



## 乳杆菌在模拟肉制品条件下结合苯并芘的效果

张卓<sup>1</sup> 李子强<sup>2</sup> 乔雅斐<sup>2</sup> 裴家伟<sup>2</sup> 张柏林<sup>\*1</sup>

1 北京林业大学生物科学与技术学院 食品科学与工程系 北京 100083

2 河北农业大学食品科技学院 河北 保定 071001

**摘要:**【背景】乳杆菌对众多致癌物具有吸附作用，但关于乳杆菌结合吸附苯并芘特性的研究并不多。【目的】探讨戊糖乳杆菌(*Lactobacillus pentosus*) ML32 和植物乳杆菌(*Lactobacillus plantarum*) 121 对加工肉制品中苯并芘的吸附能力与吸附机制。【方法】基于 HPLC 检测菌体对不同模拟加工处理方式肉制品中的苯并芘的吸附率。【结果】植物乳杆菌 121 和戊糖乳杆菌 ML32 对模拟油炸、烟熏或烧烤方式处理肉中苯并芘的吸附率均在 30%以上。菌株 121 对直接烟熏肉中的苯并芘吸附率为 41.21%，直接油炸肉中吸附率为 38.71%，直接烧烤肉中吸附率为 37.51%；菌株 ML32 对间接烟熏肉中的苯并芘吸附率为 40.02%，间接烧烤肉中吸附率为 38.01%。植物乳杆菌 121 适合于去除高温长时间加工肉中的苯并芘，戊糖乳杆菌 ML32 则相反。另外，乳杆菌细胞壁中的肽聚糖或许在吸附过程中发挥了主要作用。【结论】两株乳杆菌 121 和 ML32 具有吸附某些加工肉制品中苯并芘的效果，或许可以作为一种方法用于消除某些肉制品中因苯并芘过量带来的风险。

**关键词:** 乳杆菌，苯并芘，吸附，肉制品

## Potential of *Lactobacillus* strains to bind benzo(a)pyrene in simulated meat products

ZHANG Zhuo<sup>1</sup> LI Zi-Qiang<sup>2</sup> QIAO Ya-Fei<sup>2</sup> PEI Jia-Wei<sup>2</sup> ZHANG Bo-Lin<sup>\*1</sup>

1 Department of Food Sciences and Engineering, College of Biological Sciences, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 Institute of Food Science and Technology, Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei 071001, China

**Abstract:** [Background] *Lactobacillus* has been proved to adsorb many cancerogens, but there are little studies on the mechanism of the adsorption of *Lactobacillus* to benzo(a)pyrene (BaP). [Objective] The adsorption capacity and mechanism of *Lactobacillus pentosus* ML32 and *Lactobacillus plantarum* 121 on BaP in processed meat products were investigated. [Methods] The adsorption rate of BaP from different processed meats was detected by HPLC. [Results] BaP adsorption rates in meats treated by frying, smoking or grilling, of both *Lactobacillus plantarum* 121 and *Lactobacillus pentosus* ML32 were more than 30%. The adsorption rate of strain 121 in the directly smoked meat was 41.21%, and that of directly fried meat was 38.71%. The adsorption rate of strain ML32 to BaP in the indirectly smoked meat was

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (31471710)

**\*Corresponding author:** Tel: 86-10-62336833; E-mail: zhangbolin888@163.com

**Received:** 31-01-2019; **Accepted:** 28-05-2019; **Published online:** 19-06-2019

**基金项目:** 国家自然科学基金(31471710)

**\*通信作者:** Tel: 010-62336833; E-mail: zhangbolin888@163.com

**收稿日期:** 2019-01-31; **接受日期:** 2019-05-28; **网络首发日期:** 2019-06-19

40.02%, and that of indirectly barbecued meat was 38.01%. In conclusion, *L. plantarum* 121 shows an ability to remove more BaP in the meats processed with high temperatures or a long time, while *L. pentosus* ML32 seems to be beneficial in reducing BaP level in the low-temperature or short-time treatments. In addition, peptidoglycan in the lactobacillus cell wall may play an important role in the adsorption process. **[Conclusion]** *L. plantarum* 121 and *L. pentosus* ML32 have the effect of removing BaP from processed meat products and can be used as a method to reduce the risk of excessive BaP in meat products.

**Keywords:** *Lactobacillus*, Benzo(a)pyrene, Adsorption, Meat products

苯并芘是一种多环芳香族碳氢化合物, 被认为是最强的致癌物之一<sup>[1]</sup>。苯并芘能够引起 DNA 损伤, 增加癌症的患病率<sup>[2]</sup>。苯并芘能够通过呼吸道、消化道、皮肤等被人体或动物吸收, 具有致癌、致畸、致突变的作用<sup>[3]</sup>。苯并芘不易代谢, 积累后的危害极大<sup>[4]</sup>。受人类加工饮食方式影响, 大约 70% 的苯并芘来自食品<sup>[5]</sup>, 尤其是烧烤、熏制和油炸食品<sup>[6-8]</sup>。研究表明, 在 200 种食物中, 苯并芘含量最高的是充分烧烤的肉制品, 如牛排、汉堡肉<sup>[9]</sup>。肉制品油炸过程中, 若温度超过 200 °C 时会生成大量的多环芳烃化合物, 且直接油炸和间接油炸产生苯并芘的量有近似倍数关系。另外, 食材经过烟熏处理后, 苯并芘含量会增加 7 倍<sup>[10]</sup>。食用油经加热, 苯并芘的含量增加约 10 倍<sup>[11]</sup>。显然, 不当的加工方式会导致食物中苯并芘含量上升, 从而产生危害。

