田子豪, 郭进琪, 王相茹, 等. Nisin 和韭菜籽提取物对金黄色葡萄球菌抑菌作用的研究 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(10): 185−194. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040375
TIAN Zihao, GUO Jinqi, WANG Xiangru, et al. Antibacterial Effects of Nisin and Chive Seed Extract on *Staphylococcus aureus*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(10): 185−194. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040375

· 生物工程 ·

Nisin 和韭菜籽提取物对金黄色葡萄球菌抑菌作用的研究

田子豪, 郭进琪+, 王相茹, 魏丽俪, 王彤娇, 张子怡, 于　微*, 马佳歌*
（东北农业大学食品学院, 乳品科学教育部重点实验室, 黑龙江哈尔滨 150030）

摘　要: 为研究乳酸链球菌素（Nisin）与韭菜籽提取物（CSE）联合使用对金黄色葡萄球菌的抑制作用及其对草莓和巴氏杀菌乳贮藏期间品质特性的影响，本研究采用琼脂孔扩散法测定了 Nisin 和 CSE 对金黄色葡萄球菌 ATCC 29213 的抑菌活性。通过测定活性氧（Reactive Oxygen Species，ROS）含量和胞外多糖含量进一步探讨 Nisin 与 CSE 单独及联合对金黄色葡萄球菌的抑菌效果。此外，通过测定贮藏期间巴氏杀菌乳和草莓的可滴定酸度、草莓的失重率与 DPPH 自由基清除率以及巴氏杀菌乳的蛋白质含量，进一步探究 Nisin 与 CSE 对两种食品品质的影响。结果表明，Nisin 与 CSE 联合对金黄色葡萄球菌具有协同抑菌活性。与 Nisin 组和 CSE 组相比，Nisin+CSE 组的金黄色葡萄球菌 ROS 含量显著降低，分别降低了 18.64% 和 39.70%，而 Nisin+CSE 组的金黄色葡萄球菌胞外多糖含量分别降低了 17.87% 和 32.57%（P<0.05）。此外，Nisin 联合 CSE 可在 25 ℃ 和 4 ℃ 下贮藏 8 d 期间有效延缓巴氏杀菌乳和草莓的腐败变质。Nisin 联合 CSE 展现出良好的金黄色葡萄球菌抑制效果，本研究为天然复合抑菌剂的开发提供了新思路。

关键词: 乳酸链球菌素, 韭菜籽提取物, 金黄色葡萄球菌, 协同抑菌作用, 巴氏杀菌乳, 草莓
中图分类号: TS201.3　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)10−0185−10
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040375
本文网刊:

Antibacterial Effects of Nisin and Chive Seed Extract on *Staphylococcus aureus*

TIAN Zihao, GUO Jinqi+, WANG Xiangru, WEI Lili, WANG Tongjiao, ZHANG Ziyi, YU Wei*, MA Jiage*

（Key Laboratory of Dairy Science, Ministry of Education, College of Food Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China）

Abstract: This study aimed to investigate the antibacterial effects of Nisin combined with chive seed extract (CSE) against *Staphylococcus aureus* and their effect on the quality attributes of strawberries and pasteurized milk during storage. The agar well diffusion assay was employed to assess the antibacterial activity of Nisin and CSE against *Staphylococcus aureus* ATCC 29213. Additionally, the antibacterial efficacy of Nisin and CSE against *S. aureus* was further investigated by measuring reactive oxygen species (ROS) levels and extracellular polymeric substance (EPS) content. Meanwhile, the effects of Nisin and CSE on the quality of the two food products were further investigated by determining the titratable acidity of pasteurized milk and strawberries during storage, as well as the weight loss and DPPH radical scavenging activity of strawberries and the protein content of pasteurized milk. The results demonstrated that the combination of Nisin and CSE

收稿日期: 2025−04−30　　+并列第一作者
基金项目: “新时代龙江优秀硕士、博士学位论文”资助项目（LJYXL2022-033）; 黑龙江省博士后科学基金面上项目（LBH-Z23006）; 黑龙江省自然科学基金优秀青年项目（YQ2024C025）; 国家药监局中药质量研究与评价重点实验室黑龙江省药品检验研究院开放课题。
作者简介: 田子豪（2001−）, 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品生物技术和乳品科学, E-mail: 15203329897@163.com。
郭进琪（1997−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 乳品微生物与生物技术, E-mail: guojinqi2022@163.com。
*** 通信作者:** 于微（1982−）, 女, 博士, 助理研究员, 研究方向: 乳品微生物与生物技术, E-mail: yuwei_www@163.com。
马佳歌（1993−）, 女, 博士, 副教授, 研究方向: 食品生物技术和乳品科学, E-mail: jiage_ma@neau.edu.cn。

exhibited synergistic antibacterial effect against *S. aureus*. The ROS levels of *S. aureus* were significantly reduced by 18.64% and 39.70% in Nisin+CSE group compared to Nisin and CSE groups, respectively (P<0.05). EPS content in *S. aureus* was remarkably decreased by 17.87% and 32.57% in Nisin+CSE group compared to Nisin and CSE groups, respectively (P<0.05). Furthermore, Nisin combined with CSE effectively delayed spoilage in both pasteurized milk and strawberries during 8-day storage at 25 ℃ and 4 ℃. The combination of Nisin and CSE exhibits a strong inhibitory effect against *Staphylococcus aureus*, offering a new strategy for the development of natural compound antibacterial agents.

Key words: Nisin; chive seed extract (CSE); *Staphylococcus aureus*; synergistic antibacterial effect; pasteurized milk; strawberry

全球人口的快速增长给食品行业带来巨大的挑战[1]。由食源性致病菌和腐败微生物引起的微生物污染是引起食品安全的潜在风险之一[2]。世界卫生组织报告显示，每年约有 6 亿人因食用受食源性致病菌污染的食物而患病，约 42 万人死亡[3]。其中，金黄色葡萄球菌（*Staphylococcus aureus*，*S. aureus*）是生鲜乳生产中引起人类食源性感染的重要致病菌之一，广泛存在于奶牛养殖环境中，通过多种途径污染牛乳，严重危害人类健康[4]。近年来，传统物理与化学灭菌技术已被用于控制巴氏杀菌乳及果蔬制品中金黄色葡萄球菌的活性。热处理、冷藏或高压等物理处理方法和加工技术可能会改变食物的感官特性，破坏食物中营养成分的结构[5]。化学防腐剂如苯甲酸、山梨酸、亚硝酸盐和对羟基苯甲酸酯通常用于抑制食品中病原体和腐败微生物的生长[6−7]。除化学防腐剂外，抗生素也在食品抑菌方面广泛应用。值得注意的是，越来越多的细菌对现有抗生素产生了耐药性，抗生素耐药基因的传播已成为 21 世纪的一个主要问题[8]。2020 年全球抗生素耐药性和使用监测系统数据显示，66 个国家出现了高比例的抗生素耐药性问题[9]。

