

# 高功率脉冲微波协同大豆异黄酮 对牛初乳灭菌效果的研究

许 壮<sup>1,2</sup>, 戴意强<sup>1,2</sup>, 张莉莉<sup>3</sup>, 龚 兰<sup>3</sup>, 印伯星<sup>4</sup>, 王 英<sup>1,2</sup>, 王 冉<sup>3</sup>, 夏秀东<sup>1,2\*</sup>

(1. 江苏省农业科学院 农产品加工研究所, 江苏 南京 210014; 2. 农业农村部农产品冷链物流技术重点实验室, 江苏 南京 210014;  
3. 江苏省农业科学院 农产品质量安全与营养研究所, 江苏 南京 210014; 4. 扬州市市场大康源乳业有限公司, 江苏 扬州 225001)

**摘 要:** 为降低牛初乳中的微生物数量, 同时减少灭菌处理对牛初乳中的免疫球蛋白 G (IgG) 的影响, 通过高功率脉冲微波 (HPPM) 协同大豆异黄酮 (SI) 对牛初乳进行处理, 分析其对牛初乳中的微生物数量和 IgG 的影响。结果表明: 随着 HPPM 处理时间的延长和 SI 添加量的增加, 牛初乳中的微生物数量显著降低, 且 HPPM 处理协同添加 SI 可增强对牛初乳的灭菌作用; 在 HPPM 杀菌时间为 6 min 与 SI 添加量为 0.4% 的条件下, 牛初乳中微生物数量由 5.04 log CFU/mL 降至 2.01 log CFU/mL, IgG 的保留率为 91.6%; 与仅用 HPPM 处理的牛初乳相比, 添加大豆异黄酮的牛初乳中残留微生物的生长延滞期显著延长, 最大比生长速率和最大菌落数均显著降低。研究证明 HPPM 结合 SI 可有效减少牛初乳中微生物数量, 并抑制牛初乳中微生物的生长。

**关键词:** 牛初乳; 免疫球蛋白 G; 大豆异黄酮; 高功率脉冲微波; 生长动力学

**中图分类号:** TS252.41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8581(2022)11-0100-07

## Effect of High Power Pulsed Microwave Combined with Soybean Isoflavones on Sterilization of Bovine Colostrum

XU Zhuang<sup>1,2</sup>, DAI Yi-qiang<sup>1,2</sup>, ZHANG Li-li<sup>3</sup>, GONG Lan<sup>3</sup>, YIN Bo-xing<sup>4</sup>,  
WANG Ying<sup>1,2</sup>, WANG Ran<sup>3</sup>, XIA Xiu-dong<sup>1,2\*</sup>

(1. Institute of Agricultural Product Processing, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China;  
2. Key Laboratory of Cold Chain Logistics Technology for Agro-product, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China; 3. Institute of Food Safety and Nutrition, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 4. Yangzhou Yangda Kangyuan Dairy Co., Ltd., Yangzhou 225001, China)

**Abstract:** In this study, high power pulsed microwave (HPPM) technology and the addition of soybean isoflavones (SI) were applied to reduce the number of microorganisms in colostrum and to minimize the effects of sterilization on colostrum immunoglobulin G (IgG). The effects of these treatments on microbial number and IgG in colostrum were analyzed. The results showed that the number of microorganisms in colostrum decreased with the increase of HPPM treatment time and SI addition. In addition, SI addition could enhance the sterilization effect of HPPM treatment on bovine colostrum. Under the conditions of HPPM sterilization time of 6 min and SI addition of 0.4%, the number of microorganisms in bovine colostrum decreased from 5.04 log CFU/mL to 2.01 log CFU/mL, and the retention rate of IgG was 91.6%. Microorganisms in colostrum sterilized by HPPM combined with the addition of SI showed longer growth delays, lower maximum specific growth rates and lower maximum colony counts of residual microorganisms compared to colostrum treated with HPPM only. This study showed that HPPM treatment combined with SI addition was effective in reducing the number and inhibiting the growth of microorganisms in colostrum.

