

基于包装安全的植物乳杆菌 121 对重金属铅吸附作用

doi:10.20269/j.cnki.1674-7100.2025.0013

李璐博 李 涛 孙翱魁

湖南工业大学

材料科学与工程学院

湖南 株洲 412007

摘 要: 包装材料中的重金属会迁移至食品和环境, 对环境以及人体健康产生危害。为了解决这一问题, 从保健食品和发酵酸乳中分离实验菌株, 包括双歧杆菌、植物乳杆菌 (*Lactobacillus plantarum*)、嗜酸乳杆菌和肠膜明串珠菌等, 主要用于重金属的吸附实验。从多种实验菌株中筛选出植物乳杆菌 121, 该菌株对重金属的吸附效果较优。通过对植物乳杆菌 121 生长曲线进行测定, 确定了植物乳杆菌 121 在生长 4~6 h 时处于对数期, 并收集处于对数期的菌体细胞进行实验。分别通过高温杀菌法和巴氏杀菌法灭活植物乳杆菌 121, 与未经灭活的植物乳杆菌 121 进行比较。结果表明, 未经灭活的植物乳杆菌 121 对铅的去除效果最好。该菌株对重金属的吸附行为在绿色包装和环境治理领域具有一定前景。

关键词: 植物乳杆菌 121; 巴氏杀菌; 高温杀菌; 重金属; 吸附作用

中图分类号: TS207.5⁺1

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2025)04-0041-07

引文格式: 李璐博, 李 涛, 孙翱魁. 基于包装安全的植物乳杆菌 121 对重金属铅吸附作用 [J]. 包装学报, 2025, 17(4): 41-47.

1 研究背景

包装材料在现代日常生活中无处不在, 它们不仅在食品^[1]、饮料^[2]、药品^[3]、化妆品^[4]等产品的保护、储存和运输中发挥着至关重要的作用, 还在促进商品流通、提高商品质量和延长保质期等方面起到了积极作用^[5]。尽管包装材料种类繁多、应用广泛, 但其潜在风险不容忽视。例如, 常见的塑料制品、纸质包装盒外层的油墨涂层以及部分金属包装容器, 在生产制造过程中常被添加汞 (Hg)、镉 (Cd)、铬 (Cr) 和铅 (Pb) 等重金属成分^[6]。这些重金属在包装材料中并非稳定存在, 随着时间推移, 在多种外界因素作用下极易迁移。包装材料废弃后, 会经受风吹日晒、雨水冲刷及垃圾填埋场复杂环境的考验; 在回收处理

过程中, 各类物理和化学作用也会加速重金属从包装材料中迁移, 进而污染周边环境^[7]。研究表明, 全球每年因包装废弃物导致的重金属污染土壤面积达数百万公顷, 重金属通过土壤-植物-人体的食物链, 对生态系统和人体健康构成潜在威胁^[8-10]。

铅、镉、铬等重金属因其化学性质稳定, 难以自然降解, 且具有高毒性和生物富集性。这些重金属的迁移扩散对环境构成巨大威胁: 渗透入土壤后会破坏土壤结构, 致使土壤肥力下降; 污染水体时, 则会严重影响水生生态系统的稳定性。人体若过量摄入镉、铅等非必需重金属, 易引发基因突变, 进而可能导致胎儿畸形、癌症等严重后果^[11, 12]。譬如, 铅会损害大脑神经细胞, 可能导致记忆力减退, 甚至造成脑组织器质性损伤^[13]; 镉可诱导 DNA 低甲基化并进一步

收稿日期: 2025-01-09

基金项目: 湖南省自然科学基金区域联合基金资助项目 (2025JJ70037)

作者简介: 李璐博, 女, 硕士生, 主要研究方向为水系锌离子电池, E-mail: lilubo0626@163.com

通信作者: 孙翱魁, 男, 副教授, 博士, 主要从事储能材料与器件研究, E-mail: aksun@hut.edu.cn

促进异常 Sprague-Dawley 大鼠和人肝癌细胞中的应激反应^[14, 15]；铜则会参与致癌 BRAF 信号的传导^[16]。过量摄入重金属离子会损伤细胞器结构或功能，诱发氧化应激反应，进而引发多种疾病，如威尔逊病、阿尔茨海默病及癌症等^[17-20]。因此，实现体内重金属的高效清除，是保障公众健康的重要技术挑战。目前，常见的治理措施包括物理方法、物理化学方法、电化学法和提取法^[21]，这几种方法虽然见效快，但是如果使用不当易造成二次污染，治标不治本，且重金属存在形式多样，而这些方法过于局限^[22, 23]。

