波动加剧[36 h: (19.70±1.40) mg/kg]。可能与长期老化引发的结构贯通性破裂相关, 说明紫外辐照显著促进了材料的降解和碎片化, 增加了溶出有机物的迁移[16]。另外, BIT 的迁移也集中于前 24 h, 0~30 d 组 24 h 后的迁移量增加不显著, 15 d 组、30 d 组、45 d 组 24 h 迁移量占 48 h 总量比例分别为 62.3%、63.1%、64.5%; 45 d 组 2、5、10 h 的迁移量与 0 d 组同期无显著差异, 且高于 15、30 d 组同期水平, 但与同期其他组比整体未呈现跃升趋势, 24 h 后, 45 d 组迁移量显著增加, 进一步证明紫外老化导致材料表面结构复杂性增加。

与 0 d 组相比, 15 d、30 d 组 BIT 的迁移量略下降, 这与 AM 迁移量观察到的特征具有一定相似性。45 d 组组内迁移量差异显著, 说明 45 d 紫外老化使材料结构发生显著劣化。根据 3 类风险物质的迁移规律推断该类材料的保质期为 30 d×老化因子(8)=240 d。

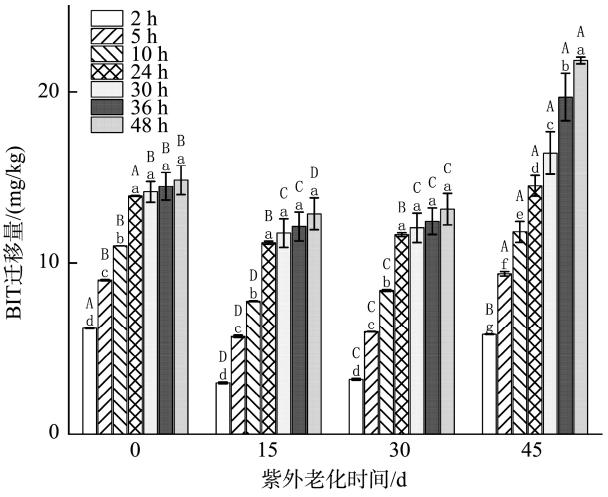


图 3 不同迁移时间下 BIT 迁移量随老化时间的变化

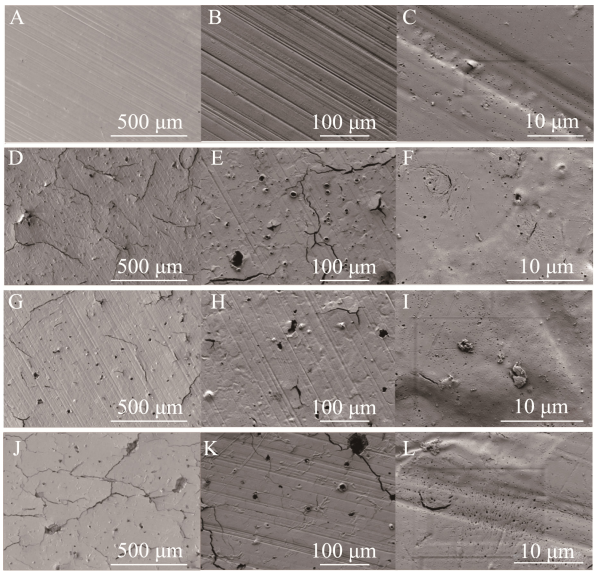
Fig.3 Changes of BIT migration with aging time under different migration time

2.4 扫描电子显微镜分析

图 4 展示了 0 d 组、15 d 组、30 d 组、45 d 组的 SEM 图像。在未老化组(图 4A~C)中, PLA 基体对秸秆颗粒包覆完整, 界面相对平滑致密, 仅局部分布微小凹陷孔隙, 可能源于加工缺陷。这种致密结构可有效阻滞物质扩散, 印证老化实验早期的低迁移率; 15 d 组老化样品(图 4D~F), 材料表面出现网状微裂纹及少量孔洞; 30 d 老化样品(图 4G~I)裂纹扩展为树枝状分支, 表面结构复杂性直接导致迁移过程波动性加剧; 45 d 老化样品(图 4J~L)裂纹宽度增加, 表面孔洞增加, 材料的局部结构破坏可能是 3 组物质在 45 d 组迁移量加剧的直接因素。