**Key words:** Bovine colostrum; IgG; Soybean isoflavone; HPPM; Growth kinetics

牛初乳被誉为“大自然真正的白金食品”, 是健康奶牛分娩 72 h 内产的第 1 批牛奶。牛初乳中含有超过 250 种功能活性成分和营养素, 其与常乳相

比, 含有丰富的蛋白质、脂肪、维生素、免疫球蛋白和具有抗菌活性的肽等<sup>[1-3]</sup>。IgG 是牛初乳中主要的免疫球蛋白, 占总免疫球蛋白的 80%~90%<sup>[4]</sup>, 其不

收稿日期: 2022-07-27

基金项目: 江苏现代农业(奶牛)产业技术体系(JATS[2021]440)。

作者简介: 许壮(1995—), 男, 安徽宿州人, 硕士研究生, 研究方向为微生物与生物技术。\*通信作者: 夏秀东。

仅能为人体提供被动免疫,还能调节适应性和先天性免疫系统<sup>[5]</sup>,因此牛初乳中的IgG含量被认为是牛初乳的品质标志。欧盟认为初乳补充剂对人体健康有多种益处<sup>[6]</sup>,初乳能增强人体免疫力和保护胃肠道健康,可能对儿童和成人的各种疾病的治疗有一定价值等<sup>[7-8]</sup>。

牛初乳中富含的营养物质为微生物生长创造了适宜的生长条件。奶牛的生长环境、体表状况以及挤奶过程中的不规范操作,都易造成初乳污染。刚采集的牛初乳中微生物种类繁多且数量大,并在储存期间迅速生长和繁殖,对初乳产品造成潜在的污染风险<sup>[9]</sup>。因此,控制牛初乳中的微生物数量对牛初乳产品的质量和牛初乳产业的发展都极为重要。由于牛初乳中的免疫球蛋白、乳铁蛋白和生长因子等功效成分对温度非常敏感,传统的巴氏杀菌和高温灭菌方式可能会使这些活性物质的活性降低或丧失<sup>[10-11]</sup>。

高功率脉冲微波(High power pulse microwave, HPPM)杀菌技术是一种新兴的非热加工技术,其基本原理是使用相对论电子束产生高功率脉冲波,并通过微波传输系统和谐振腔体作用到物料上<sup>[12-14]</sup>,具有瞬时高能和间歇作用的特点<sup>[15]</sup>,该项技术已被证实可通过非热效应达到杀菌保鲜的作用<sup>[16]</sup>。

大豆生长过程中会形成一种次级代谢产物,即大豆异黄酮(SI),其具有多种生物活性,如预防骨质疏松、抗乳腺癌和抗氧化等<sup>[17-19]</sup>。同时,有研究表明大豆异黄酮具有较好的抑菌活性<sup>[20]</sup>。

本研究以牛初乳为原料,通过高功率脉冲微波杀菌技术协同添加大豆异黄酮,在尽可能保留IgG含量的基础上,杀灭牛初乳中的微生物或抑制其生长,提高牛初乳的生物安全性。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

牛初乳由扬州市大康源乳业有限公司提供,大豆异黄酮(含40%有效成分)购自上海克林生化科技有限公司,PCA培养基购自北京奥博生物技术有限公司,牛IgG酶联免疫试剂盒购自上海酶联生物科技有限公司。

### 1.2 实验仪器

DSX-18L-1手提式高压蒸汽灭菌器(由上海子期实验设备有限公司生产);DKZ-2B电热恒温振荡水槽(由上海精宏实验设备有限公司生产);5420小型离心机(由Eppendorf中国有限公司生

产);DW-HL678超低温冰箱(由中科美菱低温科技公司生产);IS412C恒温培养箱(由浚和(上海)仪器科技有限公司生产);酶标仪TG600(由云铂仪器(成都)有限公司生产);ZX 3涡旋仪(由意大利VELP公司生产);高功率脉冲微波设备(由江苏省农业科学院农产品加工研究所食品生物工程创新团队与南京骅电科技有限公司联合研制)。

### 1.3 试验方法

1.3.1 HPPM处理 将牛初乳平均分装在若干个无菌离心管中,设置牛初乳杀菌初始温度4℃,瞬时输出功率400 kW,输出脉冲宽度5 μs,占空比1:1000,研究不同杀菌时间(0、2、4、6、8、10 min)对牛初乳中微生物数量和IgG保留率的影响。

1.3.2 SI处理 将牛初乳平均分装在若干个无菌离心管中,分别向其中加入0、0.1%、0.2%、0.4%、0.8%、1.0%的大豆异黄酮,充分混匀后,测定牛初乳中微生物数量和IgG保留率。

1.3.3 HPPM结合SI处理 设置高功率脉冲微波的瞬时输出功率为400 kW,输出脉冲宽度为5 μs,占空比1:1000,杀菌时间为6 min,牛初乳杀菌初始温度为4℃,大豆异黄酮添加量为0.4%。以未处理、仅HPPM处理和仅SI处理的牛初乳为对照,研究不同处理条件下牛初乳中微生物数量和IgG保留率的变化。