乳酸菌是十分重要的益生菌, 具有免疫调节、改善肠道微生态环境、抗肿瘤、抗氧化<sup>[12]</sup>、调控胆固醇<sup>[13]</sup>等益生特性, 广泛应用于食品加工过程中<sup>[14]</sup>。乳酸菌对众多突变物质具有一定的吸附作用, 能避免机体对突变因子吸收代谢, 从而达到了抗癌及抗突变的作用<sup>[15-16]</sup>。一些乳酸菌能够在表面吸附黄曲霉素和其他一些真菌毒素<sup>[17-19]</sup>。鼠李糖乳杆菌 LGG 对黄曲霉毒素 B1 有很强的吸附脱除作用, 吸附效率达到 79%。乳酸菌对杂环胺以及包括苯并芘在内的多环芳烃化合物也表现出了良好的吸附作用, 从而具有脱除这些化学物质的能力<sup>[20]</sup>。迄今为止, 大多数研究都集中在去除真菌毒素及杂环胺上。关于乳杆菌结合苯并芘特

性的研究报道较少, 特别是加工肉制品中乳杆菌是否存在吸附苯并芘的研究报道缺乏。我们以前的研究中证实, 戊糖乳杆菌 ML32 (*Lactobacillus pentosus* ML32) 和植物乳杆菌 121 (*Lactobacillus plantarum* 121) 这两株乳杆菌在模拟肠胃环境下具有良好的吸附苯并芘的能力<sup>[4]</sup>, 但并不清楚它们是否在某些特定的加工肉制品中仍然具有潜在的苯并芘吸附能力。实验表明, 乳杆菌吸附苯并芘主要位点为细胞壁, 细胞壁的肽聚糖在吸附苯并芘中起着主要作用<sup>[14]</sup>。基于此, 本研究讨论了戊糖乳杆菌 ML32 和植物乳杆菌 121 这两株乳杆菌对模拟油炸、烟熏或烧烤方式处理的肉制品中苯并芘的吸附效果, 同时考察了肽聚糖浓度及完整性对乳杆菌的苯并芘吸附率的影响, 旨在为利用乳杆菌消除某些肉制品中因苯并芘存在所产生的可能危害提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

#### 1.1.1 实验材料

植物乳杆菌(*L. plantarum*) 121 和戊糖乳杆菌(*L. pentosus*) ML32 由河北农业大学食品科技学院提供, 现保存于中国工业微生物菌种保藏中心(CICC)。鸡肉、烤肠、羊肉由河北保定市莲池肉联厂提供, 油炸鸡柳、烟熏烤肠、烧烤羊肉串制作方法参考文献[21-22]。

#### 1.1.2 主要试剂和仪器

苯并芘(≥99%), 西格玛奥德里奇(上海)贸易有限公司; 甲醇(色谱纯), 北京迈瑞达科技有限公

司; 氯仿, 天津瑞金特化学品有限公司。高效液相色谱仪, 安捷伦科技有限公司; 紫外可见分光光度计, 北京普析通用仪器公司; 反向 Luna-C18 色谱柱(4.6 mm×250 mm, 5 μm), 天津飞诺美公司。

## 1.2 菌悬液的制备

将所选用 2 株乳杆菌的冷冻干燥粉剂连续活化两代, 按 4% 接种量接种于 MRS 培养基<sup>[14]</sup>中, 37 °C 培养 18–22 h。培养完成后, 将培养液 4 °C、5 000×g 离心 10 min 后收集菌体细胞。菌体细胞采用无菌水洗涤两次后测其  $OD_{600}$  值, 调整菌悬液的浓度到  $10^9$  CFU/mL 后备用。

## 1.3 不同加工方式肉制品的样品准备

每份样品取油炸肉制品 1.00 g, 充分粉碎后, 用 1 层纱布包裹, 分别置于浓度为 1.25 μg/mL 和 0.25 μg/mL 的苯并芘溶液浸泡 2 h, 作为直接油炸制品和间接油炸制品的样品, 制备后冷冻保存。每份样品取烟熏肉制品 1.00 g, 充分粉碎后, 用 1 层纱布包裹, 分别置于浓度为 2.50 μg/mL 和 0.25 μg/mL 的苯并芘溶液浸泡 2 h, 作为直接烟熏肉制品和间接烟熏肉制品的样品, 制备后冷冻保存。每份样品取烧烤肉制品 1.00 g, 充分粉碎后, 用 1 层纱布包裹, 分别置于浓度为 1.75 μg/mL 和 0.25 μg/mL 的苯并芘溶液浸泡 2 h, 作为直接烧烤肉制品和间接烧烤肉制品的样品, 制备后冷冻保存。