随着紫外老化时间的延长, 可以看出材料的表面结构被显著破坏, 不但导致迁移量增加, 还可能导致材料力学性能的退化, 有研究发现随着紫外线暴露时间的延长, PLA 颗粒的表面结构逐渐退化, 导致其粒径变小, 内部裂解并产生更多细小颗粒[20–21], 与本研究观察到的材料裂纹

扩展、孔洞增多现象一致，进一步证明了紫外老化过程中的表面破坏和颗粒降解现象。



注: A~C. 0 d 分别放大倍数为 100、500、5000; D~F. 15 d 分别放大倍数为 100、500、5000; G~I. 30 d 分别放大倍数为 100、500、5000; J~L. 45 d 分别放大倍数为 100、500、5000。

图 4　紫外老化 0、15、30、45 d 组样品的 SEM 图

Fig.4　SEM images of samples after ultraviolet aging for 0, 15, 30 and 45 d

2.5　傅里叶变换红外光谱分析

图 5 的 FTIR 光谱展示了 PLA-秸秆复合材料在紫外老化过程中的化学结构改变。其中 3300~3500 cm^{-1} 处羟基峰宽增加，源于 PLA 酯键光水解生成的醇端基(-OH)与羧酸(-COOH)的叠加振动，加速水分子渗透；2997.54 cm^{-1} 和 2946.08 cm^{-1} 为 PLA 的 C-H 的不对称和对称伸缩振动峰(分别对应-CH_3、-CH_2-)[22]；PLA 光降解产物，如氢过氧化物、羰基和乙烯基，在 FTIR 光谱中出现在羰基区(1750.03 cm^{-1})，由于 PLA 光氧化生成羧酸和二酮端基[23]，与植物纤维发生氧化产生的羰基峰重叠[24]，1750.03 cm^{-1} 处羰基区峰随紫外老化时间持续增强，表明 PLA 的光氧化程度加剧[10]；上述降解过程中的主要化学变化路径如图 6 所示，其清晰地展示了 PLA 分子链在紫外辐射下发生断链、生成含氧官能团的过程。以上现象与 LOMAKIN 等[25]关于 PLA 光降解过程中分子链断裂与自由基重组的研究结论相互印证，已有研究表明，紫外老化过程中 C-H 键断裂并诱发氧化反应，会伴随材料表面变色、脆化与裂纹产生[26]，与实际观察到的现象和电镜观察的结果一致。