1.3.4 牛初乳中微生物数量的测定 参照夏秀东等<sup>[21]</sup>的试验方法,用0.85%的生理盐水对样品进行10倍梯度稀释,取1 mL的稀释液均匀涂抹在PCA培养基上,培养1~2 d,记录菌落总数。

1.3.5 牛初乳中IgG保留率的测定 牛初乳用pH值为7.2的PBS溶液稀释20倍,其IgG含量的测定参照产品使用说明书,简要操作步骤如下:标准品按要求稀释;将待测样品及标准品按要求进行加样;37℃温育30 min后洗板;甩干加酶标试剂,重复温育洗板操作;加入显色液后避光在37℃条件下温育10 min,加入终止液后在15 min内测定。IgG保留率的计算公式为:

$$RR(\%) = \frac{R_n}{R_0} \times 100\% \quad (1)$$

式(1)中: $R_n$ 为不同添加量SI牛初乳中IgG含量, $R_0$ 为对照组IgG含量,RR为IgG保留率。

1.3.6 牛初乳中微生物生长动力学分析 向无菌锥形瓶中准确量取定量牛初乳,SI(0.4%)和HPPM(6 min)组合处理牛初乳,混合均匀,将样品分别置

于 37、25、4 ℃ 培养箱培养 24 h, 研究仅 HPPM 处理及 HPPM 和 SI 联合处理后牛初乳中微生物的生长

变化。参考 Gompertz 方程<sup>[22]</sup>稍作修改, 对微生物生长动态进行描述, 本文应用的方程为:

$$\log N(t) = \log(N_{\max} - N_0) + N_{\max} \times \exp \left\{ -\exp \left[ 2.718 \times \frac{\mu_{\max}}{N_{\max}} \times (lag - t) + 1 \right] \right\} \quad (2)$$

式(2)中,  $N(t)$  为  $t$  时的菌数,  $N_0$  为初始菌数,  $N_{\max}$  为最大菌数,  $\mu_{\max}$  为微生物生长的最大比生长速率,  $lag$  为微生物生长的延滞时间。

1.3.7 数据处理 试验结果经过 3 次重复测定得到, 结果表示为“平均值 ± 标准差”。不同处理之间的显著性差异采用单因素方差分析 ANOVA 和 Duncan 多重比较 ( $P < 0.05$ )。分别应用 SPSS 22.0 软件和 Origin 2021 软件对数据进行统计分析和绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 HPPM 杀菌处理时间对牛初乳中微生物数量及 IgG 保留率的影响

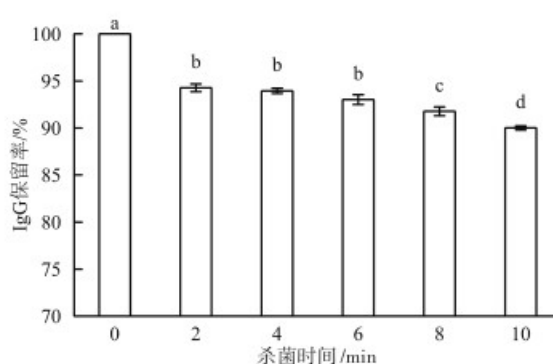
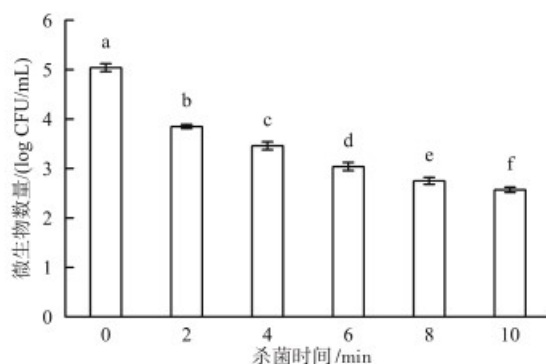


图1 高功率脉冲微波不同杀菌时间对牛初乳中微生物数量和 IgG 保留率的影响

### 2.2 SI 添加量对牛初乳中 IgG 保留率及微生物数量的影响

为确定 SI 的最佳添加量, 研究了不同 SI 添加量对牛初乳中的微生物数量和 IgG 保留率的影响。由图 2 可知, 0.1%~0.2% 的 SI 添加量可将牛初乳中微生物数量减少约 70%; 0.4%~0.8% 的 SI 添加量可将牛初乳中微生物数量减少 88%; 当 SI 添加量增加到 1.0% 时, 牛初乳中微生物数量减少了约