## 1.4 不同加工温度肉制品的样品准备

每份样品取油炸肉制品 1.00 g, 充分粉碎后, 用 1 层纱布包裹, 分别置于浓度为 0、0.25、0.50、1.00 μg/mL 的苯并芘溶液中浸泡 2 h, 分别代表在 150、160、200、240 °C 油炸的样品, 制备后冷冻保存。烟熏肉制品按照 0、0.25、0.50、1.00 μg/mL 的梯度处理样品, 分别代表在 160、240、300、600 °C 烟熏的样品。烧烤肉制品按照 0、0.25、0.50、1.00 μg/mL 的梯度处理样品, 分别代表在 200、240、270、300 °C 烧烤的样品。

## 1.5 不同加工时间肉制品的样品准备

每份样品取油炸肉制品 1.0 g, 充分粉碎后,

用 1 层纱布包裹, 分别置于浓度为 0、0.25、0.50、1.00 μg/mL 的苯并芘溶液中浸泡 2 h, 作为油炸 5、8、12、20 min 的样品, 制备后冷冻保存。烟熏肉制品按照 0、0.25、0.50、1.00 μg/mL 的梯度处理样品, 分别代表烟熏 2、8、12、20 h 的样品。烧烤肉制品按照 0、0.25、0.50、1.00 μg/mL 的梯度处理样品, 分别代表烧烤 8、12、20、30 min 的样品。

## 1.6 乳杆菌菌株的苯并芘吸附检测

取 1.00 mL 菌悬液置于样品溶液中, 37 °C 培养 4 h 后 4 °C、5 000×g 离心 10 min, 上清液用 500.00 μL 氯仿萃取, 利用 HPLC 检测苯并芘含量, 对比样品处理前后检测到的苯并芘含量, 计算菌株的苯并芘吸附率。

吸附率=[(空白样中苯并芘的含量-上清液中苯并芘的含量)/空白样中苯并芘的含量]×100%。

## 1.7 乳杆菌细胞壁肽聚糖脱除苯并芘的效果分析

从 1.2 中制备的菌悬液中提取细胞壁完整肽聚糖<sup>[23]</sup>, 使肽聚糖浓度分别达到 5.00、10.00、15.00、20.00 mg/mL, 测定其苯并芘吸附率。每份取 10.00 mL 菌悬液, 提取细胞壁完整肽聚糖, 分别进行超声处理及溶菌酶处理, 以不进行处理的肽聚糖作对照, 比较苯并芘吸附率。

## 1.8 数据分析

每组试验重复 3 次, 数据统计分析采用 Origin 2018 软件进行。实验结果表示成平均值±标准差。显著性差异分析采用单因素方差分析 (ANOVA OneWay), *F* 检验得出。依次分析不同加工方式下两个菌株之间苯并芘吸附率的显著性差异, 两株菌细胞壁肽聚糖相邻浓度之间苯并芘吸附率的显著性差异, 同一浓度下两株菌细胞壁肽聚糖的苯并芘吸附率, 相同处理条件下两株菌细胞壁肽聚糖苯并芘吸附率的显著性差异, 以及不同处理条件下菌株细胞壁肽聚糖苯并芘吸附率的显著性差异。

## 2 结果与分析

### 2.1 加工方式对乳酸菌吸附苯并芘的影响

将3种含有苯并芘的肉制品与乳酸菌培养后,计算吸附率,结果如图1所示。对于油炸肉制品,直接油炸、间接油炸两种方式中植物乳杆菌121对苯并芘的吸附率均高于戊糖乳杆菌ML32,且两菌株的吸附率均高于34.00%,吸附效果良好;在烟熏肉制品中,植物乳杆菌121对直接烟熏肠的苯并芘吸附效果更好,较戊糖乳杆菌ML32的吸附率高出5.02%,为41.21%,菌株ML32则对间接烧烤肠的吸附效果更好,由于直接烟熏产生的苯并芘较多,预测菌株121对高浓度苯并芘吸附率更好;在烧烤肉制品中,菌株121对直接烧烤肉制品苯并芘吸附效果增加了2.43%,间接烧烤的吸附效果不及菌株ML32。然而,统计分析表明,当在直接烟熏与直接烧烤处理条件下,植物乳杆菌121与戊糖乳杆菌ML32对苯并芘的吸附率存在显著性差异( $0.01 < P < 0.05$ )。其他处理条件下两菌株之间的吸附率差异不显著。

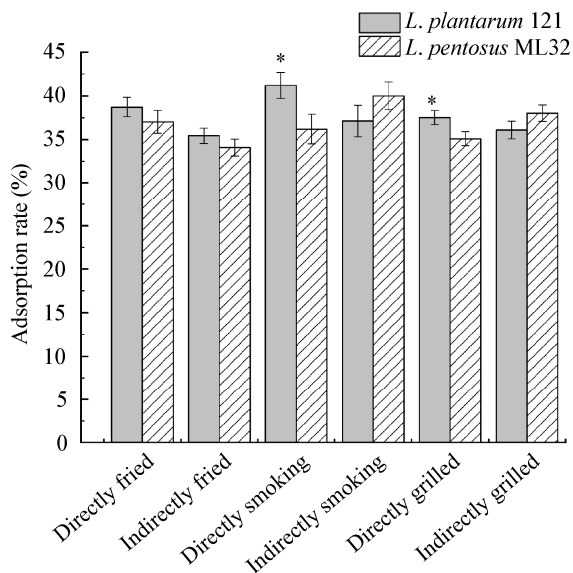


图1 加工方式对苯并芘吸附率的影响

Figure 1 Effect of processing method on the benzo(a)pyrene adsorption rate

注: \*:  $P < 0.05$  表示存在显著性差异。

Note: \*:  $P < 0.05$  indicates a significant difference.