在自然环境中，微生物可以实现对重金属离子的吸附和价态转化^[24]。由于其高效、低成本和环保等突出优点，该研究方向已经吸引了相关领域专家和学者们的关注。为了适应重金属环境，一些微生物经过快速突变和进化，已经能对重金属产生抗性作用并被用于修复环境介质中的重金属污染。但是，微生物抗性系统与它们对重金属离子的吸附机制仍有待进一步研究。本文通过多金属离子竞争吸附实验和不同环境因子影响实验，深入探讨了植物乳杆菌 121 对重金属离子的吸附行为。

2 实验部分

2.1 材料与试剂

主要菌株有：植物乳杆菌 (*Lactobacillus plantarum*) 121，泡菜中分离得到；双歧杆菌 (*Bifidobacterium*)、大肠杆菌 (*Escherichia coli*)、枯草芽孢杆菌 (*Bacillus subtilis*) 以及商业化嗜酸乳杆菌 NCFM (*Lactobacillus acidophilus*)，丹尼斯克 (Danisco) (中国) 有限公司。

此外，实验还用到以下试剂和溶液：氯化钠 (NaCl)，纯度为 99.5% (下同)；氢氧化钠 (NaOH)，99%；硫酸铜 (CuSO_4)，99%；水合硫酸铝 ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$)，98%；氯化铜 (CuCl_2)，98%；以上试剂均从上海麦克林生化科技股份有限公司购买。硝酸 (HNO_3)，CP；硝酸铅 ($\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$)，AR；三氯化铁 (FeCl_3)，97%；重铬酸钾 ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$)，GR；无水氯化钙 (CaCl_2)，CP；以上试剂均从南京试剂有限公司购买。铅标准溶液，100 g/ml；MRS 培养基 (蛋白胨 10.0 g，牛肉膏 10.0 g，酵母膏 5.0 g，葡萄糖 20.0 g，无水乙酸钠 ($\text{C}_2\text{H}_3\text{NaO}_2$) 5.0 g，柠檬酸氢二胺 ($\text{C}_6\text{H}_{14}\text{N}_2\text{O}_7$) 2.0 g，吐温 80 1.0 g，磷酸氢二钾 (K_2HPO_4) 2.0 g，七水合硫酸镁 ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)

0.58 g，水合硫酸锰 ($\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) 0.25 g，琼脂 20.0 g，蒸馏水 1000.0 mL)；以上原料均从康朗生物有限公司购买。

2.2 实验器材

主要仪器有：恒温箱，DHG-9140A，上海申安医疗器械厂；恒温振荡摇瓶柜，HYG-A，苏州培英实验设备有限公司；紫外分光光度计，岛津 UV2600，日本株式会社日立公司；真空冷冻干燥机，MCFD，美国金西盟国际集团；高压蒸汽灭菌锅，LDZX-50KBS，上海申安医疗器械厂；火焰原子吸收光谱仪，AA700，美国珀金埃尔默股份有限公司；冷冻离心机，5425R，艾本德中国有限公司；超净工作台，SWCJ2D，苏州净化设备有限公司；扫描电子显微镜，S-3400N，日本株式会社日立公司。

2.3 实验方法

2.3.1 菌株的培养、筛选及收集

取出真空冷冻菌粉，分别接种至 10 mL 的 MRS 液体培养基中，37 °C 恒温培养 24 h 后，传代 2~3 次，使菌株恢复活力。将菌液按照 1% 接种量接入 100 mL 的 MRS 液体培养基中扩大培养 18~24 h，取菌体培养液，离心 15 min (6000 r/min, 4 °C)，去除上清液后得到菌株。用无菌生理盐水洗涤两次后重悬，调整菌株在 600 nm 波长下的吸光度 $OD_{600}=0.8$ (菌体细胞数量级约为 10^9)，在 4 °C 下保存以备使用。

2.3.2 形态鉴别

在 MRS 固体培养基上，挑出单个菌落涂到载玻片上并进行固定。首先用草酸铵结晶紫染 1 min，随后用蒸馏水冲洗。加碘液覆盖涂面染色 50~70 s 后水洗。用吸水纸吸去水分，轻摇并缓慢滴加 95% 酒精至脱色。20 s 后水洗，吸去水分，并用番红染色液染色 1 min，随后用蒸馏水冲洗。干燥后进行镜检。

2.3.3 重金属抗性

配制含有硝酸铅、硫酸铜、硫酸铝、三氯化铁、重铬酸钾 5 种重金属的 MRS 固体培养基。将处于对数期的植物乳杆菌 121 涂布到平板上，每 6 h 观察一次并记录结果，持续至 78 h 时观察到单菌落，选取单菌落进行简单染色，在光学显微镜下观察。