92%。同时, 随着 SI 添加量的增加, 牛初乳中 IgG 保留率也逐渐降低。当 SI 添加量低于 0.4% 时, 牛初乳中 IgG 保留率保持在 90% 以上, 而随着 SI 添加量的进一步增加, 牛初乳中 IgG 保留率降低到 90% 以下。当 SI 添加量为 1% 时, 牛初乳中 IgG 保留率仅为 74.4%。综上, 为有效抑制牛初乳中微生物, 同时减少对牛初乳中 IgG 含量的影响, 设定最适的 SI 添加量为 0.4%。

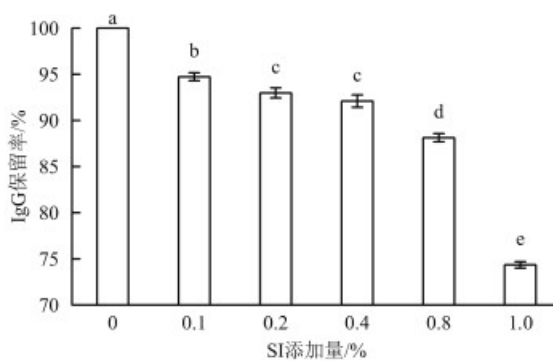
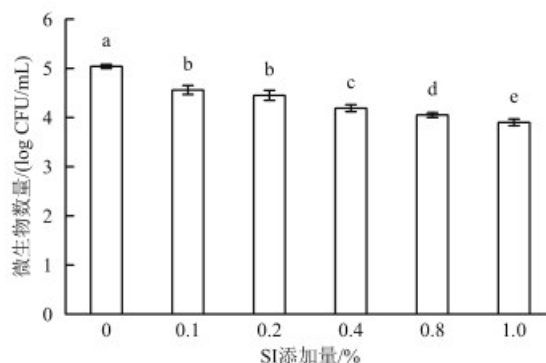
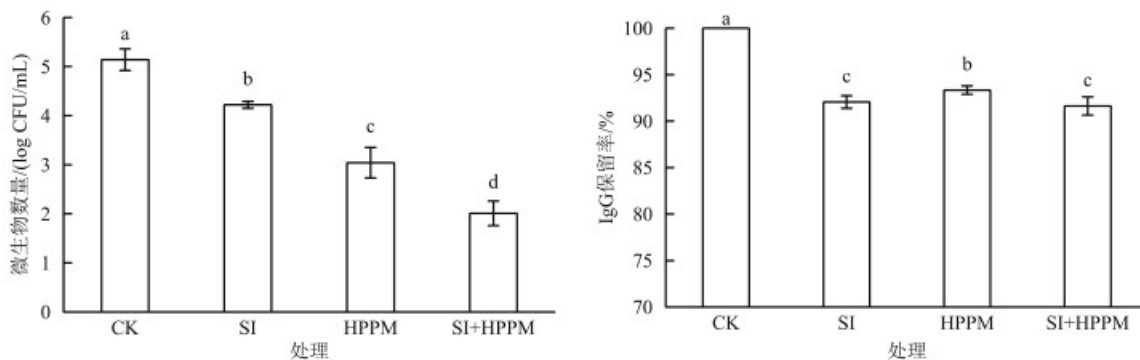


图2 不同大豆异黄酮添加量对牛初乳中微生物数量和 IgG 保留率的影响

### 2.3 HPPM协同SI对牛初乳微生物数量和IgG保留率影响

由图3可知, HPPM结合SI处理比单独应用HPPM或SI处理具有更好的杀菌效果。在SI添加

量为0.4%、HPPM处理6 min的条件下, 牛初乳中的微生物数量由5.04 log CFU/mL减少到2.01 log CFU/mL, 相比CK组降低了3.03 log CFU/mL。同时, IgG保留率仍然保持在90%以上。



CK: 无处理; SI: 添加0.4%大豆异黄酮; HPPM: 经高功率脉冲微波处理6 min; SI+HPPM: 高功率脉冲微波处理6 min, 大豆异黄酮添加量为0.4%。下同。

图3 不同杀菌处理方式对牛初乳中微生物数量和IgG保留率的影响

### 2.4 HPPM协同SI处理牛初乳中残留微生物的生长动力学分析

2.4.1 微生物菌落计数分析 牛初乳中的营养物质丰富, 微生物在牛初乳中极易快速生长, 易产生生物安全风险。因此, 分析灭菌后牛初乳中残留微生物的生长状况对于指导牛初乳加工和运输非常重要。如图4所示, 仅HPPM处理和经HPPM协同SI处理的牛初乳中的微生物生长动态用修正的Gompertz方程描述。牛初乳中微生物生长呈现典