因此，开发来源广泛且安全性较高的天然抑菌物质已成为当前研究的热点之一。在过去的几十年里，细菌素由于其安全性和易在胃肠道中消化而被广泛用作食品生物防腐剂。细菌素是由核糖体合成的抗菌肽，对革兰氏阳性菌和革兰氏阴性菌具有广谱抑菌活性[10]。目前，作为食品防腐剂使用的细菌素有乳酸链球菌素（Nisin）、纳他霉素（Natamycin）、和肉环素 A（Carnocyclin A）等[11]。在这些细菌素中，Nisin 的安全性已获得美国食品药品监督管理局（Food and Drug Administration，FDA）批准，被 50 多个国家批准作为食品防腐剂[12]。作为一种多环抗菌肽，Nisin 含有多个氨基（-NH_2）和其他有助于其抗菌活性的官能团[11]。已有研究发现，Nisin 对革兰氏阳性菌和病原菌表现出显著的抗菌活性，能够通过干扰细胞壁合成和破坏细胞膜完整性发挥抑菌作用[13]。因此，Nisin 作为一种天然安全的抗菌剂，已被广泛应用于乳制品、肉制品、水果和蔬菜中[14]。然而，Nisin 的抗菌活性可能会因与脂肪或蛋白质等食品成分的相互作用而降低[15]。因此，提高其稳定性和抗菌能力，扩大其应用范围具有重要意义。

韭菜籽因含有丰富的硫化合物而具有抗菌、抗癌、抗氧化等多种生物活性[16]。研究证实，韭菜籽提取物（Chive Seed Extract，CSE）对金黄色葡萄球菌和蜡样芽孢杆菌等革兰氏阳性菌具有抗菌活性[17]。虽然 CSE 具有明显的抗菌活性，但目前的研究大多集中在单独使用 CSE 对食源性致病菌的抑制上。此外，CSE 是否能够增强 Nisin 的抗菌效果，仍有待进一步研究。

因此，本研究旨在探讨 Nisin 和 CSE 对金黄色葡萄球菌的协同抗菌作用。通过抑菌圈测定、溶血性试验、活性氧（ROS）含量测定和胞外多糖测定评价 Nisin 与 CSE 单独或联合对金黄色葡萄球菌的抗菌特性。此外，还探究了 Nisin 与 CSE 联合对巴氏杀菌乳和草莓品质的影响。为天然复合抑菌剂的开发提供了新思路。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

指示菌　保存在东北农业大学乳品科学教育部重点实验室；Nisin（CAS：137061-46-2，≥1000 IU/mg）　中国上海麦克林有限公司；CSE　陕西昊辰生物科技有限公司；辛基酚聚氧乙烯醚（Triton X-100）、ROS 试剂盒　上海碧云天生物技术有限公司；2′,7′-二氯二氢荧光素二乙酸酯（2′,7′-Dichlorodihydrofluorescein diacetate，DCFH-DA）　北京索莱宝科技有限公司；巴氏杀菌奶、草莓　哈尔滨当地超市购买。

BCN1360 超净工作台　苏州安泰有限公司；HIRAYAMA HVE-50 高压灭菌锅　日本 HIRAYAMA 公司；Infinite M200 Pro 全自动酶标仪　美国 AB 公司；UV-6100 紫外分光光度计　美国 BIO 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 菌株的培养　将金黄色葡萄球菌 ATCC 29213 悬液以 2%（v/v）的比例接种于 LB（Luria-Bertani）肉汤培养基中，在 37 ℃ 条件下孵育过夜。

1.2.2 抗菌剂的制备　将 Nisin 和 CSE 分别加入到无菌去离子水中，得到 312.50 μg/mL 的 Nisin 溶液、12.5 mg/mL 的 CSE 溶液以及含有 156.25 μg/mL Nisin 和 6.25 mg/mL CSE 的混合溶液。

1.2.3 CSE 对腐败菌和食源性致病菌抑菌谱的测定　通过琼脂孔扩散法测定 CSE 的抑菌活性[18]。先向

平板中注入 10 mL 的无菌 LB 琼脂培养基，待其凝固后，将牛津杯置于琼脂培养基中（8 mm）。将指示菌接种于 LB 琼脂培养基中，调整指示菌浓度为 10^7 CFU/mL 后倒入放有牛津杯的平板中。待其凝固后取出牛津杯，向每个孔中添加 200 μL 的 CSE 溶液。在 37 ℃ 条件下培养 24 h 后，使用游标卡尺测量抑菌圈直径。

1.2.4　金黄色葡萄球菌抑菌效果测定　按照 1.2.3 所述，每个孔中添加 312.50 μg/mL Nisin、12.5 mg/mL CSE、156.25 μg/mL Nisin+6.25 mg/mL CSE 各 200 μL。37 ℃ 条件下培养 24 h 后，使用游标卡尺测量抑菌圈直径。

1.2.5　溶血性测定　红细胞提取方法参照 Nurhartadi 等[19] 的方法稍作改动。取健康新鲜猪血放入抗凝管中，在 4 ℃ 下 3000 r/min 离心 10 min 收集血浆。取 0.01 mol/L 冷却 PBS 洗涤 3 次，得到红细胞。随后，将红细胞悬液于 1 mL PBS 中，取 20 μL 红细胞，加至 1 mL 抑菌物质，在 37 ℃ 培养 2 h，以生理盐水和 1% Triton X-100 处理的样品分别作为阴性对照和阳性对照。然后，样品在 3000 r/min 的条件下离心 10 min，收集的上清液在酶标仪上测定 $OD_{570\ nm}$，溶血率计算公式如下：

$$溶血率(\%)=\frac{A_{样本}-A_{阴性对照}}{A_{阳性对照}-A_{阴性对照}}\times 100$$

式中，$A_{样本}$为样本上清液的吸光度；$A_{阴性对照}$为添加生理盐水组上清液的吸光度；$A_{阳性对照}$为添加 Triton-100 组上清液的吸光度。