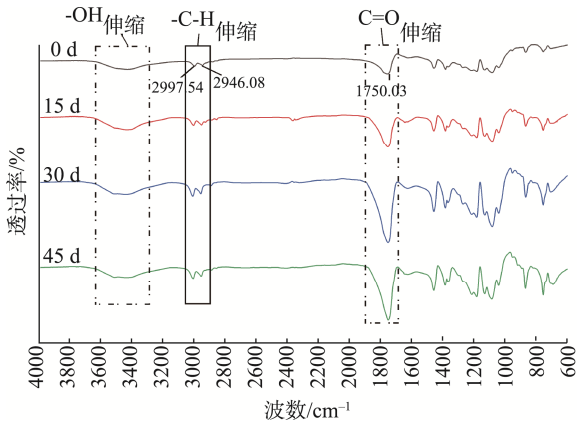
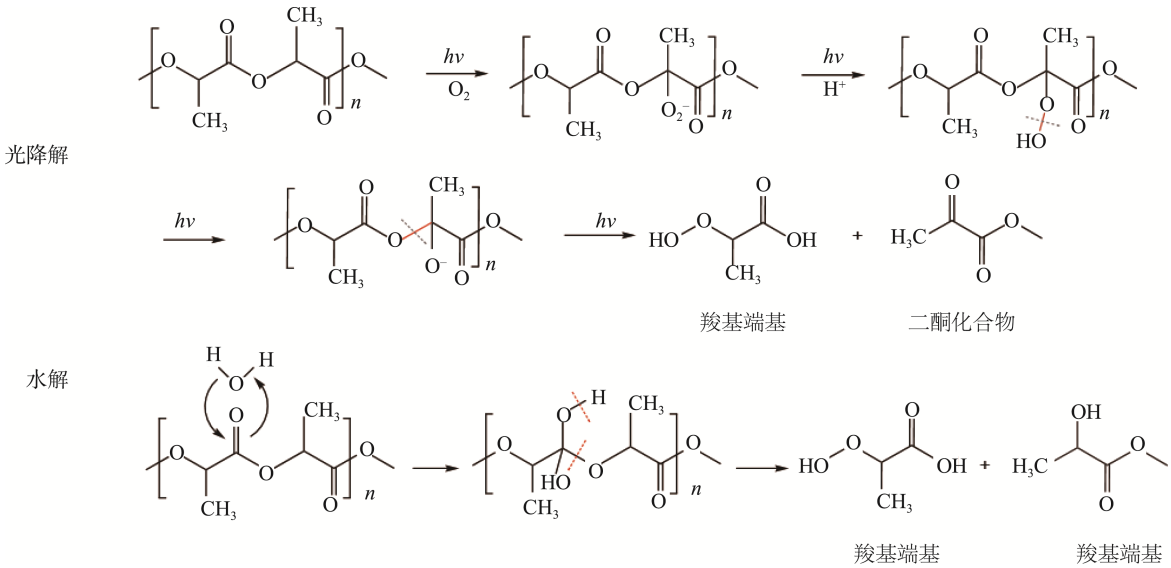


图 5　样品在紫外老化 0、15、30 和 45 d 后的 FTIR 光谱图

Fig.5　FTIR spectra of samples after ultraviolet aging for 0, 15, 30 and 45 d



注: *hv* 表示紫外老化过程。

图 6　PLA 光降解和水解机制示意图

Fig.6　Schematic diagram of PLA photodegradation and hydrolysis mechanism

3 结 论

本研究揭示了紫外老化对 PLA 植物纤维复合材料中 Pb、AM、BIT 迁移行为的影响及机制，结合迁移实验、SEM 表征与 FTIR 分析结果，得出以下结论：(1) 0~30 d 紫外老化通过改变材料结构对迁移行为产生显著影响，其中 Pb 迁移量随老化时间缓慢上升(30 d 组 2 h 迁移量较 0 d 组增幅 107%)，呈促进效应；而 AM、BIT 迁移量在该阶段低于 0 d 组，呈抑制效应；45 d 老化组 3 类物质迁移量均出现显著增长，其中 45 d 老化组 Pb、AM 和 BIT 的 48 h 迁移量分别增至 15.10、132.15 和 21.80 mg/kg，Pb 较 0 d 组增幅 46.7%，AM 增幅 56.1%，BIT 增幅 47.3%，表明长期紫外老化导致材料结构质变，显著增加迁移量；(2)各老化组材料 Pb、AM、BIT 的迁移量集中在 24 h 前，45 d 组 24 h 迁移量占 48 h 总量比例分别为 74.5%、61.1%、64.5%，表明控制材料风险物质的迁移量关键在于控制前 24 h 的迁移过程；(3)紫外老化通过引发 PLA 光氧化，导致有机与无机迁移物显著释放，建议添加紫外吸收剂以延缓材料的光老化进程以确保材料的食品安全性；(4)该材料在 30 d 加速老化周期内使用的稳定性得到验证，基于本研究老化因子 8 进行计算，建议未添加稳定助剂的该类材料保质期不超过 240 d，而通过添加助剂[27–29]对材料进行改性[30–31]可有效延缓其紫外老化速率，从而有望延长产品的安全使用寿命；(5)本研究的 Pb、AM、BIT 的典型风险物质，无法涵盖材料中所有风险组分，后续研究应进一步拓展风险物质关注的范围，尤其是需针对性能改进所添加的紫外吸收剂或涂层等助剂的迁移。

参考文献

[1] PARAMESWARANPILLAI J, GOPI JA, RADOOR S, *et al*. Turning waste plant fibers into advanced plant fiber reinforced polymer composites: A comprehensive review [J]. Composites Part C: Open Access, 2023, 10(2): 100333.