型的S形曲线, 且拟合所得的相关系数 $R^2$ 均较高(表1)。仅HPPM处理和经HPPM结合SI处理后的牛初乳中的微生物在25℃和37℃条件下, 经过一段延滞期后迅速增长, 并于16 h内达到平台期。同时, 对残留微生物在4℃条件下的生长状况进行了分析(图4), 发现仅经过HPPM处理的牛初乳中的微生物呈现持续缓慢增长的趋势, 而HPPM协同SI处理后的牛初乳中的微生物呈现出前4 h进一步减少, 此后再缓慢增长的趋势。

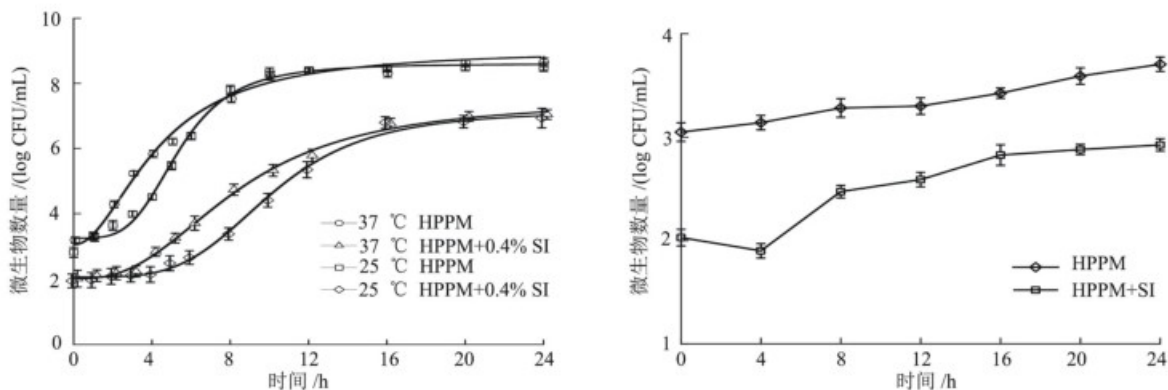


图4 不同温度和杀菌处理下牛初乳中微生物的生长曲线

2.4.2 牛初乳中微生物的生长动力学参数分析 为进一步分析HPPM协同SI处理后牛初乳中的微生物生长状况, 对25℃和37℃条件下微生物生长动力学参数进行分析(表1)。与仅经过HPPM处理的牛初乳中微生物生长相比, HPPM结合SI处理后的牛初乳不仅微生物数量进一步减少, 而且微生物的延滞期进一步延长, 生长速率和最大菌落数均

显著降低。在37℃条件下, 仅经过HPPM处理的牛初乳中微生物的生长延滞期为0.50 h, 最大比生长速率为 $0.8752 \text{ h}^{-1}$ , 最大菌落数为 $8.61 \text{ log CFU/mL}$ ; 而HPPM协同SI处理后的牛初乳中微生物生长延滞期则延长至3.21 h, 最大比生长速率降低到 $0.3399 \text{ h}^{-1}$ , 最大菌落数仅为 $7.26 \text{ log CFU/mL}$ 。在25℃条件下, 仅经过HPPM处理的牛初乳中微生物生

长延滞期为 1.90 h, 最大比生长速率为  $0.9214 \text{ h}^{-1}$ , 最大菌落数为  $8.58 \log \text{ CFU/mL}$ ; 而 HPPM 协同 SI 处理后的牛初乳中微生物生长延滞期则延长至 3.85 h, 最大比生长速率降低到  $0.4818 \text{ h}^{-1}$ , 最大菌落数

仅为  $7.22 \log \text{ CFU/mL}$ 。以上结果说明, 添加大豆异黄酮不仅进一步减少了经 HPPM 处理牛初乳中的微生物数量, 而且进一步抑制了残留微生物的生长。

表 1 微生物生长动力学参数

| 温度/℃ | HPPM/min | SI/% | $\mu_{\max}/(\text{h}^{-1})$ | Lag/h | $\log N_0/[\log(\text{CFU/mL})]$ | $\log N_{\max}/[\log(\text{CFU/mL})]$ | $R^2$ |
|------|----------|------|------------------------------|-------|----------------------------------|---------------------------------------|-------|
| 37   | 6        | 0    | 0.8752                       | 0.50  | 3.04                             | 8.61                                  | 0.99  |
| 37   | 6        | 0.40 | 0.3399                       | 3.21  | 2.01                             | 7.26                                  | 0.98  |
| 25   | 6        | 0    | 0.9214                       | 1.90  | 3.04                             | 8.58                                  | 0.99  |
| 25   | 6        | 0.40 | 0.4818                       | 3.85  | 2.01                             | 7.22                                  | 0.99  |