1.2.6　金黄色葡萄球菌细胞内 ROS 含量测定　通过 ROS 试剂盒测定 Nisin 联合 CSE 对金黄色葡萄球菌细胞内 ROS 的影响。培养至对数期的金黄色葡萄球菌菌液用 0.01 mol/L 的 PBS（pH7.2）洗涤两次后重悬，将菌悬液调整为 10^7 CFU/mL 后与稀释的 DCFH-DA 溶液（10 mmol/L）混合均匀，置于 37 ℃ 培养箱培养 20 min。将过滤除菌后的 Nisin、CSE 和 Nisin+CSE 分别加入到上述菌悬液中，不添加任何抑菌物质处理组作为空白对照。通过酶标仪测定各样品的荧光强度，每组做三个平行，激发波长和发射波长分别为 488 nm 和 525 nm。

1.2.7　金黄色葡萄球菌胞外多糖测定　采用钌红染色法检测 Nisin 联合 CSE 对金黄色葡萄球菌胞外多糖生成量的影响[20]。将活化的金黄色葡萄球菌稀释至约 10^7 CFU/mL，添加抑菌物质混合后加入 96 孔板中。在 37 ℃ 条件下培养 24 h 后向孔中接入 100 μL 0.01%（m/v）的钌红染色液，随后在 37 ℃ 条件下孵育 60 min 后测定 $OD_{450\ nm}$，以无菌 PBS 缓冲液处理组为对照，其计算公式如下：

$$胞外多糖含量(\%)=\frac{OD_{样品}}{OD_{对照}}\times 100$$

式中，$OD_{样品}$表示 Nisin 和 CSE 单独或联合处理后，在 450 nm 下的吸光度；$OD_{对照}$表示无菌 PBS 缓冲液处理后，在 450 nm 下的吸光度。

1.2.8　Nisin 和 CSE 对巴氏杀菌乳和草莓贮藏期间品质特性的影响

1.2.8.1　巴氏杀菌乳及草莓样品制备及贮藏　金黄色葡萄球菌细胞用新鲜巴氏杀菌乳稀释至 10^6 CFU/mL[21]。新鲜的草莓用无菌水清洗干净后，用含有 75% 乙醇的无尘纸轻轻擦拭表面并置于超净工作台中晾干。随后在紫外灯下照射 30 min 以除去表面的原始菌落，并接入 1 mL 金黄色葡萄球菌悬液（10^6 CFU/mL）[22]。将接入金黄色葡萄球菌的样本分为四组：空白对照（Control）组、CSE 组、Nisin 组和 Nisin+CSE 组。空白对照：巴氏杀菌乳和草莓不给予额外处理；CSE：巴氏杀菌乳中接入 200 μL 的 12.5 mg/mL CSE，将草莓在 12.5 mg/mL CSE 溶液中浸泡 30 s 后捞出晾干；Nisin：巴氏杀菌乳中接入 200 μL 的 312.50 μg/mL Nisin，将草莓在 312.50 μg/mL Nisin 溶液中浸泡 30 s 后捞出晾干；Nisin+CSE：巴氏杀菌乳中接入 200 μL 含有 156.25 μg/mL Nisin 和 6.25 mg/mL CSE 的混合溶液；将草莓在含有 156.25 μg/mL Nisin 和 6.25 mg/mL CSE 的混合溶液中浸泡 30 s 后捞出晾干。

不同组别的样品分别在 4 ℃ 和 25 ℃ 条件下贮藏 8 d，每隔 1 d 观察并记录巴氏杀菌乳和草莓的实际外观和可滴定酸度、巴氏杀菌乳的蛋白质含量以及草莓的 2,2-二苯基-1-苦基肼（2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl，DPPH）自由基清除率和失重率。

1.2.8.2　巴氏杀菌乳及草莓样品可滴定酸度的测定　称取 10 g 样品置于烧杯中并加适量蒸馏水溶解，转移至 100 mL 容量瓶中定容。用标准氢氧化钠溶液滴定至终点 pH 为 8.2，记录氢氧化钠消耗的体积，可滴定酸度计算公式如下：

$$可滴定酸度(\%)=\frac{c\times V}{m}\times n\times 100$$

式中，c 为氢氧化钠溶液浓度（0.1 mol/L）；V 为消耗的氢氧化钠体积（mL）；m 为样品的质量（g）；n 为样品的稀释倍数。

1.2.8.3　草莓失重率测定　称取每个样品的初始重量 M_0，在每个采样点称取样品重量 M_1，失重率计算公式如下：

$$失重率(\%)=\frac{M_0-M_1}{M_0}\times 100$$

式中，M_0 表示原始重量；M_1 表示取样点重量。

1.2.8.4　巴氏杀菌乳中蛋白质含量的测定　称取 1 g 样品置于烧杯中，并加适量蒸馏水溶解后转移至 100 mL 容量瓶中定容。将溶液在 4500×g 下离心 10 min 后吸取 0.2 mL 上清液置于 10 mL 比色管中，分别加入 0.8 mL 蒸馏水和 5 mL 考马斯亮蓝 G-250 溶液，振荡混匀并静置 2 min，通过分光光度计在波

长 595 nm 处测定其吸光度，根据所得的标准曲线方程（y=8.5198x+0.9975，R^2=0.9991）和下式计算样品中蛋白质的含量。

$$蛋白质含量(g/100\ g)=\frac{(c-c_0)\times V}{m\times 1000}\times 100$$

式中，c 为从标准工作曲线上得到的蛋白质浓度（mg/mL）；c_0 为空白试剂中蛋白质浓度（mg/mL）；V 为最终样液的定容体积（mL）；m 为测试所用试样质量（g）。

1.2.8.5 草莓的 DPPH 自由基清除率的测定 取加水稀释 10 倍后的草莓匀浆 200 μL，与 800 μL 浓度为 0.2 μmol/L 的 DPPH 溶液（溶剂为无水乙醇）混合后在避光条件下静置 30 min，测定 517 nm 下的吸光值[23]。并按照下式计算 DPPH 自由基清除率：

$$DPPH\ 自由基清除率(\%)=\left(1-\frac{A_m-A_n}{A_0}\right)\times 100$$

式中，A_m 为 200 μL 草莓匀浆稀释液和 800 μL DPPH 溶液混合，避光反应 30 min 后的吸光值；A_n 为 200 μL 草莓匀浆稀释液和 800 μL 无水乙醇混合，避光反应 30 min 后的吸光值；A_0 为 200 μL 无水乙醇和 800 μL DPPH 溶液混合，避光反应 30 min 后的吸光值。

1.3 数据处理

试验均重复 3 次，结果以平均值±标准差表示。采用 SPSS 22.0 软件的单因素方差分析及邓肯检验对数据进行多重比较。P<0.05 表示不同组别数据间差异显著。采用 Origin 8.5 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 CSE 对腐败菌和食源性致病菌抑菌谱分析

