DOI:10.12161/j.issn.1005-6521.2026.16.005

热灭活与超声破碎后生元的抑菌特性及其在带鱼冷藏保鲜中的应用

覃秋雯[1],王应晨[1],姜美玲[1,2],罗雨婷[1],田杭鹭[1,2],郑岩[1*],陈静[1*]
(1. 浙江海洋大学 食品与药学学院,浙江省海产品健康危害因素关键技术研究重点实验室,浙江 舟山 316022;2. 浙江海洋大学中意比萨海洋研究生学院,浙江 舟山 316022)

摘　要:为开发安全高效的带鱼冷链保鲜技术,评价不同工艺制备的植物乳植杆菌(*Lacticaseibacillus plantarum*)SC019后生元的抑菌活性及保鲜效果,该文分别采用热灭活(heat-inactivated,HI)与超声破碎(ultrasonic,US)制备后生元(HI-/US-POST SC019),以无菌水作为对照,测定其抑菌圈直径、生物膜抑制率与DNA泄漏量,并在4 ℃条件下贮藏带鱼12 d,动态监测菌落总数(total viable count,TVC)、挥发性盐基氮(total volatile basic nitrogen,TVB-N)含量、白度及感官评分。结果表明,HI-POST SC019对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌的抑菌圈直径分别为(16.50±1.06) mm和(15.94±0.38)mm,生物膜抑制率达82.14%和80.06%,DNA泄漏量显著高于US-POST SC019(P<0.05)。贮藏试验显示,HI-POST SC019将TVB-N含量超过30 mg/100 g的时间延后至第12天,且12 d内TVC维持在6 lg(CFU/g)以下,并使感官评分始终高于可接受阈值。与对照组相比,HI-POST SC019将带鱼冷藏货架期延长约4 d。综上,热灭活工艺可显著增强SC019后生元的多靶点抑菌活性,延缓带鱼腐败进程并保持色泽与口感。

关键词:后生元;热灭活;超声破碎;带鱼;保鲜

Antibacterial Properties of Heat-Inactivated and Ultrasonic Postbiotics and Their Applications on the Preservation of *Trichiurus lepturus* during Refrigerated Storage

QIN Qiuwen[1],WANG Yingchen[1],JIANG Meiling[1,2],LUO Yuting[1],TIAN Hanglu[1,2],ZHENG Yan[1*],CHEN Jing[1*]
(1. College of Food Science and Pharmacy,Key Laboratory of Health Risk Factors for Seafood of Zhejiang Province,Zhejiang Ocean University,Zhoushan 316022,Zhejiang,China;2. Pisa Marine Graduate School of Zhejiang Ocean University,Zhoushan 316022,Zhejiang,China)

Abstract:To develop a safe and efficient cold chain preservation technology for *Trichiurus lepturus*,this study aimed to evaluate the antibacterial activity and preservation effect of postbiotics from *Lacticaseibacillus plantarum* SC019 prepared by different processes. Postbiotics were prepared via heat-inactivated (HI)and ultrasonic (US) disruption,respectively,with sterile water as the control. The inhibition zone,biofilm inhibition rate,and DNA leakage were determined. Meanwhile,*Trichiurus lepturus* was stored at 4 ℃ for 12 d,and the total viable count (TVC),total volatile basic nitrogen (TVB-N),whiteness,and sensory score were dynamically monitored. The results showed that the inhibition zones of HI-POST SC019 against *E. coli* and *S. aureus* were (16.50±1.06) mm and (15.94±0.38) mm,respectively,with biofilm inhibition rates reaching 82.14% and 80.06%. The DNA leakage of HI-POST SC019 was significantly higher than that of US-POST SC019 (P<0.05). Storage experiments indicated that HI-POST SC019 delayed the time when TVB-N exceeded 30 mg/100 g to the 12th day;during the 12-day storage period,TVC remained below 6 lg(CFU/g),and the sensory score was consistently higher than the acceptable threshold. Compared with the control,HI-POST SC019 extended the refrigerated shelf life of *Trichiurus lepturus* by approximately 4 d. Therefore,the heat inactivation process can signifi-

基金项目:浙江省教育厅一般科研项目(Y202250727);"十四五"国家重点研发计划重点专项(2021YFD2100504);浙江省大学生科技创新活动计划暨新苗人才计划立项资助项目(2024R411A010)

作者简介:覃秋雯(1999—),女(壮),硕士研究生,研究方向:水产品加工与贮藏。
*通信作者:郑岩(1992—),女(汉),博士,研究方向:乳酸菌资源开发及利用、水产品加工与贮藏;陈静(1979—),女(汉),教授,博士,研究方向:海洋天然产物、水产品加工与贮藏。

cantly enhance the multi-target antibacterial activity of SC019 postbiotics, delay the spoilage process of *Trichiurus lepturus*, and maintain its color and texture.

Key words: postbiotics; heat-inactivated; ultrasonic; *Trichiurus lepturus*; preservation

引文格式：
覃秋雯，王应晨，姜美玲，等. 热灭活与超声破碎后生元的抑菌特性及其在带鱼冷藏保鲜中的应用[J]. 食品研究与开发，2026，47(16)：31-38.
QIN Qiuwen, WANG Yingchen, JIANG Meiling, et al. Antibacterial Properties of Heat-Inactivated and Ultrasonic Postbiotics and Their Applications on the Preservation of *Trichiurus lepturus* during Refrigerated Storage[J]. Food Research and Development, 2026, 47(16): 31-38.