[2] LIAO Z, HU Y, SHEN Y, *et al*. Investigation into the reinforcement modification of natural plant fibers and the sustainable development of thermoplastic natural plant fiber composites [J]. Polymers, 2024, 16(24): 3568.

[3] 李美慧, 韦朝会, 雷文. 国内有关植物纤维/聚乳酸复合材料在3D打印领域应用的研究[J]. 化工设计通讯, 2024, 50(8): 123–125.
LI MH, WEI CH, LEI W. Research on the application of plant fiber/polylactic acid composite materials in 3D printing in China [J]. Chemical Engineering Design Communications, 2024, 50(8): 123–125.

[4] 李羽佳, 王喜明, 姚利宏, 等. 功能型植物纤维增强聚乳酸复合材料研究进展[J]. 塑料, 2024, 53(3): 104–108.
LI YJ, WANG XM, YAO LH, *et al*. Research progress of functional plant fiber reinforced polylactic acid composite [J]. Plastics, 2024, 53(3): 104–108.

[5] 张莉, 梁多平, 侯理达. 植物纤维/聚乳酸复合材料的研究进展[J]. 塑料工业, 2023, 51(S1): 22–28.
ZHANG L, LIANG DP, HOU LD. Research progress of functional plant fiber reinforced polylactic acid composite [J]. China Plastics Industry, 2023, 51(S1): 22–28.

[6] MILOVANOVIC S, PAJNIK J, LUKIC I. Tailoring of advanced poly(lactic acid)-based materials: A review [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2022, 139(21): 51839.

[7] SHI K, LIU G, SUN H, *et al*. Polylactic acid/lignin composites: A review [J]. Polymers, 2023, 15(13): 2807.

[8] YANG F, ZHU S, WEN C, *et al*. Sustainable recycling of plant fiber/poly(lactic acid) composites: Insights into matrix degradation and fiber recycling [J]. Sustainable Materials and Technologies, 2025, 45: e01475.

[9] 肖梦兰, 彭钟海, 谢冰和, 等. 聚乳酸材料的阻气性能研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(24): 153–160.
XIAO ML, PENG ZH, XIE BH, *et al*. Research progress on gas barrier properties of polylactic acid material [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(24): 153–160.

[10] MOMENI S, CRAPLEWE K, SAFDER M, *et al*. Accelerating the biodegradation of poly(lactic acid) through the inclusion of plant fibers: A review of recent advances [J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2023, 11(42): 15146–15170.

[11] RAHMAN AM, HAQUE S, MANOKAR AM, *et al*. A review of environmental friendly green composites: Production methods, current progresses, and challenges [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30: 16905–16929.

[12] 杨欣, 隋玲, 候新彤, 等. 塑料食品包装中受限物质检测研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(14): 20–30.
YANG X, SUI L, HOU XT, *et al*. Research progress in the detection of restricted substances in plastic food packaging [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(14): 20–30.

[13] 黄森林, 方海, 霍瑞丽, 等. 五种植物纤维/聚乙烯木塑复合材料紫外老化性能[J]. 复合材料科学与工程, 2024(12): 26–33.
HUANG ML, FANG H, HUO RL, *et al*. UV aging properties of five types of plant fiber/polyethylene wood-plastic composites [J]. Composites Science and Engineering, 2024(12): 26–33.

[14] 邹婷, 宋雪旸, 王萍. PLA/黄麻层压复合材料的紫外老化性能[J]. 武汉纺织大学学报, 2022, 35(4): 35–40.
ZOU T, SONG XY, WANG P. UV aging properties of PLA/jute laminated composites [J]. Journal of Wuhan Textile University, 2022, 35(4): 35–40.

[15] SUN JX, WANG X, ZHENG HY, *et al*. Characterization of the degradation products of biodegradable and traditional plastics on UV irradiation and mechanical abrasion [J]. Science of the Total Environment, 2024, 909: 168618.