为探究 CSE 的抑菌效果，采用琼脂扩散法测定 CSE 分别对金黄色葡萄球菌和单增李斯特菌（*Listeria monocytogenes*）等食品中常见的 10 株革兰氏阳性病原菌和 10 株革兰氏阴性病原菌的抑菌活性。如表 1 所示。CSE 对革兰氏阴性病原菌无抑菌活性，对革兰氏阳性病原菌表现出一定的抑菌活性，这可能是由于革兰氏阴性菌的外膜作为一种屏障，有效阻止了 CSE 的渗透[24]。其中对 4 株金黄色葡萄球菌的抑菌圈直径均大于 20 mm，尤其对金黄色葡萄球菌 ATCC 29213 的抑菌活性最大，抑菌圈直径为 22.25±0.13 mm。因此选取金黄色葡萄球菌 ATCC 29213 为目标菌株并进行后续研究。

2.2 Nisin 和 CSE 对金黄色葡萄球菌抑菌效果分析

金黄色葡萄球菌作为常见食源性致病菌之一，会引起人类和动物的败血症以及泌尿系统感染等重大疾病[25]。本实验通过测定抑菌圈直径初步分析 Nisin 和 CSE 对金黄色葡萄球菌抑制能力。如图 1 所示，CSE、Nisin 和 Nisin+CSE 组的抑菌圈直径分别为 12.87±0.05 mm、17.55±0.08 mm 和 21.10±0.02 mm。其中 Nisin+CSE 组的抑菌圈直径显著（P<0.05）高于 CSE 组和 Nisin 组，表明 Nisin 和 CSE 具有一定的协同抑菌效果。

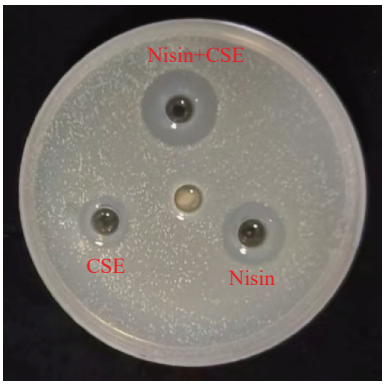


图 1 Nisin 与 CSE 单独及联合对金黄色葡萄球菌的抑菌效果

Fig.1 Antibacterial effect of Nisin and CSE alone or in combination on *S. aureus*

2.3 Nisin 和 CSE 的溶血性分析

红细胞的溶胀和破裂程度是评估化合物安全性的重要参考标准[26]。溶血实验用于评价 Nisin 与 CSE 单独及联合作用的生物安全性。如图 2 所示，Nisin，CSE 和 Nisin+CSE 处理组的溶血率均不足 5%，且与空白对照组相比不存在显著性差异（P>0.05），表明 Nisin 与 CSE 在单独作用或联合作用时均有良好的血液相容性，即研究中抑菌实验所使用的 Nisin 与 CSE 浓度属于安全浓度范围[27−28]。

表 1 CSE 对腐败菌和食源性致病菌的抑菌谱

Table 1 Antibacterial spectrum of CSE against spoilage bacteria and foodborne pathogens

革兰氏阳性指示菌	抑菌圈直径(mm)	革兰氏阴性指示菌	抑菌圈直径(mm)
S. aureus ATCC 29213	22.25±0.13	*S. typhimurium* CMCC 50071	−
S. aureus ATCC 25923	20.43±0.21	*S. typhimurium* ATCC 14028	−
S. aureus CMCC 26074	20.71±0.15	*S. typhimurium* C 77-31	−
S. aureus ATCC 13565	20.83±0.23	*S. pullorum* C 79-13	−
S. epidermidis ATCC 12228	19.57±0.21	*E. sakazakii* ATCC 25944	−
S. albicans CGMCC 1.3374	18.36±0.09	*E. coli* UB 1005	−
B. pyogenes CGMCC 1.3384	−	*E. coli* IQCC 10126	−
B. cereus CMCC 6303	−	*E. coli* ATCC 25922	−
L. monocytogenes ATCC 19114	−	*Salmonella* CMCC 47020	−
L. monocytogenes CMCC 8605	−	*P. aeruginosa* CGMCC 1.2620	−

