

ϵ -PL-SHMP 聚合物对巴氏杀菌乳品质的影响

孟岳成¹, 嵇紫扬¹, 陈杰¹, 李延华^{1,2*}, 王晓璐¹

¹浙江工商大学食品与生物工程学院 杭州 310018

²浙江省微生物重点实验室 杭州 310018

摘要 ϵ -聚赖氨酸(ϵ -PL)是一种常见的天然食品防腐剂。本文分析 ϵ -聚赖氨酸-六偏磷酸钠(ϵ -PL-SHMP)聚合物对巴氏杀菌乳的抑菌效果,以及对乳体系理化性质的影响。结合 SDS-PAGE 图谱、稳定性分析乳中蛋白质的变化。结果表明,在 1 周贮藏期内, ϵ -PL-SHMP 聚合物相较于空白组对牛乳中蜡样芽孢杆菌数量在 7 d 内可控制在 10^6 CFU/mL 以下,金黄色葡萄球菌数量在 3 d 内控制在 10^6 CFU/mL 以下,具有良好的抑制效果。经过 ϵ -PL-SHMP 聚合物处理的巴氏杀菌乳的 pH 值维持在 6.8~6.9 区间,与其它组无显著变化,相对黏度在第 7 天相较于 ϵ -PL 处理组的 0.0008 Pa·s 上升到 0.0012 Pa·s,有轻微增加。SDS-PAGE 图谱显示,随着贮藏时间的延长, ϵ -PL 与牛乳中的蛋白结合并沉淀,而 ϵ -PL-SHMP 聚合物处理组中蛋白质较稳定。对稳定性的分析表明, ϵ -PL 单独处理组的稳定性最差,添加 ϵ -PL-SHMP 聚合物的巴氏杀菌乳体系呈良好的分散状态。结论: ϵ -PL-SHMP 聚合物能够改善 ϵ -PL 在乳体系中的应用品质,对巴氏杀菌乳的抑菌效果更好且提高了该乳体系的稳定性。

关键词 ϵ -聚赖氨酸; 六偏磷酸钠; 聚合物; 巴氏杀菌乳; 品质

文章编号 1009-7848(2026)01-0260-08 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2026.01.023

随着人们对食品质量与安全要求的日益提高,世界各国食品工业界越来越重视天然食品防腐剂的使用。 ϵ -聚赖氨酸(ϵ -Polylysine, ϵ -PL)在 1977 年被 Shima 和 Sakai 首次提取,是白色链霉菌的主要次生代谢产物^[1],具有抗菌性强^[2],水溶性好且安全无毒^[3]的特点。一般来说, ϵ -PL 由 25~35 个 L-赖氨酸残基通过 ϵ -氨基和 α -羧基脱水缩合形成肽键而聚合,在水中发生氨基质子化而带电荷,作用于多种微生物的细胞膜和细胞壁系统,导致细胞结构被逐渐破坏而死亡^[4]。 ϵ -聚赖氨酸能够分解为赖氨酸,对人体无副作用,也可作为机体中赖氨酸的来源^[5]。六偏磷酸钠(Sodium hexametaphosphate,SHMP)是一种六聚体,在水溶液中能够被水解成简单的磷酸盐,具有良好的生物相容性,可以存在于任何生物体的细胞膜上^[6]。由于它具有无毒,易形成凝胶的特点,通常被用作离子交联剂^[7],也可用于研究其载药和释药行为^[8]。六偏磷酸钠作为稳定剂被广泛用于肉制品、乳制品等加工食品中,可以防止食品贮藏或加工过程中发生

一些物理或化学变化,从而影响食品的品质^[9]。

牛乳为人类重要饮食,因内在或外在因素而导致微生物的生长和繁殖,进而引发产品腐败。目前牛乳杀菌大都采用巴氏杀菌法^[10],然而巴氏杀菌乳的贮藏期很大程度上受到原料乳中微生物初始数量以及贮藏时间的影响。研究天然抑菌剂在巴氏杀菌乳中的应用,使其免受微生物的污染至关重要。本研究将 ϵ -聚赖氨酸-六偏磷酸钠(ϵ -Polylysine -sodium hexametaphosphate, ϵ -PL-SHMP)聚合物应用于巴氏杀菌乳,通过微生物指标评估该聚合物在乳中的抑菌效果,分析贮藏期间乳体系理化指标和稳定性的变化,以期拓宽 ϵ -PL 及其聚合物的应用领域。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂 聚赖氨酸盐酸盐(食品纯级),浙江新银象生物工程有限公司;六偏磷酸钠(分析纯级),上海麦克林生化试剂有限公司;0.22 μ m(水系)微孔滤膜,上海兴亚净化材料厂;脱脂乳粉(食品纯级),郑州市伟丰生物科技有限公司;平板计数琼脂(PCA),青岛海博生物技术有限公司;2- β 巯基乙醇(电泳级)、TEMED(电泳级),麦克

收稿日期: 2024-12-18

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31871830)

第一作者: 孟岳成,男,博士,教授

通信作者: 李延华 E-mail: liyanhua607@163.com

林生化科技有限公司;考马斯亮蓝染色液 (Bio-Safe™)、10× Tris/Glycine/SDS 缓冲液、4× Laemmli 上样缓冲液,美国 BIO-RAD 公司;蜡样芽孢杆菌 (*Bacillus cereus*)、金黄色葡萄球菌 (*Staphylococcus aureus*) 均来自本实验室保藏菌种。