### 2.2 加工温度对乳酸菌吸附苯并芘的影响

由图2A知,油炸肉制品温度相对较低时戊糖乳杆菌ML32吸附效果更好,160℃时戊糖乳杆菌ML32的吸附率较植物乳杆菌121高3.16%,随着油炸温度升高,菌株121的吸附效果随着油炸温度的升高吸附率也逐渐提升,而菌株ML32吸附效果逐渐下降,在180–190℃时两菌株吸附效果相同,在油炸鸡柳制品中菌株121更适合高温油炸的苯并芘脱除。

由图2B可知,随着烟熏温度的升高,两菌株的吸附效果都有所提升,吸附效果均高于30%,且菌株121吸附效果高于菌株ML32,在300–600℃区间内,菌株121吸附率的增长率高于ML32,600℃时吸附率达到41.40%。

由图2C知,烧烤肉制品的苯并芘吸附情况无明显规律,两菌株吸附曲线在240℃与300℃之间先下降后上升,270℃时两菌株吸附效果最差,菌株121吸附率为35.06%,菌株ML32吸附率为33.17%,约260℃时两菌株有相同吸附效果。

### 2.3 加工时间对乳酸菌吸附苯并芘的影响

由图3A可知,在油炸肉制品中两菌株的苯并芘吸附率随加工时间变化的整体趋势大致相同,都呈现先下降后上升的趋势,戊糖乳杆菌ML32的变化趋势较为明显,在8min时菌株ML32吸附率较菌株121高2.96%,为39.03%,油炸时间增长苯并芘含量也增加,在20min时菌株121的吸附效果高于菌株ML32为37.30%。

由图3B可知,在烟熏肉制品中,两菌株吸附效果均较高,都超过了36.00%,由于烟熏肠的加工时间较长,苯并芘积累也较多,在8–16h加工区间内,菌株121的吸附率持续增加,吸附率从36.49%增加到40.29%,菌株121吸附烟熏时间较长的肉制品中苯并芘的优势明显,加工8h时苯并芘积累较少,菌株ML32吸附效果更好,吸附率为38.19%,12h时吸附率较低。

由图3C可知,在烧烤肉制品苯并芘吸附实验中,在烧烤时间较短时苯并芘产生较少,12min时

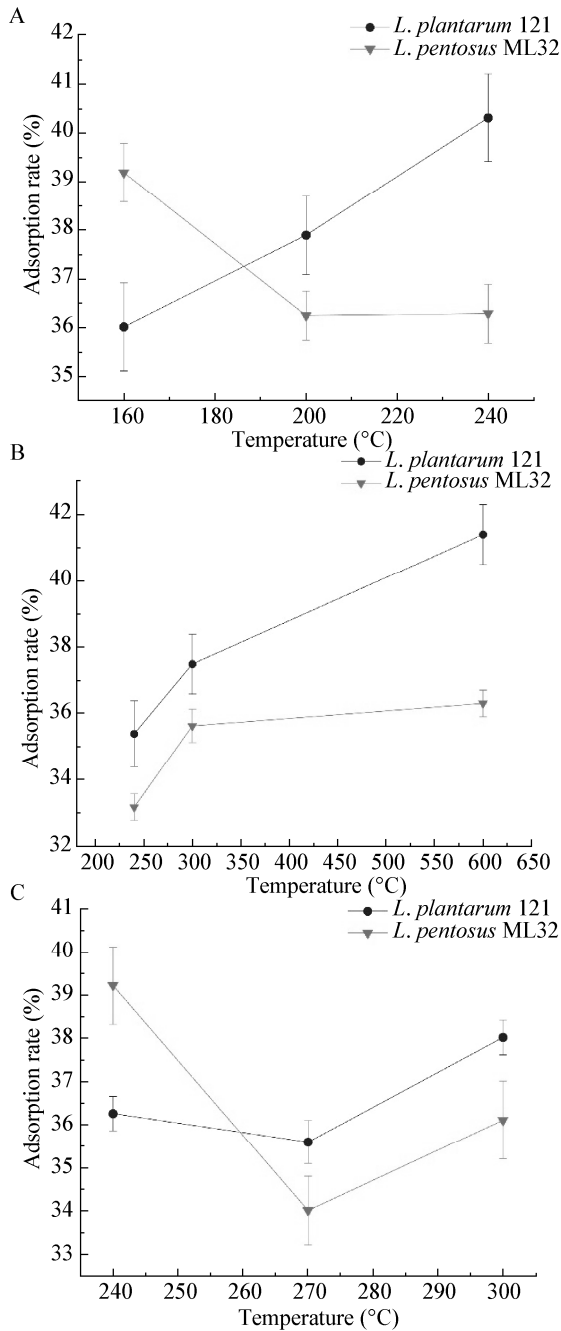


图2 加工温度对苯并芘吸附率的影响  
**Figure 2 Effect of processing temperature on the benzo(a)pyrene adsorption rate**

注: A: 油炸肉制品中苯并芘吸附率与加工温度的关系; B: 烟熏肉制品中苯并芘吸附率与加工温度的关系; C: 烧烤肉制品中苯并芘吸附率与加工温度的关系。

Note: A: The relation between the benzo(a)pyrene adsorption rate of fried meat products and processing temperature; B: The relation between the benzo(a)pyrene adsorption rate of smoked meat products and processing temperature; C: The relation between the benzo(a)pyrene adsorption rate of barbecue meat products and processing temperature.