注：“−”表示未观察到抑菌圈。

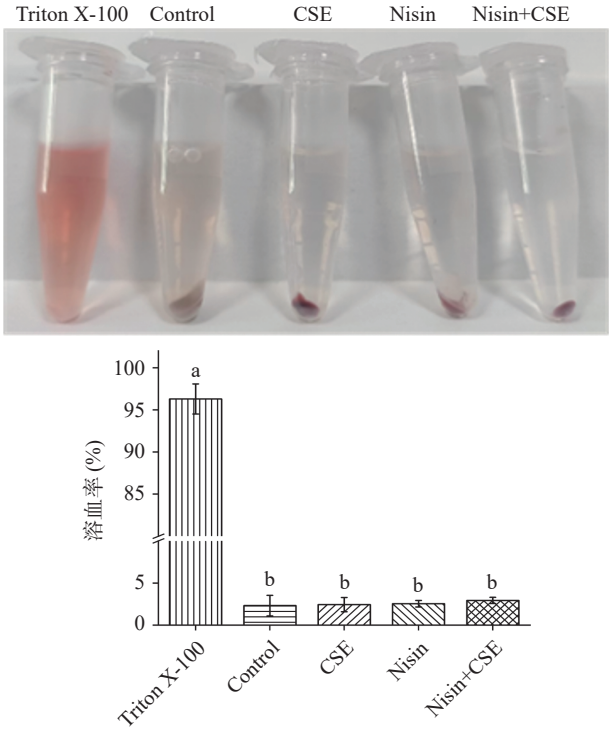


图 2　Nisin 与 CSE 单独及联合的溶血性

Fig.2　Hemolytic activity of Nisin and CSE alone or in combination

注: 图中不同小写字母(a~b)代表不同处理组溶血率之间存在显著性差异(P<0.05)。

2.4　Nisin 和 CSE 对金黄色葡萄球菌细胞内 ROS 含量的分析

在正常的生理条件下, 细菌体内的氧化和抗氧化系统保持动态平衡, 然而当细胞受到外部刺激时生物体内的 ROS 水平发生变化, 可能导致细菌损伤[29]。为了更好地了解 Nisin 和 CSE 的抗菌机制和抗菌作用, 评估了经 Nisin 和 CSE 单独或联合处理后, 金黄色葡萄球菌胞内 ROS 的含量。由图 3 可知, 与空白对照组相比, 不同处理组的金黄色葡萄球菌的胞内 ROS 含量显著下降(P<0.05), 表明 Nisin、CSE 的添加导致细胞内 ROS 含量发生了变化。其中, Nisin 组的 ROS 含量为对照组的 32.17%, CSE 组的 ROS 含量为对照组的 53.23%, Nisin+CSE 组的 ROS 含量为对照组的 13.53%。值得注意的是, 与 Nisin 组和 CSE 组相比, Nisin+CSE 组的 ROS 含量显著降低(P<0.05), 分别降低了 18.64% 和 39.70%, 表明 Nisin 和 CSE 联合处理能够更为有效地降低金黄色葡萄球菌 ATCC 29213 胞内 ROS 含量。结果表明, Nisin 和 CSE 处理可有效降低金黄色葡萄球菌胞内 ROS 含量, 从而破坏细胞内氧化还原系统平衡, 进而抑制金黄色葡萄球菌的活性[30]。罗泽萍等[31] 研究发现, 经赪桐提取物处理后金黄色葡萄球菌胞内 ROS 水平发生改变, 同时细胞形态结构被破坏, 从而抑制金黄色葡萄球菌活性。

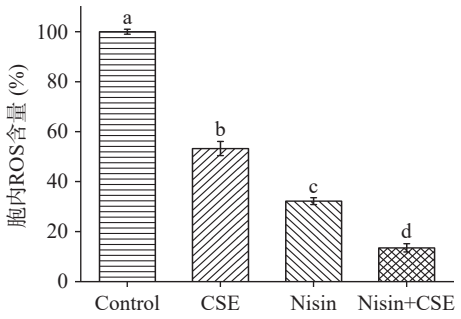


图 3　Nisin 与 CSE 单独及联合对金黄色葡萄球菌 ROS 含量的影响

Fig.3　Effect of Nisin and CSE alone or in combination on the ROS content of *S.aureus*

注: 图中不同小写字母(a~d)代表不同处理组细胞内 ROS 含量之间存在显著性差异(P<0.05)。

2.5　Nisin 和 CSE 对金黄色葡萄球菌胞外多糖的分析

胞外多糖是细菌生物膜的重要组成部分, 它可以促进细菌与生物和其他非生物表面的附着, 使细胞免受抗菌剂的破坏[32]。钌红是一种能与多糖复合物结合的阳离子染色剂, 通过结合物的颜色变化可以估测胞外多糖生成量[33]。通过钌红染色法估测 Nisin 联合 CSE 处理后金黄色葡萄球菌胞外多糖生成量的变化, 结果如图 4 所示。与对照组相比, CSE 组、Nisin 组和 Nisin+CSE 组的金黄色葡萄球菌胞外多糖生成量显著下降了 17.50%、32.20% 和 50.07%(P<0.05), 表明 CSE 和 Nisin 可以有效降低金黄色葡萄球菌胞外多糖的含量。与 Nisin 和 CSE 单独处理组相比, CSE 与 Nisin 联合处理后, 胞外多糖相对生成量降低了 17.87% 和 32.57%(P<0.05), CSE 与 Nisin 联合处理能够更为有效地抑制胞外多糖的产生。研究发现, 与不添加枯茗醛的对照组相比, 经枯茗醛干预后金黄色葡萄球菌胞外多糖含量减少 48.09%[34]。值得注意的是, Nisin 和 CSE 联合处理对胞外多糖的抑制率高于枯茗醛处理, 进一步印证了 Nisin+CSE 组合在抑制金黄色葡萄球菌活性方面的应用潜力。

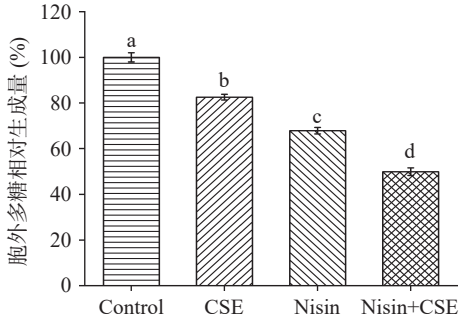


图 4　Nisin 与 CSE 单独及联合对金黄色葡萄球菌胞外多糖生成量的影响

Fig.4　Effect of Nisin and CSE alone or in combination on the production of extracellular polysaccharides in the biofilm of *S.aureus*

注: 图中不同小写字母(a~d)代表不同处理组胞外多糖相对生成量之间存在显著性差异(P<0.05)。

2.6 Nisin 和 CSE 对巴氏杀菌乳和草莓贮藏期间品质特性的影响

2.6.1 Nisin 和 CSE 对巴氏杀菌乳和草莓表观状态的影响 图 5 显示了在 4 ℃ 和 25 ℃ 储存期间，Nisin 与 CSE 单独及组合对巴氏杀菌乳和草莓的影响。25 ℃ 保存 8 d 后，巴氏杀菌乳模型中对照组、Nisin 组和 CSE 组均出现大量白色沉淀，并有腐臭气味。与对照组、Nisin 组和 CSE 组相比，Nisin 与 CSE 联合使用有效减少了沉淀的形成，并具有轻微的腐臭气味。这可能是由于 Nisin 和 CSE 的联合作用抑制了金黄色葡萄球菌代谢脂肪酶的产生，从而抑制了巴氏杀菌乳中脂肪水解为游离脂肪酸[35]。在 4 ℃ 保存 8 d 后，Nisin 和 CSE 单独或联合处理组几乎未见白色沉淀。对于草莓的储藏，25 ℃ 保存 8 d 后，草莓模型中所有处理组均出现腐烂情况，而在 4 ℃ 保存 8 d 后，联合处理组腐烂情况较其他处理组轻微，这可能归因于冷藏和抗菌剂的联合作用[36]。总体而言，Nisin 联合 CSE 在食品模型中的抗菌效果优于 Nisin 和 CSE 单独使用。这可能是因为 Nisin 的有效性会被食品模型的理化性质所改变，如 pH 和脂肪含量等，从而导致 Nisin 在食品模型中的沉淀、失活或不均匀分布，进而影响其发挥功效[37]。先前的研究发现 Nisin 与蔗糖月桂酸酯联用可对金黄色葡萄球菌产生协同抗菌活性，并进一步验证了其在牛奶体系中的良好防腐效果[38]。