1.1.2 仪器与设备 电子分析天平 PL2002,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;数显恒温磁力搅拌器 31079,江苏省金坛市江南仪器厂;510 pH 计,新加坡优特仪器有限公司;Turbiscan Lab 全能稳定性分析仪,北京朗迪森科技有限公司;CR-400 手持色差仪,日本柯尼卡美能达公司;Mini-PROTEAN® Tetra 电泳仪,美国 BIO-RAD 公司;MLS-530 立式灭菌锅,重庆雅马拓科技有限公司;9721-R 乌氏粘度计,上海默西科学仪器有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 ϵ -PL-SHMP 聚合物的制备 参照郭亮^[11]的方法,称取一定质量的 ϵ -PL 和 SHMP 样品粉末溶于去离子水中,使用磁力搅拌器搅拌 30 min 使之水合,随后将溶液用 0.22 μm 滤膜过滤,以得到储备溶液。将两种溶液在室温下按照不同配比混合,以 800 r/min 搅拌 2 h,最终获得不同质量比的 ϵ -PL-SHMP 聚合物溶液。

1.2.2 巴氏杀菌乳的制备 配制原料乳利用巴氏杀菌法灭菌^[12],向每组巴氏杀菌乳中加入不同配比的聚合物溶液,添加去离子水作为空白对照组,添加 ϵ -PL 为阳性对照组,聚合物浓度以 ϵ -PL 质量浓度计为 320 mg/mL。将样品密封好贮存于 4 °C 冰箱中。

1.2.3 巴氏杀菌乳中菌落总数的测定 利用平板计数琼脂法测定贮藏期间巴氏杀菌乳的菌落总数^[13],分别在 0,1,2,3,4,5,6,7,8 d 时取样,逐级稀释至平板上培养的单菌落约为 20~200 个,每个测量做 3 个平行,取稀释好的样品 100 μL 加入平板,随后倒入灭菌的平板计数琼脂,于 37 °C 下培养 48 h。

1.2.4 ϵ -PL-SHMP 聚合物对巴氏杀菌乳中蜡样芽孢杆菌和金黄色葡萄球菌生长的影响 按照上述方法制备添加聚合物的巴氏杀菌乳样品,分别向巴氏杀菌乳中接种蜡样芽孢杆菌 (*B. cereus*) 和金黄色葡萄球菌 (*S. aureus*),初始接种量约为 10^3

CFU/mL。放于 4 °C 冰箱中贮存,每天取样。将稀释到合适梯度的样品加入平板中 100 μL ,倒入营养琼脂培养基测定牛乳中蜡样芽孢杆菌和金黄色葡萄球菌的菌落数。

1.2.5 ϵ -PL-SHMP 聚合物对巴氏杀菌乳 pH 值的影响 在贮存期间,每天取样用 pH 计测定 pH 值的变化,每个样品 3 个平行。

1.2.6 巴氏杀菌乳的相对黏度 参考 Ning 等^[14]的方法。利用乌氏粘度计监测贮藏过程中添加不同配比聚合物杀菌乳的比黏度的变化。在贮藏期间每天取样,将去离子水作为对照液体,牛乳的比黏度测定通过一定量的液体流出时间与对照液体的流出时间之比来计算。

1.2.7 巴氏杀菌乳中蛋白质的变化 将不同配比的巴氏杀菌乳分为 5 组,分别为去离子水空白对照组,聚赖氨酸阳性对照组,以及 3 种配比的试验组,分别在 0,1,3,5 d 取样,利用 SDS-PAGE 聚丙烯酰胺凝胶电泳测定牛乳中总蛋白的变化。去离子水将样品进行 5 倍稀释,将样品与样品缓冲液按体积比 1:3 混合。所用的浓缩胶和分离胶的浓度分别为 5% 和 12%,运行电流分别为 80 mA 和 150 mA。待跑胶结束后用考马斯亮蓝 R-250 染色 2 h,再用脱色剂脱色,即能够看到清晰的条带^[15]。

1.2.8 巴氏杀菌乳的稳定性分析 利用稳定性分析仪分析加入了聚合物的杀菌乳的稳定性,取制备好的样品 20 mL 加入样品瓶中扫描,保证操作过程及器皿是无菌的。参数设置为:温度 37 °C,扫描间隔 2 h。

1.2.9 巴氏杀菌乳色度的测定 利用手持色差仪评价在贮藏期间牛乳色度的变化,在贮藏期间每天取样 5 mL 放入一次性培养皿中,用色差仪记录 CIE LAB 值 (L^* , a^* , b^*)^[16]。

$$\Delta E^* = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2} \quad (1)$$

式中: L^* 为亮度; a^* 为红绿度; b^* 为黄蓝色。

1.3 数据统计分析

每组试验设置 3 个平行,数据结果采用 Microsoft Excel 2016 统计和计算,数据结果表示为“平均值±标准偏差”,用 SPSS 进行单因素 ANOVA 分析和显著性分析 ($P < 0.05$),用 Origin 2018 作图。