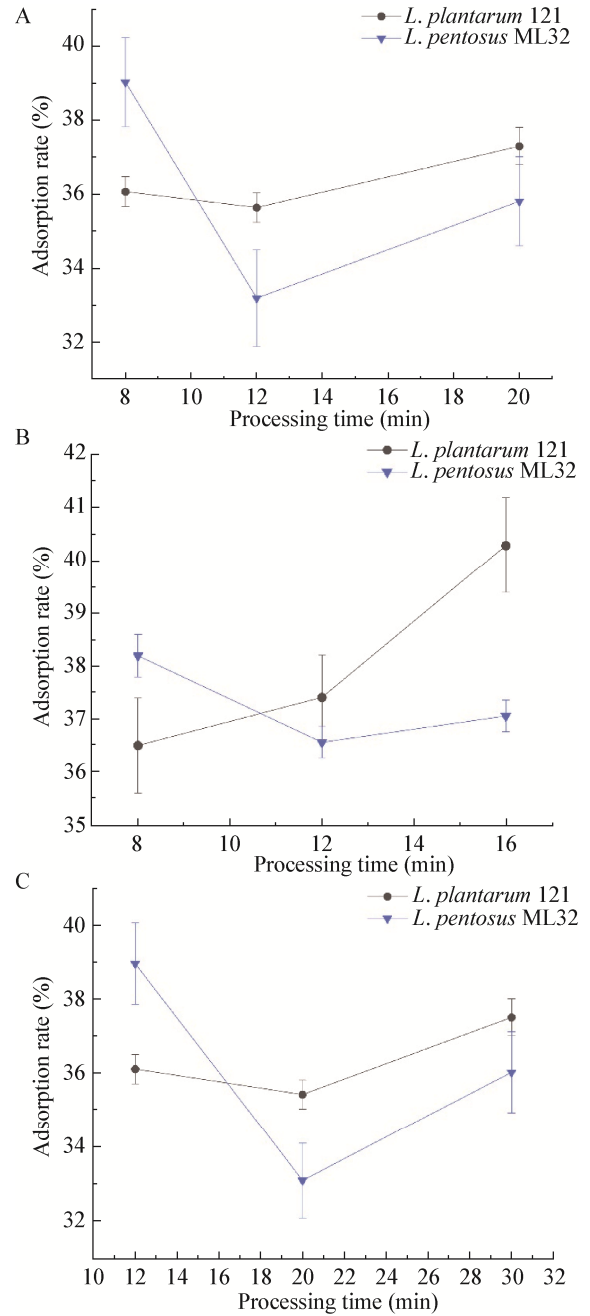


图3 加工时间对乳酸菌吸附苯并芘的影响  
**Figure 3 Effect of processing time on the benzo(a)pyrene adsorption rate**

注: A: 油炸肉制品中苯并芘吸附率与加工时间的关系; B: 烟熏肉制品中苯并芘吸附率与加工时间的关系; C: 烧烤肉制品中苯并芘吸附率与加工时间的关系。

Note: A: The relation between the benzo(a)pyrene adsorption rate of fried meat products and processing time; B: The relation between the benzo(a)pyrene adsorption rate of smoked meat products and processing time; C: The relation between the benzo(a)pyrene adsorption rate of barbecue meat products and processing time.

菌株 ML32 的吸附效果为 38.97%，较菌株 121 吸附率高 2.85%，随着烧烤时间增加，在其他时间区间内，菌株 121 吸附效果均好于菌株 ML32，加工时间较长时菌株 121 吸附效果更好。

#### 2.4 肽聚糖浓度对苯并芘吸附率影响

由图 4 可知，在肽聚糖含量逐渐增加的过程中，植物乳杆菌 121 及戊糖乳杆菌 ML32 的吸附率都增加明显，在低浓度时两菌株吸附效果相同为 18.62%，随着浓度增加，菌株 121 吸附率涨幅更加明显，吸附效果也更好，各浓度吸附率均好于菌株 ML32，在菌悬液体积为 20.00 mL 的样品中，苯并芘吸附率均超过了 90.00%，菌株 121 吸附率为 96.70%，实验证明肽聚糖成分对乳杆菌吸附苯并芘起了重要作用。统计学分析表明，植物乳杆菌 121 的细胞壁肽聚糖浓度为 10 mg/mL 与 5 mg/mL 时，其苯并芘吸附率存在极显著差异 ( $P < 0.01$ )，植物乳杆菌 121 的细胞壁肽聚糖浓度为 20 mg/mL 与 15 mg/mL 时，其苯并芘吸附率存在显著性差异 ( $0.01 < P < 0.05$ )。植物乳杆菌 ML32 的细胞壁肽聚