### 3 讨论与结论

牛初乳含有丰富的营养成分和免疫球蛋白、乳铁蛋白等活性成分, 已被用于多种食品和膳食补充剂中。然而, 受奶牛生长环境、挤奶设备、储存器具等因素的影响, 牛初乳中含有大量的微生物。研究发现, 导致牛初乳污染的微生物包括副结核、支原体属、大肠杆菌和沙门氏菌属、葡萄球菌等<sup>[23-25]</sup>。这些病原体通常起源于乳腺, 在挤奶期间污染牛初乳, 并在储存期间生长, 会对产品造成潜在生物安全风险<sup>[9,26]</sup>。目前对牛初乳中微生物杀菌主要为膜分离灭菌、高压电场、加热杀菌 3 种方式。徐思思<sup>[27]</sup>研究表明, 膜分离杀菌可以有效截留牛初乳中的细菌和体细胞, 保持初乳原有的风味, 但 IgG 保留率随着进料速率的增加呈先上升后急剧下降的趋势, IgG 损失率超过 15%; Elfstrand<sup>[28]</sup> 和 Stabel<sup>[29]</sup> 等人的研究表明, 尽管巴氏瞬时杀菌 (HTST) 可以杀灭牛初乳中大多数病原体, 但牛初乳的品质也显著降低, 特别是牛初乳中的 IgG 含量降低了约 25%。此外, 在巴氏杀菌过程中或之后, 显著增加了流体的黏度, 影响了牛初乳的产品品质。因此采用合理的杀菌技术对于牛初乳的质量尤为重要。高功率脉冲 (HPP) 杀菌是近年来发展起来的一项新技术<sup>[30-31]</sup>, 已被证实是一种效果较好的非热杀菌技术。贾健辉等<sup>[32]</sup>研究发现, 利用高功率脉冲电场对牛初乳进行杀菌处理, 具有一定的杀菌效果, 且杀菌率与电场强度呈正相关, 但缺乏对牛初乳中 IgG 含量的分析。本研究利用 HPPM 处理牛初乳, 当 HPPM 瞬时输出功率 400 kW, 输出脉冲宽度 5  $\mu\text{s}$ , 占空比 1:1000, 处理 10 min 以内时, 随着处理时间的延长, 杀菌效果也随之增强, IgG 保留率可维持在 90% 以上。

一些植物的提取物已被证实可以作为天然的抑菌剂, 如大豆、花椒、大蒜、甘草、连翘等的提取

物已被报道具有抑菌活性<sup>[33-34]</sup>。大豆异黄酮是大豆生长过程中产生的重要次级代谢物, 大量研究证明大豆异黄酮具有广谱抑菌效果<sup>[35-36]</sup>。Yin 等<sup>[37]</sup>研究发现 1.8 mg/mL 的大豆异黄酮对 *P. aeruginosa* PAO1 和 *C. violaceum* 026 具有良好的抑菌效果。Dhayakaran 等<sup>[38]</sup>研究发现, 大豆异黄酮对单增李斯特菌、大肠杆菌和金黄色葡萄球菌等致病菌具有抗菌和抑制生物膜生成的作用。王海涛等<sup>[35]</sup>的研究表明, 大豆异黄酮对真菌和细菌有较强的抑制作用, 大豆异黄酮的抑菌作用随其浓度升高而增强。本文研究了大豆异黄酮不同添加量对牛初乳中微生物抑制的影响。结果表明, 随着大豆异黄酮添加量的增加, 灭菌效果逐渐增强。

天然抑菌物质与物理灭菌的联合使用已被证明是一种有效的灭菌方式, Wang 等<sup>[39]</sup>研究表明: 柚皮素与脉冲电场协同处理对果汁中的大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的灭活存在增效作用, 且柚皮素浓度越高、场强越大其协同效应越明显。本研究采用 HPPM 协同 SI 对牛初乳进行处理, 结果表明: HPPM 协同 SI 可明显增强对牛初乳中微生物的杀灭效果, 且 SI 添加量 4%、HPPM 处理时间 6 min 条件下牛初乳中微生物数量由  $5.04 \log \text{ CFU/mL}$  减少到  $2.01 \log \text{ CFU/mL}$ , 且 IgG 保留率仍超过 90%, 证明了 HPPM 协同 SI 可对牛初乳进行灭菌, 且对牛初乳中 IgG 的影响较小。进一步的生长动力学参数分析发现, 添加大豆异黄酮的牛初乳与未添加大豆异黄酮的牛初乳相比, 不仅微生物数量进一步减少, 而且残留微生物延滞期进一步延长, 最大比生长速率、最大菌落数均显著降低, 说明大豆异黄酮不仅有灭菌作用, 而且还可抑制残留微生物的生长。