2 结果与分析

2.1 ϵ -PL-SHMP 聚合物对巴氏杀菌乳中菌落总数的影响

通过对不同贮藏时间以及不同处理组的巴氏杀菌乳中菌落总数的测定,可以得到图 1,空白对照组在第 3 天时,菌落总数接近 10^4 CFU/mL,在第 4 天时,已经超过 10^4 CFU/mL,而添加 ϵ -PL 的阳性对照组以及添加聚合物的试验组,能在 1 周内保持菌落总数 $<10^4$ CFU/mL,同时菌落总数的增长速率明显低于空白处理组中菌落总数的增长 ($P < 0.05$),表明聚合物能够较好地抑制乳体系中菌落总数的生长。

2.2 ϵ -PL-SHMP 聚合物对巴氏杀菌乳中蜡样芽孢杆菌和金黄色葡萄球菌生长的影响

向牛乳中接种蜡样芽孢杆菌和金黄色葡萄球菌,初始接种量约为 10^3 CFU/mL,由图 2a 可知,空白对照组在前 3 d 的生长速度最快,在第 3 天后生长缓慢,基本稳定在 $10^8 \sim 10^9$ CFU/mL,同时空白对照组的菌落数显著高于添加聚合物组 ($P < 0.05$);阳性对照组单独使用 ϵ -PL,由于 ϵ -PL 是聚阳离子化合物,会与牛乳中阴离子结合,生成沉淀并减弱抑菌效果,因此在贮藏期间蜡样芽孢杆菌和金

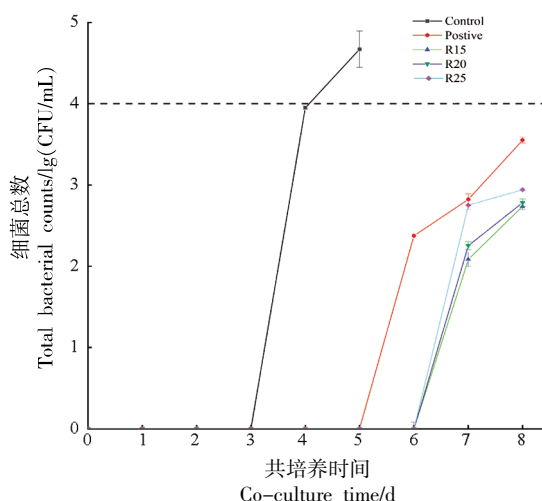


图 1 不同处理对巴氏杀菌乳中菌落总数的影响
Fig.1 Effects of different treatments on the total number of colonies in pasteurized milk

黄色葡萄球菌的数量一直处于增加状态。3 种比例的聚合物对两种菌的抑制效果具有类似的趋势,不同的是在聚合物的作用下,蜡样芽孢杆菌的数量能在 7 d 内保持在 10^6 CFU/mL 以下,而金黄色葡萄球菌的数量在第 3 天之后超过了 10^6 CFU/mL,因此聚合物对蜡样芽孢杆菌的抑制效果更好。

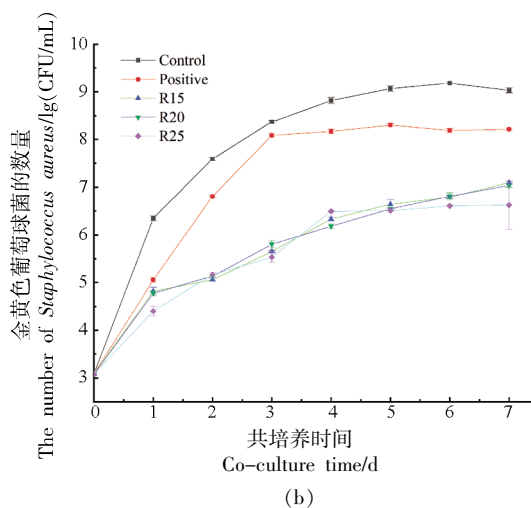
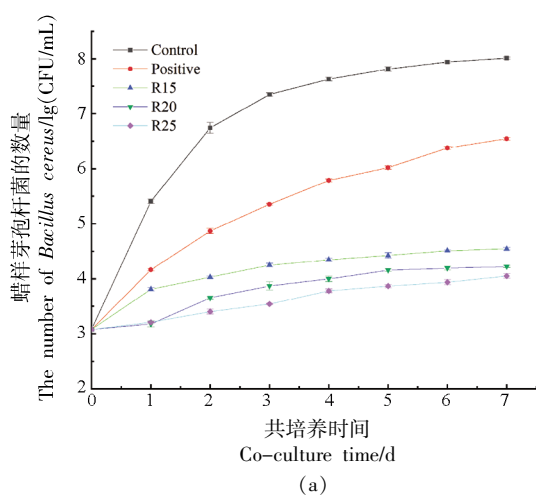


图 2 不同 ϵ -PL-SHMP 聚合物处理对巴氏杀菌乳中蜡样芽孢杆菌(a)和金黄色葡萄球菌(b)的影响

Fig.2 Effect of different ϵ -PL-SHMP polymer treatments on *B. cereus* (a) and *S. aureus* (b) in pasteurized milk