2.3.4 菌株对铅离子的吸附能力

取 7 mL 菌液离心 15 min (6000 r/min, 4 °C) 后去除上清液，菌泥用无菌生理盐水洗涤两次后重悬。随后分别配制 40, 60, 80, 100, 200 $\mu\text{g/L}$ 的铅离子 (Pb^{2+}) 溶液，并向菌体中加入不同浓度的 Pb^{2+} 溶液，

同时设置空白组和对照组。将该混合液于恒温摇床 (80 r/min, 37 ℃) 下培养 2 h, 离心 15 min (6000 r/min, 4 ℃) 后将菌体和菌液进行分离, 利用火焰原子吸收光谱仪测定菌液中铅离子浓度。按照式 (1) 计算出菌体对于重金属的吸附率 (y)。

$$y = \frac{C - C_0}{C} \times 100\%, \quad (1)$$

式中: C 为初始重金属的质量浓度, mg/L; C_0 为吸附后重金属的质量浓度, mg/L。

重复相同的实验步骤, 制备不同 pH 值、不同菌体活力及含有其他阳离子的实验组, 其中 $c_{Ca^{2+}}=2.50$ mmol/L, $c_{Na^{2+}}=140.00$ mmol/L, $c_{K^{+}}=4.25$ mmol/L, $c_{Mg^{2+}}=1.00$ mmol/L。

对菌株吸附动力学按准一级模型 (Pseudo-First-Order Model, 式 (2)) 和准二级模型 (Pseudo-Second-Order Model, 式 (3)) 进行模拟。

$$q_t = q_e - q_e \exp(-k_1 t), \quad (2)$$

$$\frac{t}{-q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e}, \quad (3)$$

式中: t 为时间, h; q_t 为 t 时刻的吸附量, mg/g; q_e 为平衡时的吸附量, mg/g; k_1 为准一级吸附速率常数, 1/h; k_2 为准二级吸附速率常数, g/(mg·h)。

2.3.5 生长曲线绘制

取少量经真空冷冻干燥的植物乳杆菌 121 菌粉, 接种至 10 mL 的 MRS 培养基中, 在 37 ℃ 下培养 2 h。随后按照 1% 的植物乳杆菌 121 接种量, 分别将其接种至 100 mL 的 MRS 液体培养基中, 在 37 ℃ 下恒温培养。每隔 1 h 取出一瓶恒温培养后的培养基, 在超净工作台上取 3 mL 的菌液放入石英比色皿中, 以未接菌种的培养基作为空白对照。使用紫外分光光度计测定其在 600 nm 波长下的吸光度。重复上述步骤, 直至恒温培养时间为 16 h。

2.3.6 数据处理

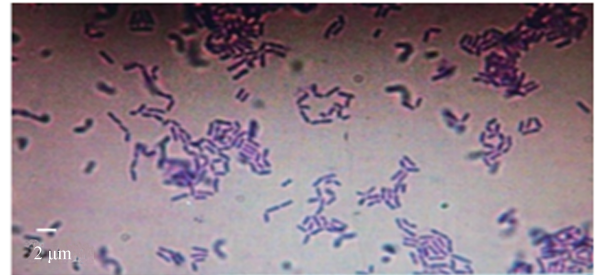
误差分析处理采用平均值和标准差表示, 利用 Origin 和 SPSS Statistics 22 软件对数据进行统计分析^[21]。

3 结果与分析

3.1 形态分析

图 1 为不同条件下植物乳杆菌 121 的形态。通过三区涂片方法 (以大肠杆菌与枯草芽孢杆菌作为对照组) 进行革兰氏染色, 使用光学显微镜观察, 可以观察到植物乳杆菌 121 呈杆状和棒状 (见图 1a)。

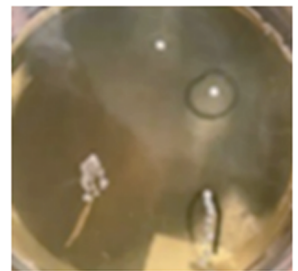
将植物乳杆菌 121 涂布在含有多种重金属的固体培养基上, 培养 78 h 后长出菌落。分别取 MRS 固体培养基 (见图 1b) 和含多种重金属的 MRS 固体培养基 (见图 1c) 上的单菌落进行简单染色, 并对比观察。在图 1d 中可以发现未吸附重金属的植物乳杆菌 121 的微观形貌为杆状或棒状。当重金属吸附在植物乳杆菌 121 表面时, 菌体的形态发生改变, 并发出淡绿色的金属光泽 (见图 1e)。结果表明, 植物乳杆菌 121 对重金属有很强的耐受性和吸附性。