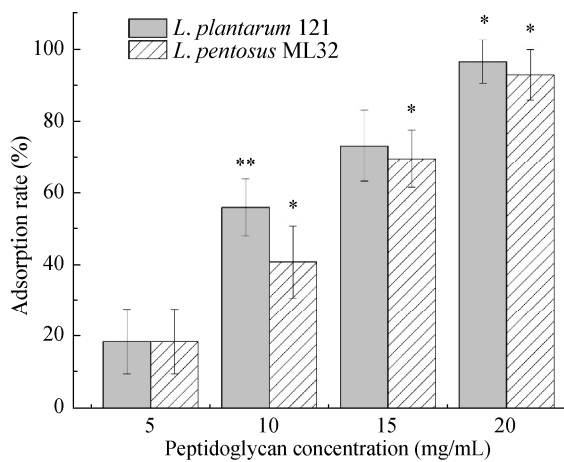


图 4 肽聚糖浓度对苯并芘吸附率影响

Figure 4 Effect of peptidoglycan concentration on the benzo(a)pyrene adsorption rate

注：\*：  $P < 0.05$  表示存在显著性差异；\*\*：  $P < 0.01$  表示存在极显著性差异。

Note: \*：  $P < 0.05$  indicates a significant difference; \*\*：  $P < 0.01$  indicates a highly significant difference.

糖的相邻浓度梯度之间，苯并芘吸附率均存在显著性差异 ( $0.01 < P < 0.05$ )。同一浓度下，两菌株之间的苯并芘吸附率均不存在显著性差异 ( $P > 0.05$ )。

#### 2.5 肽聚糖结构完整性对苯并芘吸附的影响

由图 5 可知，肽聚糖不经过处理，最大程度保持肽聚糖结构完整的情况下两菌株吸附率都超过了 90.00%，菌株 ML32 吸附率达到最高的 96.70%，随着超声处理的加入，肽聚糖结构受到了破坏，两菌株吸附效果均下降，菌株 121 的苯并芘吸附率降幅更加明显，吸附率降低了 21.10%，加入溶菌酶后细胞壁肽聚糖结构破坏更加严重，吸附率也下降，两菌株吸附率分别为 53.40% 及 49.70%。不同处理条件下，植物乳杆菌 121 的肽聚糖的苯并芘吸附率间存在显著性差异 ( $0.01 < P < 0.05$ )。戊糖乳杆菌 ML32 肽聚糖的苯并芘吸附率因在超声处理与溶菌酶处理条件下存在极显著差异 ( $P < 0.01$ )。每种处理条件下，两菌株的苯并芘吸附率并不存在显著性差异 ( $P > 0.05$ )。

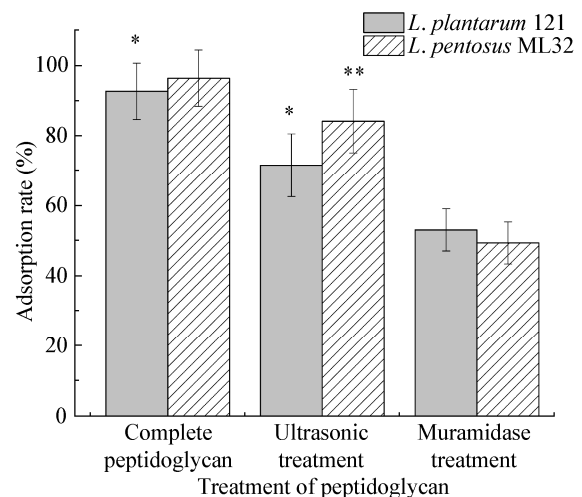


图 5 肽聚糖结构完整性对苯并芘吸附率影响

Figure 5 Effect of the structural integrity of peptidoglycan on the adsorption rate of benzo(a)pyrene

注：\*：  $P < 0.05$  表示存在显著性差异；\*\*：  $P < 0.01$  表示存在极显著性差异。

Note: \*：  $P < 0.05$  indicates a significant difference; \*\*：  $P < 0.01$  indicates a highly significant difference.

### 3 讨论与结论

不同的加工方式会导致肉制品苯并芘含量的差异, 研究表明, 将肉类进行油炸处理时, 处理温度超过 200 °C 会有大量的多环芳烃物质生成, 因此, 肉制品的处理温度应不高于 150 °C 且处理时间不超过 4 h。此外, 直接油炸的方式会使苯并芘含量激增, 将肉进行烟熏处理时, 烟熏温度超过 600 °C 苯并芘含量迅速增加, 较烟熏前肉制品中苯并芘含量上升 7 倍<sup>[10]</sup>。据此, 我们讨论了利用植物乳杆菌 121 和戊糖乳杆菌 ML32 对不同加工方法、加工温度、加工时间的肉制品中吸附苯并芘的效果。研究表明, 当苯并芘含量较高时, 植物乳杆菌 121 吸附苯并芘的效果普遍高于戊糖乳杆菌 ML32, 如直接油炸、烟熏、烧烤时菌株 121 的吸附效果优于菌株 ML32, 且加工温度较高或加工时间较长时菌株 121 的苯并芘吸附效果优于菌株 ML32。相反, 菌株 ML32 则在间接油炸、烟熏、烧烤时及加工时间较短、温度较低时表现出较好的苯并芘吸附效果。当油炸和烧烤温度逐渐升高或者加工时间增长时, 菌株 ML32 的吸附率有先下降再上升的趋势。但是菌株 ML32 对烟熏肉制品中苯并芘的吸附情况与油炸和烧烤条件下不同, 而是随着烟熏温度的升高而增加, 随着烟熏时间增长而下降。本实验中, 当油炸温度高于 200 °C 时, 植物乳杆菌 121 的苯并芘吸附率显著升高了 2.42%, 吸附率的升高也从侧面印证了肉制品经处理后苯并芘含量增多。迄今, 有关利用乳杆菌对不同处理方式肉制品中苯并芘吸附尚未有报道, 我们的工作或许会加快该方面的研究。