2.3 贮藏期间巴氏杀菌乳 pH 值的变化

巴氏杀菌乳在贮藏期间如果发生酸度升高的现象,则会使牛乳产品的质量大大下降。牛乳 pH

值下降最主要的一个原因是其中的微生物发酵产生乳酸^[7]。当牛乳的 pH 值低于 4.6 时,就可能造成酪蛋白沉淀,并引起其它理化指标的变化^[8]。经

过不同处理的巴氏杀菌乳,在 4 °C 贮存下的 pH 值变化如图 3 所示。由图可知,随着贮藏时间的延长,巴氏杀菌乳在 1 周内的酸度并无显著变化($P > 0.05$),表明并无明显的腐败现象。

2.4 贮藏过程中巴氏杀菌乳相对黏度的变化

由图 4 可知,用聚合物处理的牛乳随着贮藏时间的延长表现出增加的趋势,而单独用 ϵ -PL 处理的牛乳黏度则表现出减小的趋势;并且用聚合物处理的牛乳黏度在 7 d 时达到 0.012 Pa·s,而 ϵ -PL 处理组的相对黏度在 7 d 时降到 0.008 Pa·s,因此聚合物处理组的相对黏度显著高于 ϵ -PL 处理组($P < 0.05$)。推测黏度增加可能是由于钙离子耗尽,导致胶束水化造成体积度增加,对这一现象的一种解释是,SHMP 作为螯合剂能够降低体系中阳离子的活性及其电荷筛选效应^[19]。因此,分子内斥力、游离果胶的水动力体积和体系的黏度将会增加。在 4 °C 下贮存的样品表现出黏弹性液体的性质,这些是弱凝胶。在贮藏过程中蛋白间的相互作用键持续形成^[20]。

2.5 巴氏杀菌乳在贮藏过程中蛋白质的变化

图 5 由左至右分别是贮藏时间为 0, 1, 3, 5 d 时,测定的蛋白电泳图,可以根据右侧条带标识,发现 ϵ -PL 对巴氏杀菌乳中蛋白的影响。在第 0 天的电泳图中可以发现,5 组样品基本没有显著性差异,随着贮藏时间的延长, R_0 组 α -酪蛋白、BSA 以及 α -LA 的条带颜色较浅,可以推测 ϵ -PL 与牛乳中的相关蛋白结合并且沉淀,于是在 D_5 取底部蛋白质成分,可以发现 R_0 中以上几种蛋白条带明显高于其它几组。空白对照组中 α -LA 条带随着贮藏时间的延长颜色变浅,而 R_{15} 、 R_{20} 、 R_{25} 组中相关蛋白的条带基本不受影响。

2.6 巴氏杀菌乳在贮藏过程中稳定性的变化

添加聚合物的巴氏杀菌乳中有大量的蛋白质和其它分子离子等物质,这些物质以悬浮颗粒的形式存在于牛乳中,这些悬浮颗粒的运动与牛乳的稳定性密切相关,因此本方法通过牛乳中的反向散射光强度评价牛乳的稳定性^[21]。在 37 °C 加速贮存条件下,测得不同处理下巴氏杀菌乳的被散射光强度的变化如图 6 所示。可以发现在图 6a 中,0~8 h 之间可以发现背散射光重合度较好,然而从 0~8 h,背散射光显著降低,这意味着巴氏杀

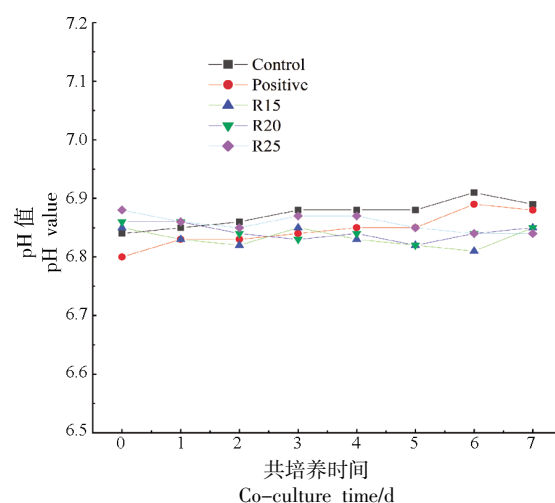
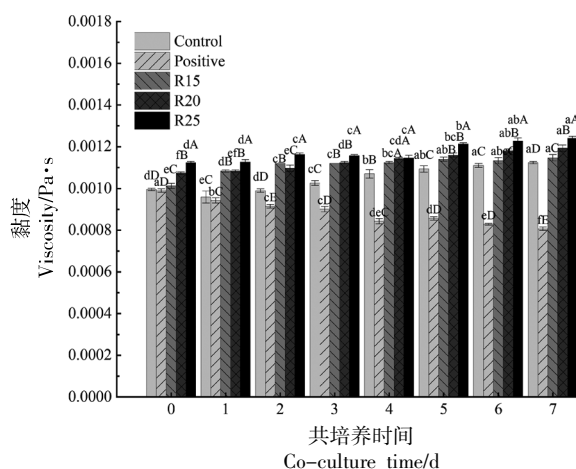


图 3 不同处理对贮藏期间巴氏杀菌乳 pH 值的影响

Fig.3 Effect of different treatments on pH value of pasteurized milk during storage