本文研究了高功率脉冲微波协同大豆异黄酮对牛初乳的灭菌效果和对牛初乳中 IgG 含量的影

响, 试验结果表明: 随着HPPM杀菌时间延长和SI添加量的增加, 牛初乳中的微生物含量显著减少, 当HPPM杀菌时间为6 min、SI添加量为0.4%时, 牛初乳中微生物数量由5.04 log CFU/mL降至2.01 log CFU/mL, 且IgG保留率为91.6%。高功率脉冲微波协同大豆异黄酮杀菌技术为牛初乳灭菌提供了新的方向, 也为天然抑菌物质与物理灭菌的联合使用提供了参考。

### 参考文献:

- [1] Godhia M L, Patel N. Colostrum—its composition, benefits as a nutraceutical: A review [J]. *Current Research in Nutrition and Food Science Journal*, 2013, 1(1): 37–47.
- [2] Stelwagen K, Carpenter E, Haigh B, et al. Immune components of bovine colostrum and milk [J]. *Journal of animal science*, 2009, 87(13 Suppl): 3–9.
- [3] Khan Z, Macdonald C, Wicks A C, et al. Use of the ‘nutriceutical’, bovine colostrum, for the treatment of distal colitis: Results from an initial study [J]. *Alimentary Pharmacology and Therapeutics*, 2002, 16(11): 1917–1922.
- [4] Godden S M, Lombard J E, Woolums A R. Colostrum management for dairy calves [J]. *The Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice*, 2019, 35(3): 535–556.
- [5] Ulfman L H, Leusen J H W, Savelkoul H F J, et al. Effects of bovine immunoglobulins on immune function, allergy, and infection [J]. *Frontiers in Nutrition*, 2018, 5: 52.
- [6] 赵红宇, 周盛华, 景志刚, 等. 液态牛初乳功能性食品开发及应用前景 [J]. *食品安全导刊*, 2022(2): 125–127.
- [7] Panahi Y, Falahi G, Falahpour M, et al. Bovine colostrum in the management of nonorganic failure to thrive: A randomized clinical trial [J]. *Journal of Pediatric Gastroenterology and Nutrition*, 2010, 50(5): 551–554.
- [8] Playford R J, MacDonald C E, Calnan D P, et al. Coadministration of the health food supplement, bovine colostrum, reduces the acute non-steroidal anti-inflammatory drug-induced increase in intestinal permeability [J]. *Clinical Science*, 2001, 100(6): 627–633.
- [9] McGuirk S M, Collins M. Managing the production, storage, and delivery of colostrum [J]. *Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice*, 2004, 20(3): 593–603.
- [10] Buttar H S. Health benefits of bovine colostrum in children and adults [M]// Watson R R. *Dairy in human health and disease across the lifespan*. Amsterdam: Elsevier, 2017: 3–20.
- [11] Silva E G S O, Rangel A H D N, Murmam L, et al. Bovine colostrum: Benefits of its use in human food [J]. *Food Science and Technology*, 2019, 39(suppl 2): 355–362.
- [12] Fini A, Breccia A. Chemistry by microwaves [J]. *Pure and Applied Chemistry*, 1999, 71(4): 573–579.
- [13] Dudley G B, Richert R, Stiegman A E. On the existence of and mechanism for microwave-specific reaction rate enhancement [J]. *Chemical Science*, 2015, 6(4): 2144–2152.
- [14] Kabab C P, Carmean R N, Sumerlin B S. Probing the surface-localized hyperthermia of gold nanoparticles in a microwave field using polymeric thermometers [J]. *Chemical Science*, 2015, 6(10): 5662–5669.
- [15] Tayebbeh Z, Abdollah J, Saeid K, et al. The effect of short-time microwave exposures on *Listeria monocytogenes* inoculated onto chicken meat portions [J]. *Veterinary research forum*, 2015, 6(2): 173–176.
- [16] 张亚新, 王帆, 傅青, 等. 气调包装协同高功率脉冲微波对河蟹肉储藏期品质影响研究 [J]. *食品工业科技*, 2022, 43(10): 134–139.
- [17] 何恩铭, 沈瑞池, 林志楷, 等. 大豆异黄酮抗肿瘤效应研究进展 (综述) [J]. *亚热带植物科学*, 2013, 42(4): 356–360.
- [18] Liu Y T, Chen Y H, Uramaru N, et al. Soy isoflavones reduce acetaminophen-induced liver injury by inhibiting cytochrome P-450-mediated bioactivation and glutathione depletion and increasing urinary drug excretion in rats [J]. *Journal of Functional Foods*, 2016, 26: 135–143.
- [19] Markovic R, Baltic M Z, Pavlovic M, et al. Isoflavones—from biotechnology to functional foods [J]. *Procedia Food Science*, 2015, 5: 176–179.
- [20] Naim M, Gestetner B, Zilkah S, et al. Soybean isoflavones: Characterization, determination, and antifungal activity [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1974, 22(5): 806–810.
- [21] 夏秀东, 刘小莉, 王英, 等. 白鱼腐败细菌的分离与鉴定 [J]. *食品科学*, 2015, 36(21): 175–179.
- [22] Zwietering M H, Jongenburger I, Rombouts F M, et al. Modeling of the bacterial growth curve [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1990, 56(6): 1875–1881.
- [23] Streeter R N, Hoffsis G F, Bech N S, et al. Isolation of *Mycobacterium paratuberculosis* from colostrum and milk of subclinically infected cows [J]. *American Journal of Veterinary Research*, 1995, 56(10): 1322–1324.
- [24] Gonzalez R N, Wilson D J. Mycoplasmal mastitis in dairy herds [J]. *The Veterinary Clinics of North America Food Animal Practice*, 2003, 19(1): 199–221.
- [25] Houser B A, Donaldson S C, Kehoe S I, et al. A survey of bacteriological quality and the occurrence of *Salmonella* in raw bovine colostrum [J]. *Foodborne Pathogens and*