Pizzolitto 等证明微生物细胞壁结构完整性是去除伏马菌素 B1 的必要条件, 且结合位点在细胞表面<sup>[18]</sup>。大量的研究证明, 乳杆菌对苯并芘的吸附作用是一种物理作用, 两者间并没有任何化学反应发生<sup>[24]</sup>。此外, Zhao 等证明了乳杆菌细胞壁肽聚糖对于细胞结合苯并芘十分重要且必须要保持其结构完整<sup>[14]</sup>。考虑到乳杆菌菌株之间存在差异, 本实验中使用戊糖乳杆菌 ML32 和植物乳杆菌

121 探究了细胞壁肽聚糖对苯并芘的吸附作用, 结果表明随着肽聚糖浓度的升高, 两株菌的苯并芘吸附率均显著提高, 从 18.62% 提升至 95.00% 左右, 这说明了乳杆菌吸附苯并芘过程中起主要作用的物质是菌体细胞壁的肽聚糖, 与 Zhao 等的研究结果一致。两株乳杆菌经非超声破碎法获得的肽聚糖对苯并芘的吸附率最高, 超声破碎处理的肽聚糖次之, 溶菌酶处理的肽聚糖的吸附率最低, 低了近一半。说明肽聚糖结构越完整其苯并芘吸附率越高, 超声破碎法破坏了肽聚糖的完整性, 吸附率下降; 溶菌酶处理后, 肽聚糖完整性被破坏更严重, 吸附率更低, 但仍保持一定的吸附率。这进一步说明, 菌株细胞壁中的肽聚糖在吸附苯并芘时起主要作用, 完整的肽聚糖结构有利于吸附更多的苯并芘, 肽聚糖结构受到破坏则乳杆菌的苯并芘吸附率下降。

传统上关于乳酸菌对致癌物质吸附作用的研究主要集中在霉菌毒素和杂环胺上<sup>[25-28]</sup>, 但利用乳杆菌吸附去除苯并芘特别是在肉制品中的研究尚未有报道。本研究以戊糖乳杆菌 ML32 和植物乳杆菌 121 作为研究对象, 评价了它们在肉制品组织存在的复杂体系中对苯并芘的吸附效果, 证实了这两株菌能够在肉制品中一定程度完成对苯并芘的吸附。鉴于乳杆菌可以随着粪便排除至体外<sup>[29]</sup>, 因此, 这两株菌株或许可以被直接开发成制剂, 与油炸、烟熏、烧烤等肉制品配合食用, 达到吸附肉制品中苯并芘并帮助苯并芘代谢至体外的作用, 降低摄入的苯并芘含量, 一定程度上缓解苯并芘在人体内积累所产生的危害。本文研究了两株乳杆菌细胞壁肽聚糖吸附苯并芘的效果, 初步证实肽聚糖在苯并芘吸附过程中起着关键的作用, 说明了非完整细胞的乳杆菌仍具有一定的苯并芘吸附作用, 我们目前的工作也为后续深入解析乳杆菌吸附苯并芘的机理提供了依据。

### REFERENCES

- [1] Hecht SS. Carcinogen derived biomarkers: applications in studies of human exposure to secondhand tobacco smoke[J].