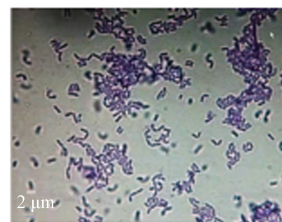
a) 革兰氏染色后菌体形态



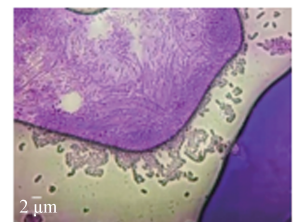
b) MRS 培养基 (不含重金属) 单菌落



c) MRS 培养基 (含重金属) 单菌落



d) 未吸附重金属



e) 吸附重金属

图 1 植物乳杆菌 121 形态

Fig. 1 The morphology of *Lactobacillus plantarum* 121

重金属之所以能吸附在植物乳杆菌表面, 得益于植物乳杆菌 121 细胞表面的负电荷 (主要是由于细胞壁上的氨基酸和酸性多糖)^[25-28]。带正电的重金属离子与其发生静电相互作用, 促使重金属离子吸附在细胞表面。其次, 细胞表面的功能基团 (如羧基、磷酸基团、氨基等) 能够与重金属离子形成配位结合^[29], 从而增强植物乳杆菌 121 的吸附能力。此外, 植物乳杆菌 121 细胞壁中的多糖或蛋白质成分可能会

与重金属离子形成表面络合物^[30],从而进一步提高对重金属离子的吸附效率。

3.2 菌株对 Pb^{2+} 的吸附能力

图2为植物乳杆菌121对 Pb^{2+} 的吸附测试结果。在图2a中,试管所对应的pH值从左到右依次升高。其中pH=2和pH=8的两只试管中的溶液颜色最深且吸附率最低,但仍有75.51%和76.35%的吸附率,这说明植物乳杆菌121在人体胃肠道微环境中可以有效吸附 Pb^{2+} 。通过图2a和2b可以看出,pH=5的试管中溶液的颜色较浅,此时的植物乳杆菌121对 Pb^{2+} 的吸附率最高,为88.37%。

在菌体中加入1.5 mL的 Pb^{2+} (80 $\mu\text{g/mL}$) 溶液,置于37 $^{\circ}\text{C}$ 下恒温摇床培养6 h。如图2c所示,随着时间的增加,植物乳杆菌121的吸附率逐渐升高,在4 h时吸附率最高,4 h后趋于稳定。植物乳杆菌121在4 h时达到最佳吸附率,这与食物在人体中的停留时间相近^[31]。对植物乳杆菌121进行吸附动力学模拟,其中准一级动力学模型的相关系数 $R^2=0.9334$ (见图2d),准二级动力学模型的相关系数 $R^2=0.9227$ (见图2e)。以上结果说明植物乳杆菌121对 Pb^{2+} 既存在物理吸附又存在化学吸附。

从图2f植物乳杆菌121的生长曲线可知,植物乳杆菌121在4 h以后进入对数期,6 h后生长繁殖

速率下降,12 h后进入稳定期。可见,处于对数期的活菌对 Pb^{2+} 的去除率最高,即植物乳杆菌121在特定条件下不仅可以通过静电吸附、表面络合及配位作用将 Pb^{2+} 吸附在其表面,还能通过内吞作用将 Pb^{2+} 摄入细胞中,通过生物吸附高效地去除 Pb^{2+} ^[32]。

3.3 共存离子对菌株吸附 Pb^{2+} 的影响

在图3中,不仅研究了植物乳杆菌121对 Pb^{2+} 的吸附性能,还探究了共存离子的存在对其吸附性能的影响。如图3a所示,金属阳离子的存在一定程度上影响了植物乳杆菌121对 Pb^{2+} 的吸附效果。当 Pb^{2+} 与 Mg^{2+} 共存时,植物乳杆菌121的吸附率最高(61.28%),即 Mg^{2+} 对其影响最小。当 Ca^{2+} 与 Pb^{2+} 共存时,处于对数期的活菌对 Pb^{2+} 的吸附率远高于致死菌。图3b中进一步探究了 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 对植物乳杆菌121吸附 Pb^{2+} 的影响。若溶液中没有 Pb^{2+} ,仅存在 Ca^{2+} 或 Mg^{2+} ,植物乳杆菌121也会吸附 Ca^{2+} ,但对 Mg^{2+} 的吸附量较少。综上所述,处于对数期的植物乳杆菌121在“铅离子+钙离子”共存或“铅离子+镁离子”共存的条件下,会选择性地优先吸附 Pb^{2+} 。基于以上实验结果和乳酸菌特有的抗氧化作用机理^[33],分离和筛选对 Pb^{2+} 具有抗性和吸附作用的植物乳杆菌121,对去除包装中的 Pb^{2+} 以及修复环境中的铅污染等研究领域具有重要意义^[34]。