[16] 倪永标, 孙姗姗, 许力, 等. 植塑复合类食品接触制品中化学污染物迁移的检测和评估[J]. 塑料科技, 2025, 53(7): 131–136.
NI YB, SUN SS, XU L, *et al*. Detection and assessment of chemical contaminant migration in plant-plastic composite food contact materials [J]. Plastics Science and Technology, 2025, 53(7): 131–136.

[17] 何金凤. 聚乳酸包装材料中添加剂的迁移研究及安全评估[D]. 广州: 暨南大学, 2019.
HE JF. Study on the migration and safety assessment of additives in polylactic acid packaging materials [D]. Guangzhou: Jinan University, 2019.

[18] BELBACHIR S, ZAÏRI F, AYOUB G, *et al*. Modelling of photodegradation effect on elastic–viscoplastic behaviour of amorphous polylactic acid films [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2010, 58(2): 241–255.

[19] LIU H, ZHANG X, JI B, *et al*. UV aging of microplastic polymers promotes their chemical transformation and byproduct formation upon chlorination [J]. Science of the Total Environment, 2023, 858(1): 159842.

[20] WANG X, CHEN J, JIA W, *et al*. Comparing the aging processes of PLA and PE: The impact of UV irradiation and water [J]. Processes, 2024, 12(4): 635.

[21] NASRI K, TOUBAL L. Experimental and numerical investigation of damage and mechanical property retention by bio-composite plastic made with flax or pinewood fiber and aged by exposure to ultraviolet light [J]. Journal of Building Engineering, 2023, 79: 107899.

[22] MALINOWSKI R, MORACZEWSKI K, RASZKOWSKA-KACZOR A. Studies on the uncross linked fraction of PLA/PBAT blends modified by electron radiation [J]. Materials, 2020, 13(5): 1068.

[23] GONZÁLEZ-LÓPEZ ME, DEL CA, ROBLEDO-ORTÍZ JR, *et al*. Accelerated weathering of poly(lactic acid) and its biocomposites: A review [J]. Polymer Degradation and Stability, 2020, 179: 109290.

[24] GOMES RS, FERNANDES AN, WALDMAN WR. How to measure polymer degradation? An analysis of authors' choices when calculating the carbonyl index [J]. Environmental Science & Technology, 2024, 58(17): 7609–7616.

[25] LOMAKIN S, MIKHEEV Y, USACHEV S, *et al*. Evaluation and modeling of PLA photodegradation under UV irradiation: Bio-based polyester photolysis mechanism [Z]. Preprints, 2024.

[26] MAO R, LANG M, YU X, *et al*. Aging mechanism of microplastics with UV irradiation and its effects on the adsorption of heavy metals [J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 393(2): 122515.

[27] LI B, ZHU XY, XU CQ, *et al*. Sustainable strategy for lignin etherification and its promotion of anti-UV aging PLA biocomposite [J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 500: 156746.

[28] 黄思淼, 李晓玉, 吴新宇, 等. 木质素及其复合抗紫外屏蔽材料的研究进展[J]. 材料导报, 2025, 39(17): 236–244.
HUANG SM, LI XY, WU XY, *et al*. Research progress on UV resistance of lignin and its composite materials [J]. Materials Reports, 2025, 39(17): 236–244.

[29] ZHANG XL, MA XY, LI X, *et al*. Comparative study on properties of different fibers (unmodified/modified) reinforced polylactic acid degradable composites under ultraviolet aging conditions [Z]. Polymer Composites, 2025.

[30] 李亚丽. 改性纤维素/淀粉对 PBAT 耐紫外光老化性能的影响研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2025.
LI YL. Study on the effect of modified cellulose/starch on the UV aging resistance of PBAT [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2025.

[31] WANG J, ZHANG YT, ZHENG YX, *et al*. A green way to simultaneously enhance the mechanical, flame retardant and anti-ultraviolet aging properties of polylactide composites by the incorporation of tannic acid derivatives [J]. Polymer Degradation and Stability, 2022, 196: 109831.

(责任编辑: 于梦娇　韩晓红)