水产品保鲜技术创新，是食品工业应对资源损耗与消费升级双重挑战的关键措施。我国作为全球最大的水产养殖与捕捞国，水产品总产量持续位居全球首位，其中带鱼（*Trichiurus lepturus*）是东海区标志性经济鱼类，在渔业经济中占据重要地位。《2024 年中国渔业统计年鉴》数据显示，2023 年我国带鱼捕捞量达 91.03 万 t，占鱼类总捕捞量的 9.51%，连续多年保持高位产出[1]。带鱼肌肉富含功能性蛋白、ω-3 系列多不饱和脂肪酸等生物活性成分，具有调节脂质代谢和免疫功能的作用，深受消费者青睐[2]。然而，其在冷链贮存和运输过程中，因水分活度较高且含有丰富的不饱和脂肪酸、游离氨基酸等生物活性成分，易引发腐败菌定植、脂质氧化及肌原纤维蛋白变性等问题，最终导致带鱼货架期显著缩短[3-4]。

在带鱼保鲜领域，传统保鲜技术应用较为广泛。其中，物理保鲜方法（如冰藏、真空包装）虽能在一定程度上延缓微生物生长、延长带鱼保鲜期，但对腐败菌生物膜及群体感应信号分子的抑制作用有限；相较而言，化学防腐剂（如亚硝酸盐）的保鲜效果更优，可更有效地抑制腐败微生物繁殖，却存在亚硝胺残留和耐药基因传播等安全风险[5-6]。

除传统保鲜技术外，生物保鲜技术已成为研究热点。其中，后生元因安全性高、抑菌效果稳定等优势，在肉制品保鲜领域的应用潜力已得到证实[7]。传统冷链保鲜、化学保鲜等常规技术存在保鲜效果单一、化学试剂残留、易破坏水产品原有营养与风味品质等局限，难以适配高品质水产贮藏需求；而后生元生物保鲜技术凭借无毒无害、生物相容性好、可同时抑制微生物腐败与脂质氧化的双重优势，逐渐成为水产保鲜领域的新型研究方向与开发热点。明确传统保鲜技术的局限性及后生元等生物保鲜技术的研究现状，可为课题研究的创新性提供依据[7]。后生元（postbiotics）指灭活菌体及其代谢产物（如过氧化氢、有机酸、细菌素和肽聚糖等），具有益生功能，且因安全、稳定的特性备受关注[8-9]。相较于活性益生菌，后生元在 4 ℃贮藏 20 周后仍能较好地保持整体抑菌活性[10]。研究表明，后生元可通过破坏细胞膜、降解酰基高丝氨酸内酯群体感应信号分子、抑制生物被膜形成等多靶点机制抑制腐败菌[11]。后生元的制备工艺（如热灭活温度、超声功率等）可能通过蛋白质变性导致酶失活、胞外多糖保留及膜蛋白释放等途径，直接影响其裂解产物，进而影响保鲜效果[11]。然而，针对带鱼这类高脂水产品，后生元制备方式对特定腐败菌的差异化抑制作用尚未阐明。

基于此，本研究选用从内蒙古传统发酵酸菜中分离得到的植物乳植杆菌 SC019（CGMCC NO.32700），分别采用热灭活和超声破碎法制备后生元，并建立 4 ℃模拟冷链贮藏体系。通过分析后生元对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抑菌特性，以及其对带鱼品质指标的动态影响，系统比较两种后生元的抑菌差异，阐明其在带鱼保鲜中的抑菌作用，以期为开发高效、安全的水产品生物保鲜技术提供理论依据，进一步推动后生元在水产品冷链保鲜中的产业化应用。

1 材料与方法

1.1 材料与设备

1.1.1 原料与试剂

带鱼[平均体重（0.35±0.10）kg，体长（12.67±0.65）cm，共计 15 kg]：市售，-18 ℃冷链运输至实验室；琼脂粉、氯化钠、氧化镁、结晶紫、盐酸、硼酸、甲基红、溴甲酚绿（均为分析纯）：国药集团化学试剂有限公司；磷酸盐缓冲溶液：常德比克曼生物科技有限公司；平板计数琼脂（plate count agar，PCA）培养基、LB 培养基：青岛海博生物技术有限公司；MRS 肉汤培养基：广东环凯微生物科技有限公司；植物乳植杆菌 SC019（CGMCC NO.32700）、大肠杆菌（*Escherichia coli*）ATCC 25922、金黄色葡萄球菌（*Staphylococcus aureus*）ATCC 26112：浙江省海产品健康危害因素关键技术研究重点实验室。

1.1.2 仪器与设备

SW-CJ-1F 超净工作台：苏州安泰空气技术有限公司；JY92-2D 超声波细胞破碎仪：新芝生物科技股份有限公司；T18 数显型高速匀浆机：广州艾卡仪器设备有限公司；PWN224ZH 电子天平：上海奥豪斯仪器有限公司；BSP-250 生化培养箱：上海博迅医疗生物仪器股份有限公司；iMark 酶标仪：美国 Bio-Rad 公司；U2800 紫外分光光度计：日本日立公司；PHS-3C pH 计：INESA 科学仪器有限公司；CS210 便携式精密色差计：杭州彩谱科技有限公司；Zetasizer Nano S90 纳米粒度电位仪：英国马尔文仪器有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 后生元制备

将植物乳植杆菌 SC019 按 5% 接种量接种于 MRS 肉汤培养基进行活化，37 ℃培养 24 h，连续活化两代。

热灭活制备后生元 SC019（heat-inactivated postbiotics SC019，HI-POST SC019）：将二代培养液于 121 ℃高温 0.1 MPa 高压灭菌 20 min，6 000 r/min、4 ℃离心 10 min，收集上清液。

超声破碎制备后生元 SC019（ultrasonic postbiotics SC019，US-POST SC019）：将二代培养液使用超声波细胞破碎仪（变幅杆 Φ6、工作时间 20 min、超声 5 s、间隙 1 s）进行细胞破碎后，6 000 r/min、4 ℃离心 10 min，收集上清液。制备好的后生元置于 4 ℃条件下保存备用[12]。