- Tobacco Control, 2004, 13(S1): i48-i56
- [2] Teixeira EC, Pra D, Idalgo D, et al. DNA-damage effect of polycyclic aromatic hydrocarbons from urban area, evaluated in lung fibroblast cultures[J]. Environmental Pollution, 2012, 162: 430-438
- [3] Vasiluk L, Pinto LJ, Tsang WS, et al. The uptake and metabolism of benzo[a]pyrene from a sample food substrate in an *in vitro* model of digestion[J]. Food and Chemical Toxicology, 2008, 46(2): 610-618
- [4] Qi YQ, Zhang JT, Pan XH, et al. Binding of benzo(a)pyrene by *Lactobacilli* strains[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2011, 51(7): 956-964 (in Chinese)  
漆叶琼, 张佳涛, 潘向辉, 等. 乳杆菌吸附苯并芘的特性[J]. 微生物学报, 2011, 51(7): 956-964
- [5] Lijinsky W. The formation and occurrence of polynuclear aromatic hydrocarbons associated with food[J]. Mutation Research/Genetic Toxicology, 1991, 259(3/4): 251-261
- [6] McGrath TE, Wooten JB, Geoffrey Chan W, et al. Formation of polycyclic aromatic hydrocarbons from tobacco: the link between low temperature residual solid (char) and PAH formation[J]. Food and Chemical Toxicology, 2007, 45(6): 1039-1050
- [7] Purcaro G, Moret S, Conte LS. Overview on polycyclic aromatic hydrocarbons: Occurrence, legislation and innovative determination in foods[J]. Talanta, 2013, 105: 292-305
- [8] Bansal V, Kim KH. Review of PAH contamination in food products and their health hazards[J]. Environment International, 2015, 84: 26-38
- [9] Kazerouni N, Sinha R, Hsu CH, et al. Analysis of 200 food items for benzo[a]pyrene and estimation of its intake in an epidemiologic study[J]. Food and Chemical Toxicology, 2001, 39(5): 423-436
- [10] Stolyhwo A, Sikorski ZE. Polycyclic aromatic hydrocarbons in smoked fish-a critical review[J]. Food Chemistry, 2005, 91(2): 303-311
- [11] Chen BH, Lin YS. Formation of polycyclic aromatic hydrocarbons during processing of duck meat[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1997, 45(4): 1394-1403
- [12] Niu MM, Wang K, Lu BX. Research progress of lactic acid bacteria extracellular polysaccharide[J]. Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2018, 30(3): 40-45,64 (in Chinese)  
牛萌萌, 王坤, 鹿保鑫. 乳酸菌胞外多糖的研究进展[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2018, 30(3): 40-45,64
- [13] Tian JJ, Zhang KP, Jin Y, et al. Progress in understanding the substance basis of the regulation of cholesterol metabolism by lactic acid bacteria[J]. Food Science, 2018[2018-12-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20181218.1334.058.html> (in Chinese)  
田建军, 张开屏, 靳焯, 等. 乳酸菌对胆固醇代谢调控的物质基础研究进展[J]. 食品科学, 2018[2018-12-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20181218.1334.058.html>
- [14] Zhao HF, Zhou F, Qi YQ, et al. Screening of lactobacillus strains for their ability to bind benzo(a)pyrene and the mechanism of the process[J]. Food and Chemical Toxicology, 2013, 59: 67-71
- [15] Rafter J. Lactic acid bacteria and cancer: mechanistic perspective[J]. British Journal of Nutrition, 2002, 88(S1): S89-S94
- [16] Bolognani F, Rumney CJ, Rowland IR. Influence of carcinogen binding by lactic acid-producing bacteria on tissue distribution and *in vivo*, mutagenicity of dietary carcinogens[J]. Food and Chemical Toxicology, 1997, 35(6):535-545
- [17] Fuchs S, Sontag G, Stidl R, et al. Detoxification of patulin and ochratoxin A, two abundant mycotoxins, by lactic acid bacteria[J]. Food and Chemical Toxicology, 2008, 46(4): 1398-1407
- [18] Pizzolitto RP, Salvano MA, Dalcero AM. Analysis of fumonisin B<sub>1</sub> removal by microorganisms in co-occurrence with aflatoxin B<sub>1</sub> and the nature of the binding process[J]. International Journal of Food Microbiology, 2012, 156(3): 214-221
- [19] Lahtinen SJ, Haskard CA, Ouwehand AC, et al. Binding of aflatoxin B<sub>1</sub> to cell wall components of *Lactobacillus rhamnosus* strain GG[J]. Food Additives & Contaminants, 2004, 21(2): 158-164
- [20] El-Nezami H, Mykkänen H, Kankaanpää P, et al. Ability of *Lactobacillus* and *Propionibacterium* strains to remove aflatoxin B, from the chicken duodenum[J]. Journal of Food Protection, 2000, 63(4): 549-552
- [21] Jiang AM. Technology of Meat Products[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1996: 147-148,161 (in Chinese)  
蒋爱民. 肉制品工艺学[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1996: 147-148,161
- [22] Peng T, Chen HL, Song Q. Detection and analysis of benzo(a)pyrene in barbecued meat[J]. China Food Safety Magazine, 2017(36): 81-82 (in Chinese)  
彭涛, 陈海龙, 宋巧. 烤肉中苯并(a)芘的检测分析[J]. 食品安全导刊, 2017(36): 81-82
- [23] Sekine K, Toida T, Saito M, et al. A new morphologically characterized cell wall preparation (whole peptidoglycan) from *Bifidobacterium infantis* with a higher efficacy on the regression of an established tumor in mice[J]. Cancer Research, 1985, 45(3): 1300-1307
- [24] Zhao LL, Wei JY, Zhao HF, et al. Detoxification of cancerogenic compounds by lactic acid bacteria strains[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2018, 58(16): 2727-2742
- [25] Kuharić Ž, Jakopović Ž, Čanak I, et al. Removing aflatoxin M1 from milk with native lactic acid bacteria, centrifugation, and filtration[J]. Arhiv Za Higijenu Rada I Toksikologiju, 2018, 69(4): 334-339
- [26] Turbic A, Ahokas JT, Haskard CA. Selective *in vitro* binding of dietary mutagens, individually or in combination, by lactic acid bacteria[J]. Food Additives & Contaminants, 2002, 19(2): 144-152
- [27] Zoghi A, Khosravi-Darani K, Sohrabvandi S, et al. Patulin removal from synbiotic apple juice using *Lactobacillus plantarum* ATCC 8014[J]. Journal of Applied Microbiology, 2019, 126(4): 1149-1160
- [28] Zhao L, Jin H, Lan J, et al. Detoxification of zearalenone by three strains of *Lactobacillus plantarum* from fermented food *in vitro*[J]. Food Control, 2015, 54: 158-164
- [29] Xu ZY. The colonization of lactobacillus in intestinal tract and adjustment to intestinal flora[D]. Wuxi: Master's Thesis of Jiangnan University, 2006 (in Chinese)  
徐志远. 乳杆菌的肠道定殖和菌群调节作用研究[D]. 无锡: 江南大学硕士学位论文, 2006