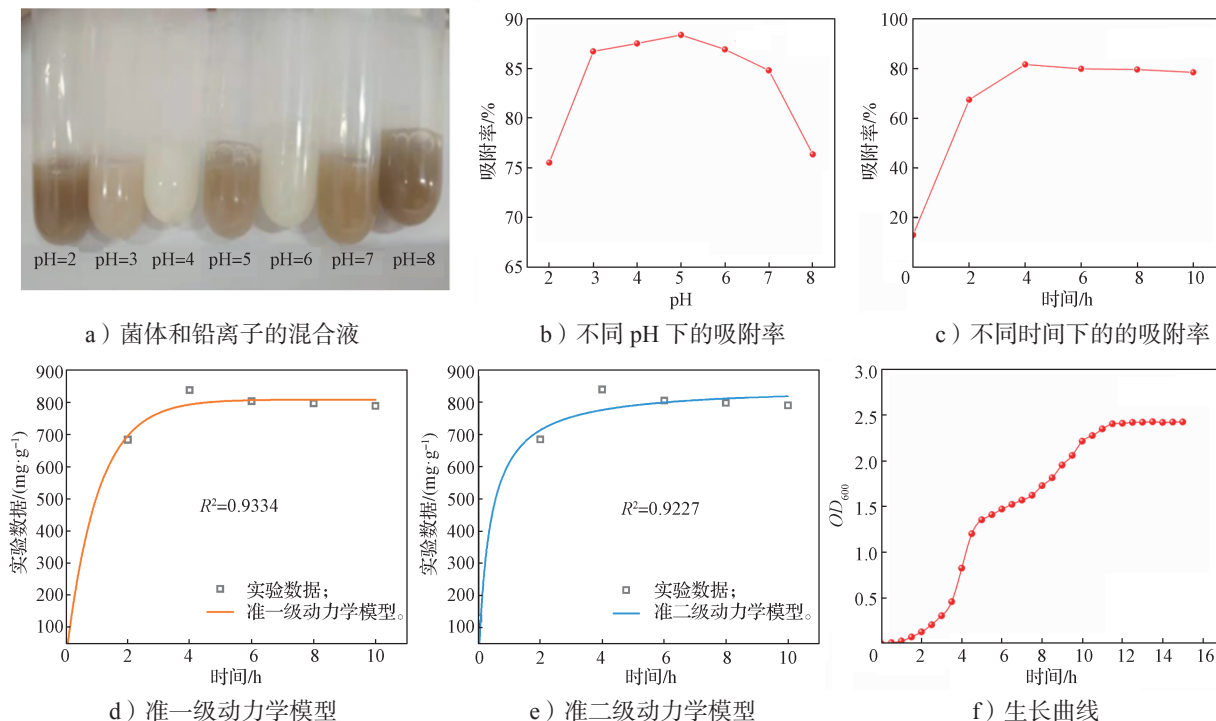
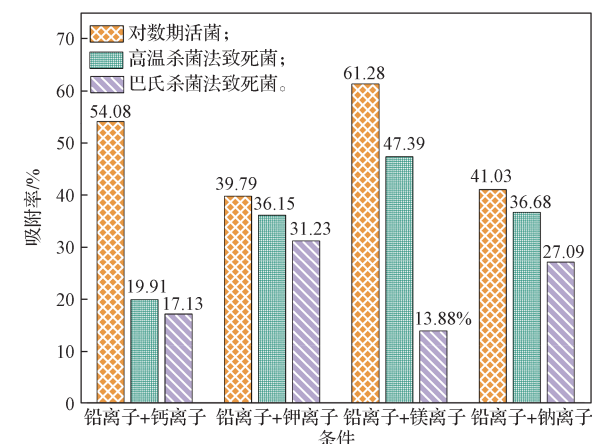
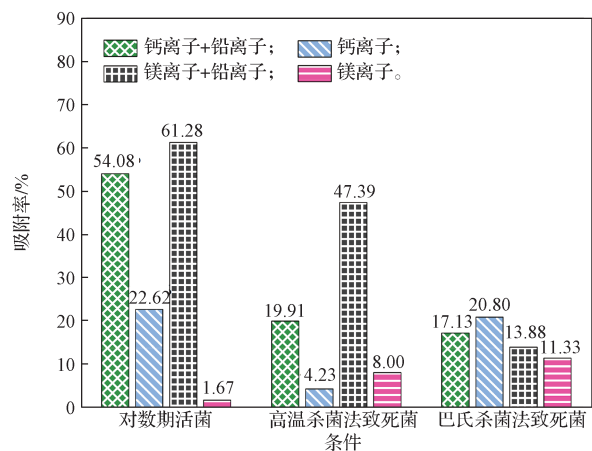