1.2.2 抑菌活性测定

采用牛津杯琼脂扩散法分别测定后生元对 *E.coli* 和 *S.aureus* 的抑菌活性。将 *E.coli* 和 *S.aureus* 接种到 LB 液体培养基中，并用无菌生理盐水稀释至 10^8 CFU/mL 备用。以 *E.coli* 和 *S.aureus* 为指示菌，吸取 100 μL 菌液涂布至 LB 固体培养基中，涂布混匀后等距离放置 9 mm 牛津杯，将 100 μL HI-POST SC019 和 US-POST SC019 加入牛津杯中，做 3 个重复，将培养皿置于 4 ℃冰箱中扩散 4~10 h 后，放入 37 ℃生化培养箱培养（10±2）h，测量抑菌圈直径[13]。

1.2.3 后生元对致病菌株生物膜形成的影响

采用结晶紫染色法测定后生元对 *E.coli* 和 *S.aureus* 生物膜形成的抑制作用[14]。在 96 孔平底培养板中每孔加入 100 μL 浓度为 1×10^8 CFU/mL 的菌悬液和 100 μL 后生元，对照组中加入 100 μL 无菌水，37 ℃培养 48 h 后，除去上层培养基以及游离细菌，用 200 μL 磷酸盐缓冲溶液（phosphate buffered saline，PBS）清洗 3 次，再添加 200 μL 0.4% 结晶紫染色 15 min，用无菌水清洗 3 次洗去浮色，待干燥后用 30% 醋酸溶液脱色，用酶标仪测定 $OD_{600\ nm}$，按照公式（1）计算后生元对致病菌株生物膜形成的抑制率（C，%）。

$$C = \frac{O_c - O_t}{O_c} \times 100 \quad (1)$$

式中：O_c 为对照组 $OD_{600\ nm}$ 值；O_t 为后生元处理组的 $OD_{600\ nm}$ 值。

1.2.4 后生元对致病菌株 DNA 泄漏的影响

参考 Hu 等[15]的方法，将菌株活化并稀释至 1×10^8 CFU/mL 后，8 000 r/min 离心 10 min，用 PBS 清洗 3 次，除去上清液，分别加入 100 μL 的 HI-POST SC019 和 US-POST SC019，对照组加入等量无菌水。于 37 ℃水浴 30 min 后，利用紫外分光光度计，通过比较对照组与后生元处理的致病菌株在 260 nm 波长下吸光度变化，探究后生元处理致病菌株后的 DNA 泄漏情况。

1.2.5 带鱼样品处理

选择个体均匀、体表银白、色泽光亮、肉质紧实且无异味的新鲜带鱼，经清洗、去头、去尾、去内脏后，切成 5 cm 长的鱼块，放入无菌袋中。将带鱼样品随机分为 3 组：HI-POST SC019 处理组、US-POST SC019 处理组和无菌水对照组，每组设 3 个平行。将鱼块分别浸没在 HI-POST SC019 和 US-POST SC019 原液和无菌水中 15 min，缓慢捞起晾干后，置于 4 ℃冰箱储藏。储藏 12 d 内，每 2 d 测定一次鱼块的感官、理化和微生物指标。

1.2.6 pH 值的测定

参照 GB 5009.237—2016《食品安全国家标准 食品 pH 值的测定》方法并作适当修改[16]：称取 5.0 g 碎鱼肉样品于 100 mL 离心管中，加入 45 mL 去离子水，冰水浴下均质处理 30 s，静置 30 min 后测定 pH 值。每组测试 3 个平行，结果取平均值。

1.2.7 总挥发性盐基氮（total volatile basic nitrogen，TVB-N）含量的测定

参考 GB 5009.228—2016《食品安全国家标准 食品中挥发性盐基氮的测定》方法中的自动凯氏定氮法测定 TVB-N 含量[17]。准确称取 10 g 绞碎带鱼样品，加入 75 mL 蒸馏水混匀，冰水浴静置 30 min。测定前加入 1 g 氧化镁。同时将含有指示剂（溴甲酚绿/甲基红混合液）的 30 mL 硼酸溶液（20 g/L）置于 250 mL 具塞锥形瓶中，作为酸接收器。用 0.1 mol/L 盐酸标准溶液滴定至溶液呈紫红色为终点。TVB-N 含量按照公式（2）计算。

$$X = \frac{(V_1 - V_2) \times C \times 14}{m} \times 100 \quad (2)$$

式中：X 为挥发性盐基氮含量，mg/100 g；m 为带鱼质量，g；C 为盐酸标准溶液实际浓度，mol/L；V_1 为滴定时盐酸标准溶液消耗体积，mL；V_2 为空白滴定时盐酸标准溶液消耗体积，mL。

1.2.8 带鱼菌落总数（total viable count，TVC）的测定

根据 GB 4789.2—2022《食品安全国家标准 食品

微生物学检验 菌落总数测定》中方法测定菌落总数[18]。无菌条件下，取 5.0 g 绞碎鱼肉，用 45 mL 生理盐水均质处理。将均质液体进行合适梯度稀释后，取 1 mL 稀释液倒入装有 15~20 mL PCA 培养基的培养皿中。将平板倒置于 30 ℃生化培养箱中培养（72±2）h 后计数。结果以 lg（CFU/g）表示，每个稀释梯度 3 个平行。

1.2.9　带鱼白度的测定

将带鱼样品沿后脊柱纵向切片，去除鱼骨，使用精密色差计测量鱼片内侧颜色。测定鱼肉的 L^*值（明度指数）、a^*值（红色度）、b^*值（黄色度），用白度表示带鱼色泽的变化，白度（W，%）按照公式（3）计算。

$$W = 100 - [(100 - L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2}]^{1/2} \quad (3)$$

1.2.10　感官评价

参考 GB/T 37062—2018《水产品感官评价指南》[19]的方法稍作修改，选择 10 名经过专业培训的水产品感官鉴定人员对气味、色泽、组织形态和弹性 4 个指标进行评价，感官评价标准见表 1。