2.6.2 Nisin 和 CSE 对巴氏杀菌乳及草莓可滴定酸度的影响 图 6 显示了在贮藏期间，不同处理组巴氏杀菌乳和草莓可滴定酸度的变化。在巴氏杀菌乳模型中，随着贮藏时间的延长，各个处理组的可滴定酸度均呈上升趋势，这可能是由于微生物的生长繁殖，分解了巴氏杀菌乳中的乳糖，从而产生乳酸，引起可滴定酸度的升高[39]。但 Nisin 与 CSE 联合处理组的巴氏杀菌乳可滴定酸度变化较单独处理更小，可能是由于 Nisin 与 CSE 联合处理抑制微生物生长繁殖，进而减小对巴氏杀菌乳酸度的影响。在草莓模型中，随着贮藏时间的延长，各处理组中草莓的可滴定酸度总体呈下降趋势并伴有波动，这可能是草莓的柠檬酸、苹果酸等有机酸在采后仍参与呼吸代谢或其他代谢过程进而导致可滴定酸度降低[40]，且在 25 ℃ 和 4 ℃ 下，联合处理组可滴定酸度显著高于 Nisin 与 CSE 单独处理组的可滴定酸度（$P<0.05$）。

2.6.3 Nisin 和 CSE 对草莓失重率的影响 金黄色葡萄球菌通过分泌蛋白酶、脂肪酶等胞外酶降解草莓表皮细胞膜，破坏组织完整性，导致细胞液外渗，进而导致干物质损失[41]。图 7 反映了不同处理组草莓在贮藏期间的失重情况。由图 7 可知，在 25 ℃ 和 4 ℃贮藏条件下，随着贮藏时间的延长，不同处理组草莓的失重率均逐渐增加，在第 8 d 达到最大值。此外，在 25 ℃ 和 4 ℃ 条件下，第 8 d 联合处理组草莓的失重率显著低于单独处理组草莓的失重率（$P<0.05$），说明联合处理组能较好延缓草莓的质量损失。

2.6.4 Nisin 和 CSE 对巴氏杀菌乳中蛋白质含量的影响 金黄色葡萄球菌可利用蛋白质降解物形成生物膜，增强环境抗性[42]。GB 19645-2010《食品安全国家标准 巴氏杀菌乳》规定巴氏杀菌乳的蛋白质含量应该≥2.9 g/100 g。由图 8 可知，巴氏杀菌乳的初始蛋白质浓度为 3.17 g/100 g。在 25 ℃ 时，Nisin 与 CSE 单独处理组的蛋白质含量在前 2 d 内基本无变化，随着时间的延长，蛋白质含量均逐渐降低。Nisin 与 CSE 联合处理组蛋白质含量在前 4 d 无显

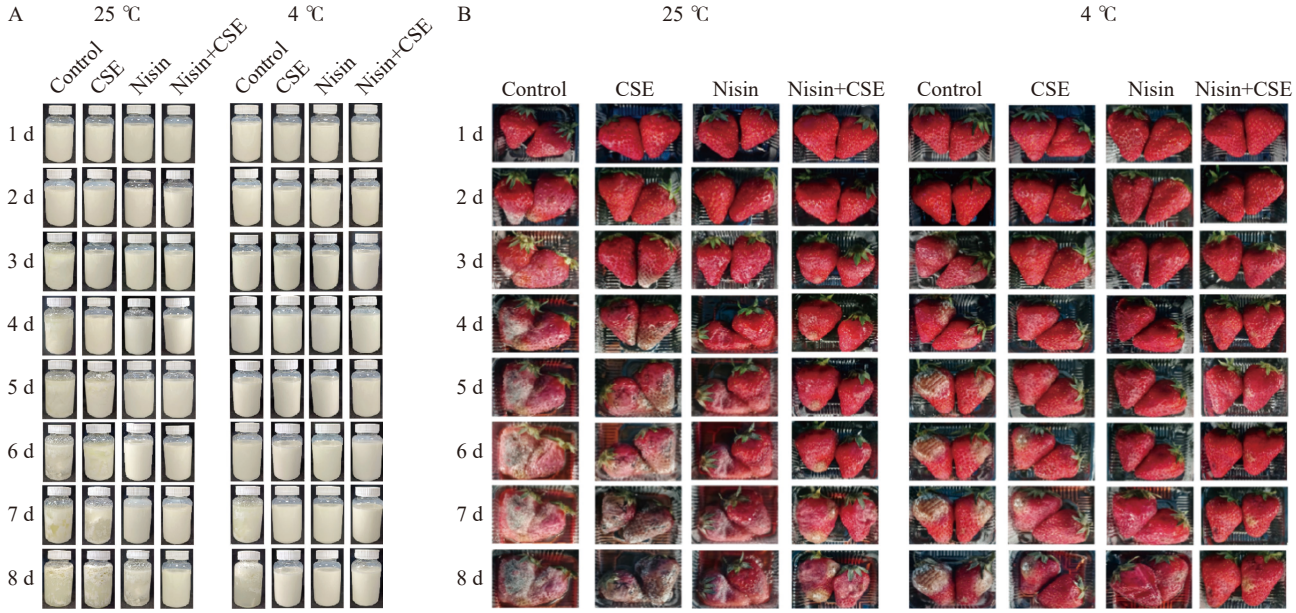


图 5 Nisin 与 CSE 单独及联合对巴氏杀菌乳（A）和草莓（B）贮藏期间的表观状态

Fig.5 Appearance of pasteurized milk (A) and strawberries (B) during storage treated with Nisin and CSE individually or in combination