图2 植物乳杆菌121对 Pb^{2+} 的吸附效果

Fig. 2 Adsorption of Pb^{2+} by *Lactobacillus plantarum* 121



a) 不同活性菌体在不同共存离子组合中的吸附率

b) 不同活性菌体在 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Pb^{2+} 共存时的吸附率图3 共存离子对植物乳杆菌 121 吸附 Pb^{2+} 的影响Fig. 3 The influence of coexisting ions on the adsorption of Pb^{2+} by lactobacillus plantarum 121

4 结论与展望

本研究首先利用革兰氏染色对植物乳杆菌 121 吸附重金属的前后形态进行观察,发现其属于革兰氏阳性菌并且为耐受菌株。研究发现植物乳杆菌 121 在 pH 值为 5、吸附时间为 4 h 时对 Pb^{2+} 呈现出最高的吸附率 (88.37%)。当处于对数期的植物乳杆菌 121 在“铅离子+钙离子”共存或“铅离子+镁离子”共存条件下,其对 Pb^{2+} 分别呈现出 54.08%、61.28% 的高吸附率。即使经过巴氏杀菌法处理过后,植物乳杆菌 121 在“铅离子+钙离子”共存条件下仍有 17.13% 的吸附率。植物乳杆菌 121 在特定条件下不仅可以通静电吸附、表面络合及配位作用将 Pb^{2+} 吸附在其表面,还能通过内吞作用将 Pb^{2+} 摄入细胞中,通过生物吸附高效地去除 Pb^{2+} 。这为解决环境中的重金属污染问题提供了一定的科学依据和技术支撑,也

为食品添加剂、食品包装等领域提供理论指导。在下一步的研究中将采取毒性试验,使植物乳杆菌 121 适用于重金属 (铝、镉、铅) 超标食物的处理及功能食品的开发。

参考文献:

- [1] BENKEBLIA N. Physiological and Biochemical Response of Tropical Fruits to Hypoxia/Anoxia[J]. Frontiers in Plant Science, 2021, 12: 670803.
- [2] 李梓琦, 李雪, 尹昊, 等. 高阻隔性复合 PEN/PET 饮料包装瓶的制备及阻隔性能研究 [J]. 饮料工业, 2024, 27(2): 201-208.
- [3] KATYAL G, PATHAK A, RAGHAVENDRA RAO NG, et al. Ecofriendly Pharmaceutical Packaging Material: A Review[J]. Materials Today: Proceedings, 2024, 103: 423-431.
- [4] SRIVASTAVA P, RAMAKANTH D, AKHILA K, et al. Package Design as a Branding Tool in the Cosmetic Industry: Consumers' Perception vs. Reality[J]. SN Business & Economics, 2022, 2(6): 58.
- [5] BRANDELLI A. Nanocomposites and Their Application in Antimicrobial Packaging[J]. Frontiers in Chemistry, 2024, 12: 1356304.
- [6] EL AYOUBI M S, RADMEHR M. Green Food Supply Chain Management as a Solution for the Mitigation of Food Supply Chain Management Risk for Improving the Environmental Health Level[J]. Heliyon, 2023, 9(2): e13264.
- [7] PAPADOCHRISTOPOULOS A, KERRY J P, FEGAN N, et al. Natural Anti-Microbials for Enhanced Microbial Safety and Shelf-Life of Processed Packaged Meat[J]. Foods, 2021, 10(7): 1598.
- [8] MA Y, LI M N, QI X, et al. A Multimode Optical Sensor for Selective and Sensitive Detection of Harmful Heavy Metal Cr(VI) in Fresh Water and Sea Water[J]. Analytical Chemistry, 2024, 96(21): 8705-8712.
- [9] BIEDUNKOVA O, KUZNIETSOV P. Dataset on Heavy Metal Pollution Assessment in Freshwater Ecosystems[J]. Scientific Data, 2024, 11(1): 1241.
- [10] MWELWA S, CHUNGU D, TAILOKA F, et al. Biotransfer of Heavy Metals Along the Soil-Plant-Edible Insect-Human Food Chain in Africa[J]. Science of the Total Environment, 2023, 881: 163150.
- [11] ZHANG S P, SUN L, ZHANG J, et al. Adverse Impact of Heavy Metals on Bone Cells and Bone Metabolism Dependently and Independently Through Anemia[J]. Advanced Science, 2020, 7(19): 2000383.
- [12] KANDIĆ I, KRAGOVIĆ M, PETROVIĆ J, et al. Heavy Metals Content in Selected Medicinal Plants Produced and Consumed in Serbia and Their Daily Intake in Herbal Infusions[J]. Toxics, 2023, 11(2): 198.
- [13] FERREIRA G, SANTANDER A, CHAVARRÍA L,