表 1　感官评价标准

Table 1　Sensory evaluation criteria

分值	评价标准			
	色泽	气味	组织形态	弹性
8~10	带鱼肉切面色泽正常，富有光泽，没有多余水分	清新的带鱼固有香味	带鱼肌肉组织纹理清晰，完整致密	带鱼肉紧实，富有弹性，没有按压凹陷
6~<8	带鱼肉切面色泽正常，有光泽，少量水分	较清新的带鱼固有香味	带鱼肌肉组织纹理较清晰，完整致密	带鱼肉较紧实，较有弹性，按压后轻微凹陷随即消失
4~<6	带鱼肉切面微微发黄，有较多水分	带鱼固有香味消失，并略带异味	带鱼肌肉组织纹理较模糊，结构不松散不紧密	带鱼肉稍有弹性，按压后轻微凹陷消失速度减慢
2~<4	带鱼肉切面无光泽，发黄，较多水分	带鱼肉散发出腥臭味或氨味	带鱼肌肉组织局部松散，结构不紧密	带鱼肉几乎没有弹性，按压后凹陷不消失
0~<2	带鱼肉切面色泽暗淡，严重发黄，水分流出过多	带鱼肉散发出强烈的腥臭味或氨味	带鱼肌肉组织松散，出现浆状物	带鱼肉无弹性，按压后肌肉表面开裂

1.3　数据处理

试验数据采用 Excel 2021 进行初步整理计算，采用 SPSS Statistics 21 软件进行单因素方差分析 Duncan 法多重比较和配对样本 t 检验，结果以平均值±标准差表示，采用 Origin 2024 绘图。

2　结果与分析

2.1　后生元对致病菌株抑菌效果的影响

两种处理方式的后生元对大肠杆菌与金黄色葡萄球菌抑菌活性的影响见表 2。

表 2　后生元对大肠杆菌与金黄色葡萄球菌抑菌活性的影响

Table 2　Antibacterial effects of postbiotic on *E. coli* and *S. aureus*

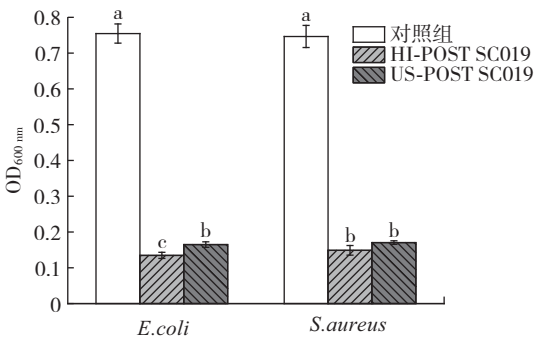
菌株	抑菌圈直径/mm	
	HI-POST SC019	US-POST SC019
E. coli	16.50±1.06	15.57±0.69
S. aureus	15.94±0.38	15.16±0.36

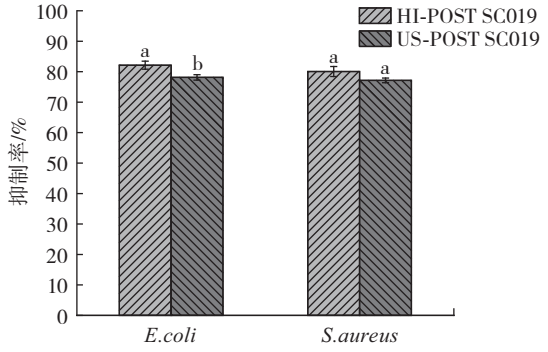
如表 2 所示，HI-POST SC019 的 *E.coli* 和 *S.aureus* 抑菌圈直径分别为（16.50±1.06）、（15.94±0.38）mm；US-POST SC019 分别为（15.57±0.69）、（15.16±0.36）mm。结果表明，HI-POST SC019 和 US-POST SC019 对 *E.coli* 和 *S.aureus* 均具有抑制作用，其中 HI-POST SC019 组 *E.coli* 抑菌圈直径更大，说明热灭活后生元能更好抑制大肠杆菌。研究表明，干酪乳杆菌后生元能有效控制病原体并减少 99% 大肠杆菌，这一结果与本研究结果一致[20]。后生元的抑菌活性可能与菌株代谢产生的生物活性物质有关。热处理可能增加细胞壁裂解程度，使细菌素、多肽等活性组分更易释放，从而提高抑菌效能，具体机制有待进一步验证。

2.2　后生元对致病菌株生物膜形成的影响

生物膜的特征是嵌入细胞外聚合物基质中的表面相关微生物群落，为细菌提供对恶劣条件的适应能力，会对食品安全构成重大威胁[21]。本研究通过结晶紫法评估后生元对病原微生物生物膜形成能力的干预效应，定量结果见图 1。

由图 1 可知，与对照组相比，HI-POST SC019 抑制了 *E. coli* 和 *S. aureus* 生物膜生长，抑制率分别为 82.14% 和 80.06%；而 US-POST SC019 的抑制率分别





不同小写字母表示不同组间差异显著（$P<0.05$）。

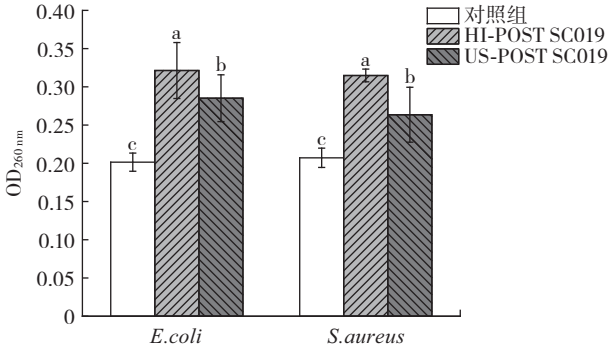
图 1 后生元对两种致病菌生物膜形成的影响

Fig.1 Effect of postbiotics on biofilm formation of two pathogenic strains

为 78.13% 和 77.14%。结果表明，HI-POST SC019 对生物膜的抑制效果更佳，其作用机制：一方面破坏由胞外多糖和 DNA 组成的生物膜基质网络，削弱生物膜结构稳定性；另一方面干扰 AI-2 介导的群体感应（quorum sensing，QS）信号通路，抑制腐败菌群体行为调控[22]。