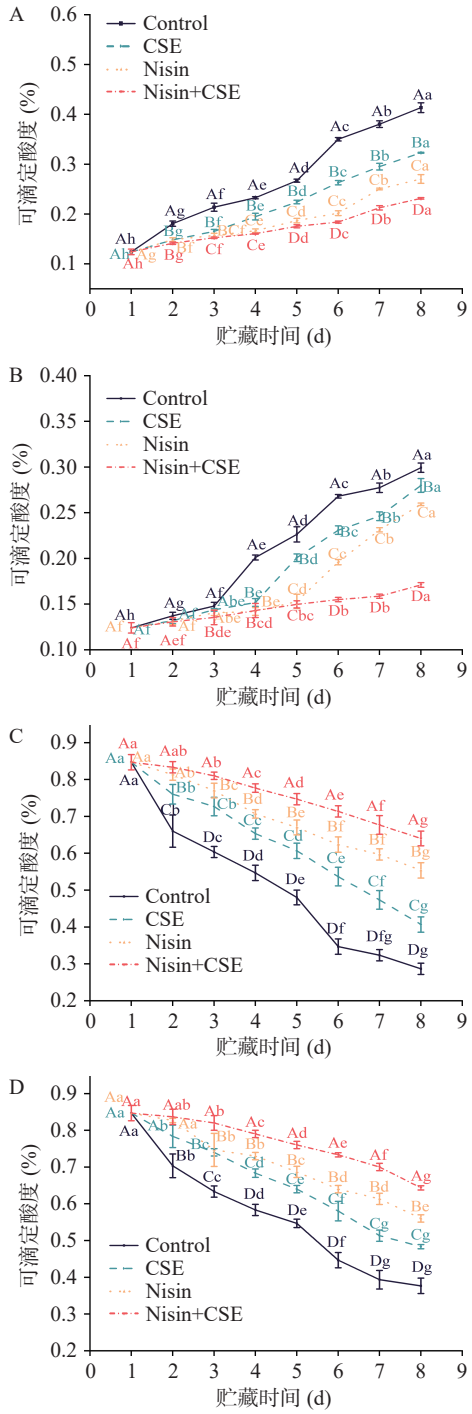


图 6　Nisin 与 CSE 单独及联合对巴氏杀菌乳 25 ℃(A)、4 ℃(B)和草莓 25 ℃(C)、4 ℃(D)可滴定酸度的影响

Fig.6　Effects of Nisin and CSE alone and in combination on the titratable acidity of pasteurized milk at 25 ℃ (A), 4 ℃ (B) and strawberry at 25 ℃ (C) and 4 ℃ (D)

注：图中不同大写字母(A~D)表示在同一处理时间下，不同处理组可滴定酸之间存在显著性差异(P<0.05)；不同小写字母(a~h)表示同一处理组在不同处理时间下可滴定酸存在显著性差异(P<0.05)。

著性变化(P>0.05)，之后随着贮藏时间的延长，蛋白质含量缓慢降低，降低速率低于单独处理组。在 4 ℃时，CSE 单独处理组蛋白质含量在 3 d 后开始呈下降趋势，在贮藏第 8 d 蛋白质含量为 2.37 g/100 g，低于 2.9 g/100 g。Nisin 单独处理组蛋白质含量在贮藏

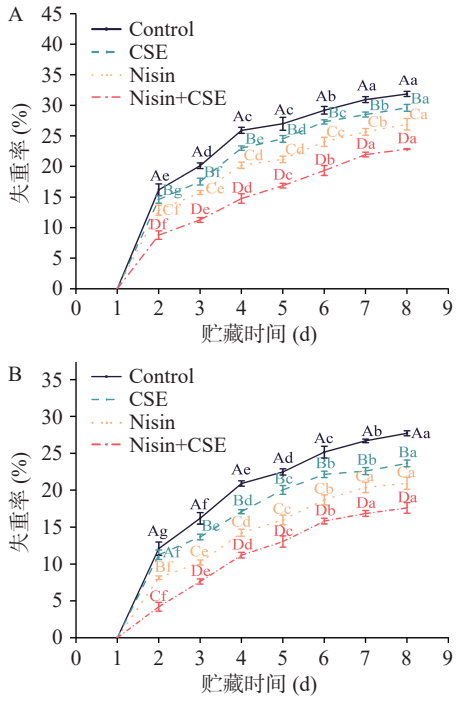


图 7　Nisin 与 CSE 单独及联合对草莓 25 ℃（A）和 4 ℃（B）失重率的影响

Fig.7　Effects of Nisin and CSE alone and in combination on the weight loss rate of strawberry at 25 ℃ (A) and 4 ℃ (B)

注：图中不同大写字母(A~D)表示在同一处理时间下，不同处理组失重率之间存在显著性差异(P<0.05)；不同小写字母(a~g)表示同一处理组在不同处理时间下失重率存在显著性差异(P<0.05)。

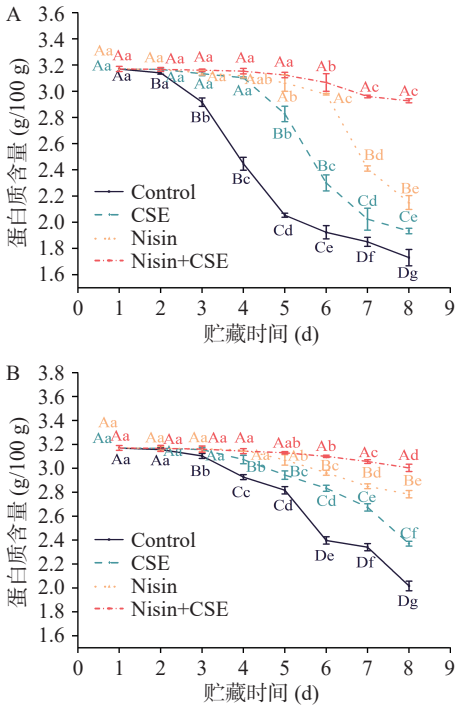


图 8　Nisin 与 CSE 单独或联合使用在 25 ℃(A)和 4 ℃(B)下对巴氏杀菌乳中蛋白质含量的影响

Fig.8　Effects of Nisin and CSE alone or in combination on the protein content in pasteurized milk at 25 ℃ (A) and 4 ℃ (B)

注：图中不同大写字母(A~D)表示在同一处理时间下不同处理组蛋白质含量之间差异显著(P<0.05)；不同小写字母(a~g)表示同一处理组在不同时间下蛋白质含量之间存在显著性差异(P<0.05)。

第 5 d 开始呈下降趋势，在贮藏第 8 d 时蛋白质含量为 2.79 g/100 g，低于 2.9 g/100 g。在贮藏第 8 d 时，Nisin 与 CSE 联合处理组蛋白质含量显著高于 Nisin 与 CSE 单独处理组（P<0.05），且高于 2.9 g/100 g。结果表明，Nisin 与 CSE 联合处理能有效减缓巴氏杀菌乳中蛋白质含量的降低。