- et al. Functional Consequences of Lead and Mercury Exposomes in the Heart[J]. Molecular Aspects of Medicine, 2022, 87: 101048.
- [14] WANG Q L, WANG W J, ZHANG A. TET-Mediated DNA Demethylation Plays an Important Role in Arsenic-Induced HBE Cells Oxidative Stress via Regulating Promoter Methylation of OGG1 and GSTP1[J]. Toxicology in Vitro, 2021, 72: 105075.
- [15] ZARGAR S, ALTWAIJRY N, ALANAZI H, et al. Elucidation of Molecular Mechanisms, Pathways, and Diseases Modulated by Arsenicals Through Toxogenomics and Multi-Omics Analysis[J]. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology, 2024, 86: 127561.
- [16] MEENA R, SAHOO S S, SUNIL A, et al. Cuproptosis: A Copper-Mediated Programmed Cell Death[J]. Chemistry-An Asian Journal, 2025, 20(4): e202400934.
- [17] BORNHORST J, KIPP A P, HAASE H, et al. The Crux of Inept Biomarkers for Risks and Benefits of Trace Elements[J]. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 2018, 104: 183–190.
- [18] ZHANG W P, CHEN W Q, LU D Q, et al. Interactive Association of Metals and Life's Essential 8 with Mortality in U.S. Adults: A Prospective Cohort Study from the NHANES Dataset[J]. BMC Public Health, 2024, 24(1): 3073.
- [19] TKACHENKO H, KURHALUK N, HETMAŃSKI T, et al. Changes in Energetic Metabolism and Lysosomal Destruction in the Skeletal Muscle and Cardiac Tissues of Pigeons (*Columba Livia F. Urbana*) from Urban Areas of the Northern Pomeranian Region (Poland)[J]. Ecotoxicology, 2021, 30(6): 1170–1185.
- [20] YANG Y N, ZHOU X D, DONG R T, et al. A Highly Selective and Sensitive Nano-Silver Sol Sensor for Hg^{2+} and Fe^{3+} : Green Preparation and Mechanism[J]. Polymers, 2022, 14(18): 3745.
- [21] HALTTUNEN T, COLLADO M C, EL-NEZAMI H, et al. Combining Strains of Lactic Acid Bacteria may Reduce Their Toxin and Heavy Metal Removal Efficiency from Aqueous Solution[J]. Letters in Applied Microbiology, 2008, 46(2): 160–165.
- [22] LUO H T, XIE S G, DAI X J, et al. Biomass Decomposition and Heavy Metal Release from Seaweed Litter, *Gracilaria Lemaneiformis*, and Secondary Pollution Evaluation[J]. Journal of Environmental Management, 2022, 310: 114729.
- [23] WEI J, GE L, WANG W L, et al. Efficient Remediation of Heavy Metal-Contaminated Water Using a Magnetically Collectible Nanoscale Cu/Fe/rGO Primary Battery[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2024, 12(2): 111574.
- [24] RADENKOVS V, VALDOVSKA A, GALINA D, et al. Elaboration of Nanostructured Levan-Based Colloid System as a Biological Alternative with Antimicrobial Activity for Applications in the Management of Pathogenic Microorganisms[J]. Nanomaterials, 2023, 13(22): 2969.
- [25] PRECHTL R M, WEFERS D, JAKOB F, et al. Structural Characterization of the Surface-Associated Heteropolysaccharide of *Lactobacillus plantarum* TMW 1.1478 and Genetic Analysis of Its Putative Biosynthesis Cluster[J]. Carbohydrate Polymers, 2018, 202: 236–245.
- [26] ZHU J, SUN Y W, ZHANG S Y, et al. Unraveling the Genetic Adaptations in Cell Surface Composition and Transporters of *Lactiplantibacillus plantarum* for Enhanced Acid Tolerance[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2024, 72(10): 5368–5378.
- [27] LI S K, WEN Y J, WANG Y F, et al. Novel A-Amino Acid-Like Structure Decorated Biochar for Heavy Metal Remediation in Acid Soil[J]. Journal of Hazardous Materials, 2024, 462: 132740.
- [28] LIU S L, ZHENG Y, MA Y M, et al. Evaluation and Proteomic Analysis of Lead Adsorption by Lactic Acid Bacteria[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2019, 20(22): 5540.
- [29] CHIRIZZI D, MASTROGIACOMO D, SEMERARO P, et al. Nickel Ion Extracellular Uptake by the Phototrophic Bacterium *Rhodobacter Sphaeroides*: New Insights from Langmuir Modelling and X-Ray Photoelectron Spectroscopic Analysis[J]. Applied Surface Science, 2022, 593: 153385.
- [30] PRIYADARSHANEE M, DAS S. Spectra Metrology for Interaction of Heavy Metals with Extracellular Polymeric Substances (EPS) of *Pseudomonas Aeruginosa* OMCS-1 Reveals Static Quenching and Complexation Dynamics of EPS with Heavy Metals[J]. Journal of Hazardous Materials, 2024, 466: 133617.
- [31] PILAT T L, RADYSH I V, SUROVTSEV V V, et al. Dietary Management of Digestive and Gastrointestinal Disorders After Long-Term Self-Isolation and Lockdown as Well as Patients with SARS-CoV-2 During the Rehabilitation Period[J]. Meditsinskiy Sovet = Medical Council, 2020(15): 146–152.
- [32] ZHAI Q X, TIAN F W, WANG G, et al. The Cadmium Binding Characteristics of a Lactic Acid Bacterium in Aqueous Solutions and Its Application for Removal of Cadmium from Fruit and Vegetable Juices[J]. RSC Advances, 2016, 6(8): 5990–5998.
- [33] RASMUSSEN E J F, ACS N, JENSEN P R, et al. Harnessing Oxidative Stress to Obtain Natural Riboflavin Secreting Lactic Acid Bacteria for Use in Biofortification[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2024, 72(47): 26356–26365.
- [34] FAN S Y, CHEN S Y, LIN L. Research Progress of Gut Microbiota and Obesity Caused by High-Fat Diet[J]. Frontiers in Cellular and Infection Microbiology, 2023, 13: 1139800.