2.3 后生元对致病菌株 DNA 泄露形成的影响

细菌细胞膜受损会导致胞内核酸外泄[23]，本研究通过测定 260 nm 吸光度监测细胞膜完整性，结果见图 2。



不同小写字母表示不同组间差异显著（$P<0.05$）。

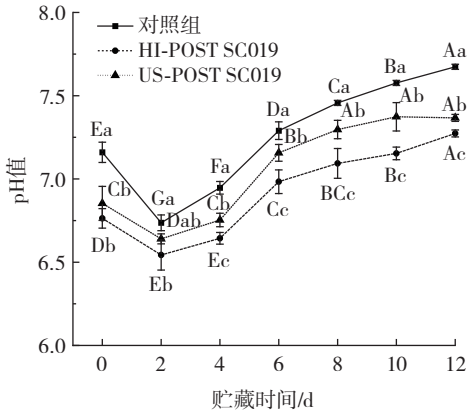
图 2 后生元对致病菌株 DNA 泄漏的影响

Fig.2 Effect of postbiotics on DNA leakage of pathogenic strains

如图 2 所示，与对照组相比，经热灭活处理的 HI-POST SC019 对 *E.coli* 和 *S.aureus* 的 DNA 泄漏量分别升至 0.32±0.04 和 0.31±0.01，显著高于 US-POST SC019 组（0.29±0.03、0.26±0.04）（$P<0.05$）。结果表明，热灭活处理组的 DNA 泄漏量显著高于超声破碎处理组，可更高效地释放具有细胞膜破坏活性的有效物质，进而增强抑菌效果。该现象的机理可能为热灭活后生元可诱导细菌细胞膜产生不可逆的损伤[24]，一方面引发膜电位去极化，致使胞内外离子梯度失衡；另一方面破坏磷脂双分子层结构，造成胞内核酸、蛋白质等物质外泄。

2.4 冷藏期间带鱼 pH 值的变化

冷藏期间不同后生元对带鱼 pH 值的影响如图 3 所示。



不同小写字母表示同一贮藏时间不同组间差异显著（$P<0.05$）；不同大写字母表示同组不同贮藏时间差异显著（$P<0.05$）。

图 3 后生元对带鱼冷藏期间 pH 值变化的影响

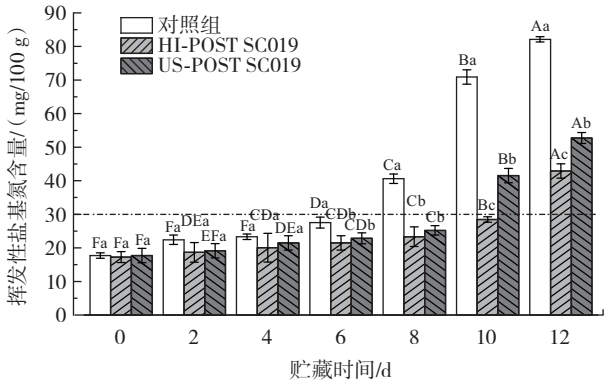
Fig.3 Effect of postbiotics on pH value of *Trichiurus lepturus* during refrigerated storage

由图 3 可知，不同贮藏时间试验组的 pH 值大小排序为 HI-POST SC019<US-POST SC019，且随贮藏时间延长，所有处理组和对照组的带鱼 pH 值均呈现先下降后上升的趋势。这是由于冷藏初期带鱼体内发生糖降解反应产生乳酸、磷酸等酸性物质导致 pH 值下降。随着贮藏时间的进一步延长，微生物开始生长繁殖，鱼体内的蛋白质被分解为氨类和三甲胺等碱性物质，因而 pH 值回升[25]。处理组初期 pH 值下降幅度弱于对照组，原因在于后生元虽本身呈酸性，但可抑制微生物及内源酶活性，减缓鱼肉糖酵解反应；而对照组无抑菌成分，糖酵解更为旺盛，乳酸等酸性物质大量生成，最终 pH 值降幅更大。冷藏 4 d 后，蛋白质分解产生碱性物质，pH 值均开始回升。此结果与张家玮等[26]研究低压静电场技术对带鱼保鲜的结果一致。处理组的 pH 值始终低于对照组，说明 HI-POST SC019 和 US-POST SC019 均一定程度地延缓了 pH 值的上升，且 HI-POST SC019 延缓效果更为显著，证实生物保鲜剂通过酸碱平衡调节可有效延长水产品货架期。

2.5 冷藏期间带鱼 TVB-N 含量测定结果

TVB-N 含量是蛋白质被腐败菌分解产生的氨和胺类挥发性碱的总量，反映鱼肉腐败程度[27]。带鱼 TVB-N 含量的动态变化见图 4。

如图 4 所示，0 d 时各组 TVB-N 含量分别为（17.73±0.81）、（17.27±1.62）、（17.73±2.14）mg/100 g，且组间无显著差异（$P>0.05$）。随贮藏时间延长，各组 TVB-N 含量均升高，但增长速率存在明显差异。根据 GB 10136—2015《食品安全国家标准 动物性水产制品》[28]，水产品中 TVB-N 含量不得超过 30 mg/100 g。对照组在第 8 天[（40.6±1.4）mg/100 g]即超过限值，US-POST SC019 组第 10 天[（41.53±2.14 mg/100 g）]超过限值，而 HI-POST SC019 组直至第 12 天才超过限