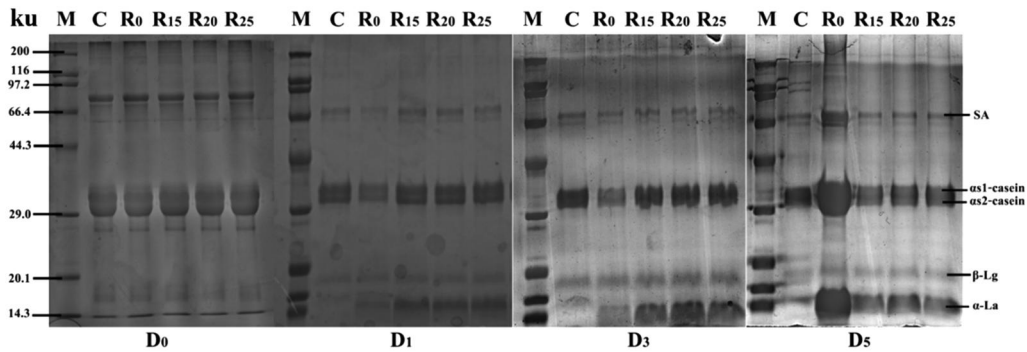


注:不同大写字母表示同一贮藏时间不同处理之间具有显著性差异($P < 0.05$);不同小写字母表示同一处理下不同贮藏时间之间具有显著性差异($P < 0.05$)。

图 4 不同处理对贮藏期间巴氏杀菌乳相对黏度的影响

Fig.4 Influence of different treatments on the relative viscosity of pasteurized milk during storage

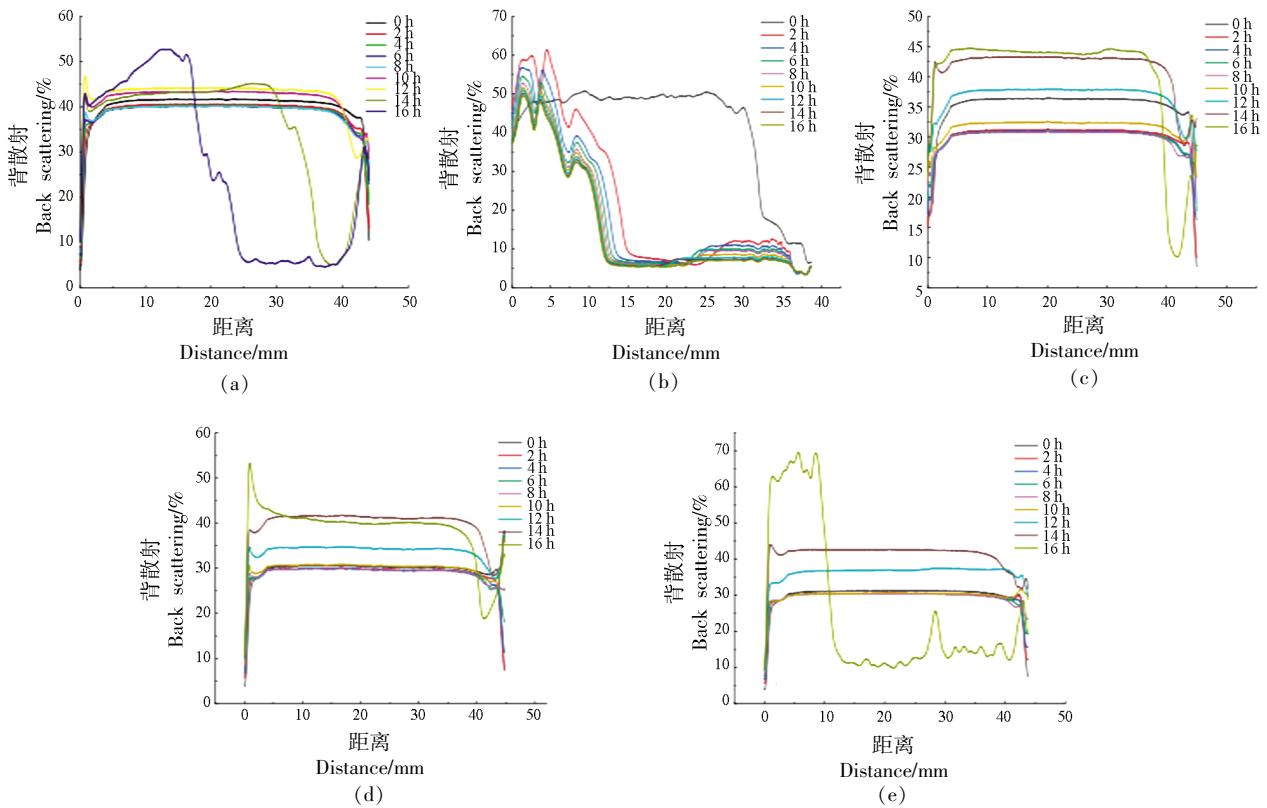
菌乳中的悬浮颗粒浓度降低,可能原因是此时已经有较大的悬浮颗粒沉淀,而在 8 h 后,开始有背散射光的不稳定变化出现,表明此时体系中已有更大的悬浮颗粒形成并沉淀,此时体系已经发生分层现象。而在图 6b 中,由于 ϵ -PL 的存在,其阳离子会与牛乳中阴离子发生静电相互作用,造成大颗粒聚集沉淀,因此在测试开始时,体系已经不稳定。在图 6d 和图 6e 中可以发现,在 0~10 h 内,