(责任编辑: 李 涛)

The Adsorption Effect of *Lactobacillus plantarum* 121 on Heavy Metal Lead Based on Packaging Safety

LI Lubo, LI Tao, SUN Aokui

(School of Materials Science and Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: Heavy metals in packaging materials can migrate to food and the environment. To address this issue, lactic acid bacteria were isolated from health food and fermented yoghurt. The main experimental strains include *Bifidobacterium*, *Lactobacillus plantarum*, *Lactobacillus acidophilus* and *Leuconostoc mesenteroides*, etc., which were used in the adsorption experiments of heavy metals. Among a diverse array of experimental strains, *Lactobacillus plantarum* 121 was successfully isolated. This particular strain demonstrated a relatively outstanding capacity for heavy metal adsorption. By measuring the growth curve of *Lactobacillus plantarum* 121, it was determined that *Lactobacillus plantarum* 121 is in logarithmic phase within 6 h, and the thallus cells in logarithmic phase were collected for experiments. The *Lactobacillus plantarum* 121 was inactivated by high temperature sterilization and pasteurization respectively, and the comparison with the inactivation of *Lactobacillus plantarum* 121 shows that the inactivation of *Lactobacillus plantarum* 121 has the best removal effect on lead. The adsorption behavior of this strain towards heavy metals shows considerable promise in the fields of green packaging and environmental governance.

Keywords: *Lactobacillus plantarum* 121; pasteurization; high temperature sterilization; heavy metal; absorption

(上接第 40 页)

Molecular Dynamics Simulation of BHA's Diffusion from Low Density Polyethylene Materials for Food Contact

LI Mouhai^{1,2}, YU Wenxi², CHENG Juan³, YI Xijian², LEI Qin²

(1. School of Light Industry and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;

2. School of Packaging Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;

3. College of Packaging Engineering, Jinan University, Zhuhai Guangdong 519070, China)

Abstract: The migration of harmful chemicals from food contact materials is a major pathway for food contamination and poses significant risks to human health. Molecular dynamics simulations were used to construct a single-phase low-density polyethylene/butylated hydroxyanisole (LDPE/BHA) model and a two-phase LDPE/BHA-food simulant model. The diffusion behavior of BHA molecules at four temperatures (278, 298, 310, and 333 K) was investigated using mean square displacement analysis. Furthermore, the diffusion mechanism of BHA molecules was explored in terms of solubility parameters, diffusion coefficients, interaction energy with LDPE, free volume fraction, solubility parameter, molecular trajectories, and the type of food simulants. The results reveal that BHA diffusion is influenced by multiple factors. At higher temperatures, the diffusion coefficients of BHA molecules increase significantly due to elevated molecular energy, an expanded free volume fraction, and enhanced segmental motion of polymer chains, which collectively provide more diffusion pathways. The strong interaction between BHA molecules and polymers results in a reduced diffusion coefficient for BHA. Food simulants with solubility parameter values similar to those of polymers facilitate the migration of BHA.

Keywords: molecular dynamics; diffusion coefficient; low density polyethylene; butylated hydroxyanisole; food contact material