不同小写字母表示同一贮藏时间不同组间差异显著(P<0.05);不同大写字母表示同组不同贮藏时间差异显著(P<0.05)。

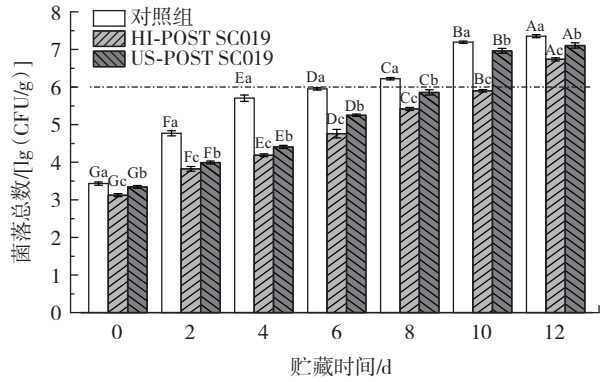
图 4　后生元对贮藏期间带鱼 TVB-N 含量的影响

Fig.4　Effect of postbiotics on TVB-N of *Trichiurus lepturus* during storage

值。说明热灭活制备的后生元比超声破碎制备更能延缓 TVB-N 累积,延长货架期。该差异可能与两种工艺释放的活性组分不同有关。热灭活可能导致细胞裂解程度更高,释放更多有机酸和细菌素,从而通过降低菌体酶活性,破坏细胞膜,协同抑制腐败菌生长,减缓蛋白质分解。

2.6　冷藏期间带鱼的菌落总数

图 5 为冷藏期间不同后生元处理方式对带鱼菌落总数(TVC)的影响。



不同小写字母表示同一贮藏时间不同组间差异显著(P<0.05);不同大写字母表示同组不同贮藏时间差异显著(P<0.05)。

图 5　后生元对贮藏期间带鱼菌落总数的影响

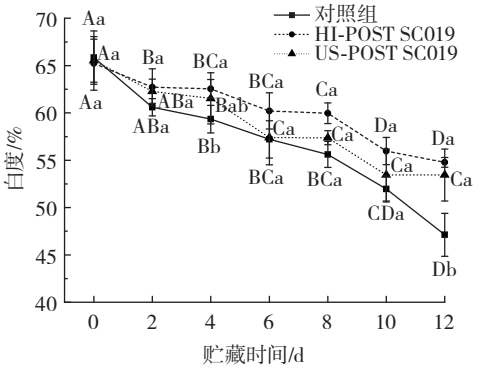
Fig.5　Effect of postbiotics on the total number of colonies of *Trichiurus lepturus* during storage

由图 5 可知,带鱼初始 TVC 为(3.29±0.15) lg(CFU/g),随着贮藏时间延长,各组 TVC 均呈上升趋势,但速率不同。第 12 天时,对照组、HI-POST SC019、US-POST SC019 的菌落总数分别为(7.35±0.01)、(6.74±0.04)、(7.10±0.02) lg(CFU/g),且 3 组差异显著(P<0.05)。其中 HI-POST SC019 组菌落总数最小,抑菌作用最强,与前述抑菌圈和生物膜结果一致。

菌落总数的变化与后生元的抑菌性能研究结果一致。根据 SC/T 3102—2010《鲜、冻带鱼》[29],一级鲜度和二级鲜度 TVC 上限分别为 4 lg(CFU/g)和 6 lg(CFU/g)。冷藏 0~4 ℃条件下,对照组维持一级鲜度 2 d、二级鲜度 8 d;HI-POST SC019 组维持一级鲜度 4 d、二级鲜度 12 d;US-POST SC019 组维持带鱼一级鲜度 4 d、二级鲜度 10 d。热灭活制得的后生元显著延缓了微生物增殖,其优越性可能与活性组分(细菌素、有机酸等)的释放量更高有关,这些成分可引起膜电位去极化并干扰能量代谢,从而降低腐败菌增殖速率[30],破坏微生物能量代谢稳态,进而抑制其增殖动力学。

2.7　冷藏期间带鱼的白度

图 6 为冷藏期间不同后生元处理方式对带鱼白度的影响。



不同小写字母表示同一贮藏时间不同组间差异显著(P<0.05);不同大写字母表示同组不同贮藏时间差异显著(P<0.05)。

图 6　后生元对贮藏期间带鱼白度的影响

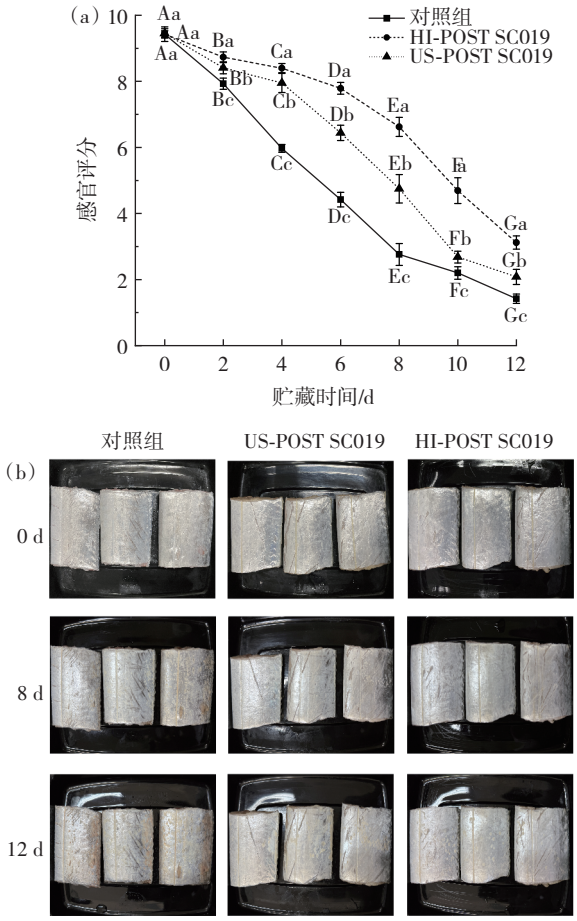
Fig.6　Effect of postbiotics on the whiteness of *Trichiurus lepturus* during storage