注: M 为蛋白分子质量标准; C 为对照组; R₀, R₁₅, R₂₀, R₂₅ 分别代表 ϵ -PL 与 SHMP 质量比 1:0, 1:15, 1:20, 1:25; D₀, D₁, D₃, D₅ 分别代表贮藏 0, 1, 3, 5 d。

图 5 不同处理对贮藏期间乳中蛋白质的影响

Fig.5 Effects of different treatments on milk proteins during storage



注: a-e 分别表示空白对照组、 ϵ -PL 组、R₅、R₁₅、R₂₅ 聚合物处理组。

图 6 不同处理在 37 °C 下的乳稳定性分析

Fig.6 Analysis of milk stability at 37 °C under different treatments

背散射光的重合度好,表明在 0~10 h 内,样品处于稳定状态,并且在 10 h 内,并没有发生明显的被散射光变化的现象,表明并无小颗粒聚集,样品处于稳定分散状态;在 10 h 后,开始发生不稳定

的变化,表明在 37 °C 下颗粒开始聚集并沉淀。

结果表明,SHMP 和 ϵ -PL 聚合物的作用下对巴氏杀菌乳的稳定性具有显著影响。这可能归因于 SHMP 中过量的游离磷酸根阴离子能够和带正

电的氨基酸结合,因此能够与酪蛋白胶束相互作用,或者通过与酪蛋白结合同一钙离子,这种双重相互作用可以改变矿物质平衡,导致游离的钙离子浓度降低,胶体磷酸钙将溶解,减少聚集,增加稳定性。

2.7 巴氏杀菌乳在贮藏过程中色泽的变化

表 1 为不同处理的巴氏杀菌乳在贮存期间的 L^* (亮度)、 a^* (红色)、 b^* (黄色)值。 L^* 与牛乳中的蛋白密切相关,蛋白呈现不同状态,以及其粒径大小

都能够影响 L^* 的大小^[23]。 L^* 和 a^* 随着贮存时间的增加,不同组别均整体呈现下降趋势($P<0.05$),这可能是由于添加聚合物的巴氏杀菌乳中蛋白胶束分裂,从而减少了体系内的蛋白质大分子,因此能够更好的维持体系的稳定性,而 ϵ -PL 处理组中的阳离子可能会和牛乳中的蛋白质发生相互作用产生相分离。 b^* 则呈现增加的趋势($P<0.05$),原因可能是乳品在贮藏过程中,还在持续发生美拉德反应^[24]。

表 1 不同质量比的聚合物在贮藏过程中对乳色泽的影响

Table 1 Effects of polymers with different mass ratios on milk color during storage

色值	处理	贮藏时间/d				
		0	1	3	5	7
L^*	Control	88.01 ± 0.54 ^{Ba}	85.70 ± 0.26 ^{Ab}	82.64 ± 0.63 ^{Ac}	75.47 ± 0.55 ^{Ca}	68.92 ± 0.10 ^{Cc}
	Positive	85.53 ± 0.97 ^{Ba}	82.06 ± 0.82 ^{Cb}	79.75 ± 0.08 ^{Cc}	78.31 ± 0.58 ^{Ad}	69.42 ± 0.41 ^{Cc}
	R15	85.58 ± 0.49 ^{Ba}	83.12 ± 0.46 ^{Bcb}	81.76 ± 0.27 ^{Abc}	76.97 ± 0.43 ^{Ad}	73.05 ± 0.62 ^{Bc}
	R20	85.08 ± 0.26 ^{Ba}	83.57 ± 0.70 ^{Bb}	81.25 ± 0.47 ^{Bc}	78.35 ± 0.95 ^{Ad}	77.74 ± 0.49 ^{Ad}
	R25	86.15 ± 0.45 ^{Ba}	83.55 ± 0.24 ^{Bb}	80.74 ± 0.82 ^{Bc}	79.25 ± 0.59 ^{Ad}	77.40 ± 0.31 ^{Ac}
a^*	Control	-4.60 ± 0.14 ^{Ba}	-4.94 ± 0.08 ^{Bb}	-5.20 ± 0.07 ^{Bc}	-5.52 ± 0.05 ^{Dd}	-5.90 ± 0.04 ^{Dc}
	Positive	-4.45 ± 0.08 ^{ABa}	-4.56 ± 0.08 ^{Aa}	-4.72 ± 0.07 ^{Ab}	-4.94 ± 0.04 ^{Bc}	-5.06 ± 0.04 ^{Cc}
	R15	-4.84 ± 0.06 ^{Ca}	-5.02 ± 0.04 ^{Bb}	-5.10 ± 0.04 ^{Bbc}	-5.13 ± 0.03 ^{Ccd}	-5.21 ± 0.07 ^{Bb}
	R20	-4.45 ± 0.07 ^{ABa}	-4.55 ± 0.06 ^{Aa}	-4.70 ± 0.06 ^{Ab}	-4.84 ± 0.04 ^{Ac}	-4.94 ± 0.04 ^{Ac}
	R25	-4.44 ± 0.06 ^{Aa}	-4.53 ± 0.05 ^{Aa}	-4.64 ± 0.05 ^{Ab}	-4.80 ± 0.06 ^{Ac}	-4.85 ± 0.05 ^{Ac}
b^*	Control	5.97 ± 0.07 ^{Ac}	6.41 ± 0.12 ^{Ad}	6.81 ± 0.05 ^{Ac}	7.08 ± 0.01 ^{Ab}	7.33 ± 0.09 ^{Aa}
	Positive	5.80 ± 0.15 ^{Bc}	5.97 ± 0.10 ^{Bc}	6.18 ± 0.03 ^{Bb}	6.27 ± 0.02 ^{Bab}	6.43 ± 0.04 ^{Ba}
	R15	5.43 ± 0.06 ^{Cc}	5.54 ± 0.11 ^{Cbc}	5.58 ± 0.04 ^{Db}	5.74 ± 0.03 ^{Da}	5.82 ± 0.02 ^{Da}
	R20	5.70 ± 0.05 ^{Bc}	5.84 ± 0.03 ^{Bd}	5.99 ± 0.22 ^{Cc}	6.08 ± 0.02 ^{Cb}	6.15 ± 0.03 ^{Ca}
	R25	5.48 ± 0.01 ^{Cc}	5.56 ± 0.03 ^{Cd}	5.65 ± 0.05 ^{Dc}	5.76 ± 0.01 ^{Db}	5.86 ± 0.03 ^{Da}