- Disease, 2008, 5(6): 853–858.
- [26] Fecteau G, Baillargeon P, Higgins R, et al. Bacterial contamination of colostrum fed to newborn calves in Quebec dairy herds [J]. The Canadian Veterinary Journal, 2002, 43(7): 523–527.
- [27] 徐思思. 牛初乳粉制备中稳定性保护关键技术研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2016: 19–26.
- [28] Elfstrand L, Lindmark M H, Paulsson M, et al. Immunoglobulins, growth factors and growth hormone in bovine colostrum and the effects of processing [J]. International Dairy Journal, 2002, 12(11): 879–887.
- [29] Stabel J R, Hurd S, Calvente L, et al. Destruction of *Mycobacterium paratuberculosis*, *Salmonella* spp., and *Mycoplasma* spp. in raw milk by a commercial on-farm high-temperature, short-time pasteurizer [J]. Journal of Dairy Science, 2004, 87(7): 2177–2183.
- [30] Pedro E M, Isabel O S, Gemma O O, et al. Effects of pulsed electric fields processing strategies on health-related compounds of plant-based foods [J]. Food Engineering Reviews, 2017, 9(3): 213–225.
- [31] Garcia D, Gomez N, Manas P, et al. Pulsed electric fields cause bacterial envelopes permeabilization depending on the treatment intensity, the treatment medium pH and the microorganism investigated [J]. International Journal of Food Microbiology, 2007, 113(2): 219–227.
- [32] 贾健辉, 于国萍. 高压脉冲电场对牛乳杀菌效果的研究 [J]. 乳业科学与技术, 2007(5): 221–223, 238.
- [33] Gwinn K D. Bioactive natural products in plant disease control [J]. Studies in Natural Products Chemistry, 2018, 56: 229–246.
- [34] 谢俊杰, 钟青萍, 许杨, 等. 天然抗菌物在食品防腐中的应用 [J]. 中国食品添加剂, 2001(1): 27–29.
- [35] 王海涛. 大豆异黄酮的抑菌活性及其机制的研究 [D]. 大连: 辽宁师范大学, 2009: 11–14.
- [36] 石治强, 吴雨珊, 杨文钰, 等. 大豆异黄酮抑菌的研究进展 [J]. 大豆科学, 2011, 30(6): 1047–1050.
- [37] Yin L Q, Zhang Y Z, Azi F, et al. Inhibition of biofilm formation and quorum sensing by soy isoflavones in *Pseudomonas aeruginosa* [J]. Food Control, 2022, 133(Part B): 108629.
- [38] Dhayakaran R P A, Neethirajan S, Xue J, et al. Characterization of antimicrobial efficacy of soy isoflavones against pathogenic biofilms [J]. LWT, 2015, 63(2): 859–865.
- [39] Wang L H, Wen Q H, Zeng X A, et al. Influence of naringenin adaptation and shock on resistance of *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli* to pulsed electric fields [J]. LWT, 2019, 107: 308–317.

(责任编辑: 李聪)