由图 6 可知,0 d 时对照组、HI-POST SC019 与 US-POST SC019 处理组白度分别为(65.85±3.81)%、(65.23±2.83)%和(65.52±3.27)%,无显著差异(P>0.05)。贮藏过程中 3 组白度均下降;第 12 天对照组白度降至(47.12±3.27)%,而 HI-POST SC019 和 US-POST SC019 处理组白度分别保持在(54.77±0.51)%与(53.44±2.74)%,显著高于对照组(P<0.05)。后生元处理对白度的保持作用可能源于两方面:一是抑制脂质与肌红蛋白氧化,减缓黄褐色产物生成;二是降低腐败菌数量,减少其胞外酶对色素的破坏[31]。整体来看,热灭活制得的后生元在维持带鱼色泽方面表现更佳,提示该工艺可能更有利于关键活性组分的稳定释放。

2.8　冷藏期间带鱼的感官品质

冷藏过程中不同后生元处理对带鱼感官品质的影响见图 7。

如图 7(a)所示,各组初始感官评分均在 9.4 以上,组间差异不显著(P>0.05)。随着贮藏时间延长,所有组别感官评分均呈持续下降趋势。结合带鱼感官评价标准,分值 4 为食用可接受临界阈值,分值低于 4 则样



(a)感官评分;(b)外观。不同小写字母表示同一贮藏时间不同组间差异显著(P<0.05);不同大写字母表示同组不同贮藏时间差异显著(P<0.05)。

图 7 后生元对贮藏期间带鱼感官品质的影响

Fig.7 Effect of postbiotics on the sensory effects of *Trichiurus lepturus* during storage

品丧失食用价值。对照组贮藏至第 8 天时,感官评分为 2.76±0.33,已低于可接受阈值,失去食用价值;而 HI-POST SC019 组保鲜效果最优,可维持最长可食用周期,该组第 12 天感官评分仍为 3.12±0.20,显著高于其余两组(P<0.05)。HI-POST SC019 组感官评分在第 8 天出现明显降幅,这可能是微生物大量增殖,造成鱼肉色泽变差、肉质松散,同时脂肪氧化产物、三甲胺、挥发性盐基氮等风味劣变物质不断积累所导致[32]。

图 7(b)显示,0 d 时各组鱼体呈银白色、肌肉紧实,具有新鲜海鱼气味;8 d 时,对照组表面开始发暗并出现腥味,而处理组仍保持较好色泽;12 d 时对照组已呈棕色并伴强烈腥味,HI-POST SC019 组色泽尚可,US-POST SC019 组略偏黄并出现轻度氨味。这可能归因于 HI-POST SC019 具有更强的抑菌活性,减缓了蛋白质和脂质氧化进程。

综上,后生元处理在本试验条件下将带鱼的感官货架期延长 2~4 d,其中热灭活制备的 HI-POST SC019 效果最佳。表明后生元通过抑制微生物繁殖及氧化反应共同维持带鱼品质。

3 结论

本研究以 *Lacticaseibacillus plantarum* SC019 为原料,比较热灭活(HI-POST SC019)和超声破碎(US-POST SC019)两种工艺获得的后生元在 4 ℃冷藏条件下对带鱼品质的影响。结果表明:HI-POST SC019 的抑菌圈直径、DNA 泄漏量和生物膜抑制率均显著优于 US-POST SC019(P<0.05),说明热灭活工艺更有利于释放细菌素和有机酸等活性成分。HI-POST SC019 将 TVB-N 含量升至 30 mg/100 g 的时间延后至第 12 天,比对照组和 US-POST SC019 分别长 4 d 和 2 d;同时将 TVC 控制在 6 lg(CFU/g)以下的时间最长(12 d)。两种后生元均显著减缓白度下降(P<0.05),其中 HI-POST SC019 在第 12 天仍保持可接受感官品质。后生元通过降低胞外 pH 值、破坏细胞膜及干扰 AI-2 群体感应信号,抑制腐败菌生长并减缓脂质、肌红蛋白氧化。综上,热灭活制备的 SC019 后生元可在不添加化学防腐剂的情况下将带鱼货架期延长约 4 d,为水产品冷链保鲜提供了安全、高效的新策略。

参考文献:

[1] 农业农村部渔业渔政管理局 . 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2024: 38-39.
Bureau of Fisheries and Fishery Administration, Ministry of Agriculture and Rural Affairs. China fisheries statistical yearbook[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2024: 38-39.

[2] 常雨晴 . 带鱼多肽制备及美拉德反应对其性质影响研究[D]. 大连: 大连海洋大学, 2023.
CHANG Yuqing. Preparation of hairtail polypeptide and effect of Maillard reaction on its properties[D]. Dalian: Dalian Ocean University, 2023.

[3] 杨镕, 徐安琪, 朱煜康, 等 . 辐照对带鱼鱼糜内源性转谷氨酰胺酶及凝胶特性的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(11): 71-76.
YANG Rong, XU Anqi, ZHU Yukang, et al. Effect of irradiation on endogenous transglutaminase and gel properties of hairtail surimi [J]. Food Science, 2020, 41(11): 71-76.

[4] FU L L, XIAO Q, RU Y, et al. Bio-based active packaging: Gallic acid modified agarose coatings in grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) preservation[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 255: 128196.

[5] HE T Q, MO B H, HUANG J L, et al. Twin-screw extrusion of hairtail surimi and soy protein isolate blends[J]. Food Science and Technology Research, 2014, 20(3): 517-527.

[6] LIU J L, SHAO Y, YUAN C H, et al. Eugenol-chitosan nanoemulsion as an edible coating: Its impact on physicochemical, microbiological and sensorial properties of hairtail (*Trichiurus haumela*) during storage at 4 ℃[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 183: 2199-2204.

[7] 吕静, 樊怡君, 郭浩佳, 等 . 后生元及其在肉制品中的应用研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(4): 383-391.
LYU Jing, FAN Yijun, GUO Haojia, et al. Research progress on

postbiotics and their application in meat products[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(4): 383-391.