注:不同大写字母表示相同贮藏时间不同处理之间具有显著性差异($P<0.05$);不同小写字母表示相同处理不同贮藏时间之间具有显著性差异($P<0.05$)。

3 结论

ϵ -PL-SHMP 聚合物对巴氏杀菌乳具有良好的抑菌效果。在不接种菌的情况下,菌落总数能在 1 周内保持菌落总数 $<10^4$ CFU/mL。3 个质量比的 ϵ -PL-SHMP 聚合物对蜡样芽胞杆菌、金黄色葡萄球菌两种菌的抑制效果类似。贮藏期间巴氏杀菌乳体系的酸度不会发生显著变化,而添加了聚合物的牛乳与空白组相比黏度略高。随着贮藏时间的增加, ϵ -PL 中的阳离子会与牛乳中的蛋白质发生相互作用产生相分离现象,有较大的悬浮颗粒沉淀;而添加了 ϵ -PL-SHMP 聚合物的样品并无

小颗粒聚集,样品处于稳定分散状态,本研究表明,在巴氏杀菌乳中添加 ϵ -PL-SHMP 聚合物,能够更好地维持体系的稳定性,延长乳的货架期。

参 考 文 献

- [1] LIAN C C, ZHANG M, MAO J Q, et al. Transcriptomic and metabolomic analyses for providing insights into the influence of polylysine synthetase on the metabolism of *Streptomyces albulus*[J]. Microbial Cell Factories, 2022, 21(1): 224.
- [2] JUN Y, SNEH P B, MOHAMMAD R K, et al.

- Biopolymer -based packaging films/edible coatings functionalized with ε -polylysine: New options for food preservation [J]. *Food Research International*, 2024, 187(13): 114390.
- [3] WANG D H, WANG H M, WU J P, et al. Biotechnological production and application of epsilon-poly-L-lysine (ε -PL): Biosynthesis and its metabolic regulation[J]. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2022, 38(7): 123.
- [4] LI S B, MAO Y R, ZHANG L F, et al. Recent advances in microbial ε -poly-L-lysine fermentation and its diverse applications[J]. *Biotechnol Biofuels*, 2022, 15(1): 1-16.
- [5] LI B, YANG Y Y, KOU X H, et al. Water-soluble polysaccharides extracted from *Enteromorpha prolifera*/PVA composite film functionalized as ε -polylysine with improved mechanical and antibacterial properties [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 282(67): 136697.
- [6] FERNANDES G L P, VANIM M M, DELBEM A C B, et al. Antibacterial cytotoxic and mechanical properties of a orthodontic cement with phosphate nano-sized and phosphorylated chitosan: An *in vitro* study[J]. *Journal of Dentistry*, 2024, 146(7): 105073.
- [7] THANDAPANI G, SUPRIYA P P, SUDHA P N, et al. Size optimization and *in vitro* biocompatibility studies of chitosan nanoparticles [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2017, 104(13): 1794-1806.
- [8] ZHAO H M, HE X, TAN C J, et al. Chitosan-melanin complex microsphere: A potential colonic delivery system for protein drugs [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2025, 348(3): 122886.
- [9] YOUSEFI N, ABBASI S, MOHAMMADIFAR M A. Prevention of thermal gelation in concentrated whey protein isolate dispersions by using H₂O₂ and SHMP [J]. *International Dairy Journal*, 2024, 155(8): 105942.
- [10] JORDAN P J, MORISON K R. Pasteurisation of particles in milk [J]. *International Dairy Journal*, 2022, 128(5): 105316.
- [11] 郭亮. ε -聚赖氨酸与乳蛋白相互作用机制的研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2021.
- GUO L. Study on the mechanism of interaction between ε -polylysine and milk protein[D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2021.
- [12] LAMO C, SHAHI N C, ANUPAMA S, et al. Pasteurization of guava juice using induction pasteurizer and optimization of process parameters [J]. *LWT*, 2019, 112(14): 108253.
- [13] 苏小琴, 宋鹏鹏, 孔俊豪, 等. 茶基底中微生物菌相构成分析及其对现制奶茶中菌落数量的影响[J]. *食品安全质量检测学报*, 2024, 15(18): 50-58.
- SU X Q, SONG P P, KONG J H, et al. Analysis of the microbial community composition in the tea base and its impact on the colony count in freshly prepared milk tea [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2024, 15(18): 50-58.
- [14] NING Y W, MA M, ZHANG Y J, et al. Antibacterial mechanism of sucrose laurate against *Bacillus cereus* by attacking multiple targets and its application in milk beverage[J]. *Food Research International*, 2022, 154(4): 111018.
- [15] LI Y Q, SUN X X, FENG J L, et al. Antibacterial activities and membrane permeability actions of glycinin basic peptide against *Escherichia coli*[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2015, 31(5): 170-176.
- [16] CHENG N, DAVID M, BARBANO, et al. Effect of pasteurization and fat, protein, casein to serum protein ratio, and milk temperature on milk beverage color and viscosity [J]. *Journal of Dairy Science*, 2019, 102(3): 2022-2043.
- [17] 弓耀忠, 孙丽萍, 曾品国, 等. 灭菌乳酸度指标扩大必要性的研究[J]. *中国乳业*, 2024, 45(4): 72-76.
- GONG Y Z, SUN L P, ZENG P G, et al. Research on the necessity of expanding the lactic acidity index of sterilization[J]. *China Dairy*, 2024, 45(4): 72-76.
- [18] AHMED Z, VALERIE B B, FREDERIC G, et al. Effect of pH on the physicochemical characteristics and the surface chemical composition of camel and bovine whey protein's powders[J]. *Food Chemistry*, 2020, 333(32): 127514.
- [19] MOCANU M, ROLIN C, MOHAMMADIFAR M A, et al. The effect of sodium hexametaphosphate on the efficiency of pectin in stabilizing acidified milk drinks[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 118(2): 106767.
- [20] CHOI I, NAN L, VUIA-RISER J, et al. Neutral pH nonfat dry milk beverages with turbidity reduced by sodium hexametaphosphate: Physical and sensory