[8] AGUILAR-TOALÁ J E, GARCIA-VARELA R, GARCIA H S, et al. Postbiotics: An evolving term within the functional foods field [J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 75: 105-114.

[9] HUANG X H, NZEKOUE F K, WANG J B, et al. A study of bioactivities and composition of a cocktail of supernatants derived from lactic acid bacteria for potential food applications[J]. Probiotics and Antimicrobial Proteins, 2025, 17(6): 5012-5029.

[10] MARTÍN R, LANGELLA P. Emerging health concepts in the probiotics field: Streamlining the definitions[J]. Frontiers in Microbiology, 2019, 10: 1047.

[11] CAMPEOTTO F, SUAU A, KAPEL N, et al. A fermented formula in pre-term infants: Clinical tolerance, gut microbiota, down-regulation of faecal calprotectin and up-regulation of faecal secretory IgA [J]. The British Journal of Nutrition, 2011, 105(12): 1843-1851.

[12] 李雯, 王伟军, 舒蓝婕, 等 . 乳酸菌后生元的制备、分析方法及其活性[J]. 中国食品学报, 2025, 25(1): 455-468.
LI Wen, WANG Weijun, SHU Lanjie, et al. The preparation, analysis and the activity of postbiotics from lactic acid bacteria[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2025, 25 (1): 455-468.

[13] ZHAO J, WANG J, YANG Y j, et al. *In vitro* assessment of probiotic properties of lactic acid bacteria isolated from vaginas of healthy cows[J]. Indian Journal of Animal Research, 2015, 49(3): 355.

[14] KANG J M, JIN W Y, WANG J F, et al. Antibacterial and anti-biofilm activities of peppermint essential oil against *Staphylococcus aureus*[J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 101: 639-645.

[15] HU J J, ZHU H X, FENG Y W, et al. Emulsions containing composite (clove, oregano, and cinnamon) essential oils: Phase inversion preparation, physicochemical properties and antibacterial mechanism[J]. Food Chemistry, 2023, 421: 136201.

[16] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会 . 食品安全国家标准 食品 pH 值的测定: GB 5009.237—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. National food safety standard Determination of pH value of food: GB 5009.237—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.

[17] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会 . 食品安全国家标准 食品中挥发性盐基氮的测定: GB 5009.228—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. National food safety standard Determination of volatile base nitrogen in food: GB 5009.228—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.

[18] 国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局 . 食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定: GB 4789.2—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
National Health Commission of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. National food safety standard Food microbiological inspection Determination of total bacterial colony: GB 4789.2—2022[S]. Beijing: Standards Press of China, 2022.

[19] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会 . 水产品感官评价指南: GB/T 37062—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Guidelines for the sensory evaluation of aquatic products: GB/T 37062—2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.

[20] PENG M f, REICHMANN G, BISWAS D. *Lactobacillus casei* and its byproducts alter the virulence factors of foodborne bacterial pathogens[J]. Journal of Functional Foods, 2015, 15: 418-428.

[21] SHAO L T, CHEN S S, WANG H D, et al. Advances in understanding the predominance, phenotypes, and mechanisms of bacteria related to meat spoilage[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 118: 822-832.

[22] GEDEFIE A, DEMSIS W, ASHAGRIE M, et al. *Acinetobacter baumannii* biofilm formation and its role in disease pathogenesis: A review[J]. Infection and Drug Resistance, 2021, 14: 3711-3719.

[23] CUI B, MAO Y Y, LIANG H S, et al. Properties of soybean protein isolate/curdlan based emulsion gel for fat analogue: Comparison with pork backfat[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 206: 481-488.

[24] 柴晓娟 . 乳酸菌的分离筛选及其对牛粪堆肥发酵的影响[D]. 银川: 宁夏大学, 2024.
CHAI Xiaojuan. Isolation and screening of lactic acid bacteria and their effect on compost fermentation of cattle manure[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2024.

[25] DONG Q F, YANG L, XIANG L W, et al. Development of electrospun fish gelatin film containing lauroyl arginate ethyl and its application in large yellow croaker (*Pseudosciaena crocea*) preservation [J]. Food Control, 2023, 153: 109959.

[26] 张家玮, 谢超, 余铭, 等 . 低压静电场处理对带鱼微冻贮藏期间品质变化影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(23): 277-283.
ZHANG Jiawei, XIE Chao, YU Ming, et al. Effect of low voltage electrostatic field(LVEF) treatment on the quality changes of *Trichiurus lepturus* during micro-frozen storage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(23): 277-283.

[27] RUIZ-CAPILLAS C, MORAL A. Sensory and biochemical aspects of quality of whole bigeye tuna (*Thunnus obesus*) during bulk storage in controlled atmospheres[J]. Food Chemistry, 2005, 89(3): 347-354.

[28] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会 . 食品安全国家标准 动物性水产制品: GB 10136—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. National food safety standard Animal aquatic products: GB 10136—2015[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.

[29] 中华人民共和国农业部 . 鲜、冻带鱼: SC/T 3102—2010[S]. 北京: 中国农业出版社, 2010.
Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Fresh and frozen hairtail: SC/T 3102—2010[S]. Beijing: China Agricultural Press, 2010.

[30] BEYTH N, YUDOVIN-FARBER I, BAHIR R, et al. Antibacterial activity of dental composites containing quaternary ammonium polyethylenimine nanoparticles against *Streptococcus mutans*[J]. Biomaterials, 2006, 27(21): 3995-4002.

[31] KODDY J K, MIAO W H, HATAB S, et al. Understanding the role of atmospheric cold plasma (ACP) in maintaining the quality of hairtail (*Trichiurus lepturus*) [J]. Food Chemistry, 2021, 343: 128418.

[32] LI Y, YU H X, CAI Y, et al. Ferulic acid-β-cyclodextrin inclusion complexes: Application on the preservation of hairtail (*Trichiurus lepturus*)[J]. International Journal of Food Properties, 2020, 23(1): 282-296.

责任编辑:冯娜
收稿日期:2025-05-03