- properties during storage [J]. LWT, 2021, 147(14): 111656.
- [21] NI Y, ZHANG Z, FAN L P, et al. Evaluation of physical stability of high pressure homogenization treatment cloudy ginkgo beverages[J]. LWT, 2019, 111(13): 31–38.
- [22] ANEMA S G. The effect of hexametaphosphate addition during milk powder manufacture on the properties of reconstituted skim milk [J]. International Dairy Journal, 2015, 50(11): 58–65.
- [23] 赵旭飞, 胡志和, 薛璐, 等. 超高压对牛乳感官、理化及乳蛋白加工特性的影响研究进展[J]. 乳业科学与技术, 2020, 43(1): 33–38.
- ZHAO X F, HU Z H, XUE L, et al. Research progress on the effects of ultra-high pressure on sensory, physicochemical and milk protein processing characteristics of milk[J]. Journal of Dairy Science and Technology, 2020, 43(1): 33–38.
- [24] ZHAO Z L, WANG W D, CHEN J, et al. Effect of ultrasound-assisted Maillard reaction on functional properties and flavor characteristics of oyster protein enzymatic hydrolysates[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2024, 111(10): 107113.

Effect of ϵ -PL-SHMP Polymer on the Quality of Pasteurized Milk

MENG Yuecheng¹, JI Ziyang¹, CHEN Jie¹, LI Yanhua^{1,2*}, WANG Xiaojun¹

¹School of Food Science and Biotechnology, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310018

²Key Laboratory for Food Microbial Technology of Zhejiang Province, Hangzhou 310018

Abstract ϵ -polylysine (ϵ -PL) is a common natural food preservative. In this paper, the antibacterial effect of ϵ -polylysine-sodium hexametaphosphate (ϵ -PL-SHMP) polymer on pasteurized milk and its effects on the physicochemical properties of milk system were analyzed. Combined with SDS-PAGE map, the stability analysis of protein changes in milk. The results showed that ϵ -PL-SHMP polymer had a good inhibitory effect on the number of *Bacillus cereus* in milk within 7 days and the number of *Staphylococcus aureus* in milk below 10^6 CFU/mL within 3 days compared with the blank group during the 1-week storage period. The pH value of pasteurized milk treated with ϵ -PL-SHMP polymer was maintained in the range of 6.8–6.9, which was not significantly changed from other groups, and the relative viscosity increased slightly from 0.0008 Pa·s to 0.0012 Pa·s on the 7th day compared with that of the ϵ -PL treatment group. SDS-PAGE spectra showed that ϵ -PL binded to and precipitated proteins in milk with the prolongation of storage time, while proteins in the ϵ -PL-SHMP polymer treatment group were more stable. The stability analysis showed that the stability of the ϵ -PL alone treatment group was the worst, and the pasteurized milk system with ϵ -PL-SHMP polymer showed a good and stable dispersion state. Conclusion: ϵ -PL-SHMP polymer can improve the application quality of ϵ -PL in milk system, have a better antibacterial effect on pasteurized milk and improve the stability of the milk system.

Keywords ϵ -polylysine; sodium hexametaphosphate; polymer; pasteurized milk; quality