2.6.5 Nisin 和 CSE 对草莓抗氧化能力的影响 金黄色葡萄球菌分泌的蛋白酶和脂肪酶破坏草莓细胞，导致维生素 C 和花青素流失，进而降低草莓的抗氧化能力[43]。为了评估不同处理对草莓抗氧化性的影响，同时也作为评价贮藏期间草莓品质变化的指标，本研究测定了在 4 ℃ 和 25 ℃ 储存期间草莓的 DPPH 自由基清除率。草莓的 DPPH 自由基清除率可以作为评价其抗氧化能力强弱的指标。图 9 显示了不同处理组在贮藏期间草莓抗氧化能力的变化。如图 9A 所示，在 25 ℃ 时，Nisin 与 CSE 单独处理组草莓的 DPPH 自由基清除率在第 2 d 最高，分别为 82.16%±0.47%、82.79%±1.04%，在此后几天呈下降趋势。Nisin 与 CSE 联合处理组草莓的 DPPH 自由基清除率在第 4 d 达到最大值为 84.43%±0.47%。如图 9B 所示，在 4 ℃ 时，CSE 单独处理组草莓的 DPPH 自由基清除率在第 2 d 最高为 82.79%±0.91%，Nisin 单独处理组草莓的 DPPH 自由基清除率在第 4 d 最高为 84.85%±0.33%，而 Nisin 与 CSE 联合处理组草莓的 DPPH 自由基清除率在第 5 d 最高为 85.78%±0.38%，且 Nisin 与 CSE 联合处理组在 25 ℃ 和 4 ℃ 条件下贮藏 8 d 后的 DPPH 自由基清除率显著高于 Nisin 与 CSE 单独处理组（P<0.05）。可能是 Nisin 与 CSE 联合处理更为有效地抑制了金黄色葡萄球菌活性，进而减少了其维生素 C 和花青素的流失，从而使其表现出较高的 DPPH自由基清除能力。曾有研究也证实了草莓 DPPH 自由基清除率的降低可能与花青素和维生素 C 等物质的流失有关[44]。

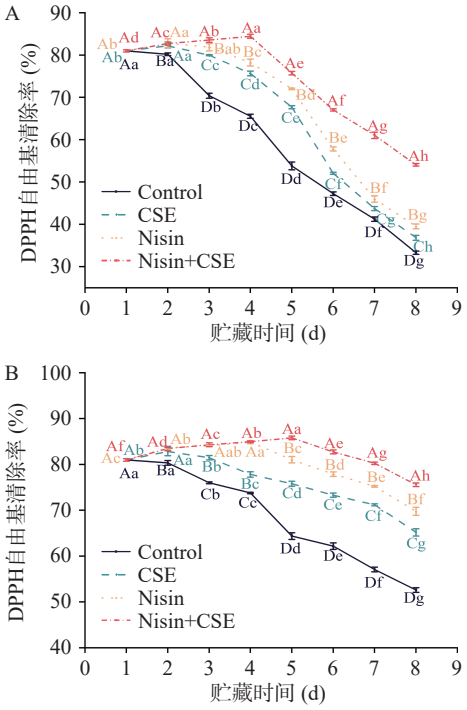


图 9 Nisin 与 CSE 单独或联合使用在 25 ℃(A)和 4 ℃(B)下对草莓 DPPH 自由基清除能力的影响

Fig.9 Effects of Nisin and CSE alone or in combination on the DPPH free radical scavenging activity in strawberries at 25 ℃ (A) and 4 ℃ (B)

注：图中不同大写字母(A~D)表示在同一处理时间下不同处理组 DPPH 清除能力间差异显著（P<0.05）；不同小写字母(a~h)表示同一处理组在不同时间下 DPPH 清除能力之间存在显著性差异（P<0.05）。

3 结论

本研究分析了 Nisin 和 CSE 对金黄色葡萄球菌的抗菌作用，并探究了其对草莓和巴氏杀菌乳贮藏期间品质特性的影响。结果表明，Nisin 和 CSE 对金黄色葡萄球菌具有协同抗菌活性。与 Nisin 和 CSE 单独处理组相比，Nisin 联合 CSE 可增加对金黄色葡萄球菌的抑菌圈直径，降低金黄色葡萄球菌的 ROS 含量和胞外多糖含量。同时，Nisin 和 CSE 联合处理在 25 ℃ 和 4 ℃ 贮藏 8 d 过程中有效地缓解了巴氏杀菌乳和草莓的变质。综上所述，Nisin 与 CSE 联合使用可有效提升对金黄色葡萄球菌的抑制效果，其抗菌作用可能与菌体 ROS 含量及胞外多糖生成降低有关。然而，Nisin 联合 CSE 对金黄色葡萄球菌的主要作用靶点、潜在的抗菌机制以及相关的多组学分析仍需深入探究，该组合在食品基质中的长期稳定性、安全性及其维持的抗菌效力也需进一步评估。未来可结合转录组学、蛋白质组学和代谢组学，进一步探究 Nisin 联合 CSE 对金黄色葡萄球菌的潜在作用靶点与抗菌机制。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] NISA M, AHMAD D R, AHMAD F B, et al. Combating food spoilage and pathogenic microbes via bacteriocins: A natural and eco-friendly substitute to antibiotics[J]. Food Control, 2023, 149: 109710.

[2] SOLAIMAN S, JAYEOLA V, HINES I, et al. Temporal dynamics of *Escherichia coli* O157: H7 transcriptomes on the surface of shredded lettuce[J]. Food Control, 2025, 170: 111032.

[3] SHOAIB M, LI H H, KHAN I M, et al. Emerging MXenes-based aptasensors: A paradigm shift in food safety detection [J]. Trends in Food Science & Technology, 2024, 151: 104635.

[4] ZANETTA L D, HAKIM M P, STEDEFELDT E, et al. Consumer risk perceptions concerning different consequences of food-borne disease acquired from food consumed away from home: A case study in Brazil[J]. Food Control, 2022, 133: 108602.

[5] ZAINUDDIN A H, ROSLAN M Q J, RAZAK M R, et al. Occurrence, distribution, and ecological risk of bisphenol Analogues in marine ecosystem of urbanized coast and estuary[J]. Marine Pollu-

tion Bulletin, 2023, 192: 115019.
[6] SULLIVAN D J, AZLIN-HASIM S, CRUZ-ROMERO M, et al. Antimicrobial effect of benzoic and sorbic acid salts and nanosolubilisates against *Staphylococcus aureus, Pseudomonas fluorescens* and chicken microbiota biofilms[J]. Food Control, 2020, 107: 106786.
[7] D'AMORE T, Di TARANTO A, VITA V, et al. Development and validation of an analytical method for nitrite and nitrate determination in meat products by capillary ion chromatography (CIC)[J]. Food Analytical Methods, 2019, 12(8): 1813−1822.
[8] VASILAKI A, HATZIKAMARI M, STAGKOS-GEORGIADIS A, et al. A natural approach in food preservation: *Propolis* extract as sorbate alternative in non-carbonated beverage[J]. Food Chemistry, 2019, 298: 125080.
[9] LIU B T, YU K F, AHMED I, et al. Key factors driving the fate of antibiotic resistance genes and controlling strategies during aerobic composting of animal manure: A review[J]. Science of the Total Environment, 2021, 791: 148372.
[10] THANJAVUR N, SANGUBOTLA R, LAKSHMI B A, et al. Evaluating the antimicrobial and apoptogenic properties of bacteriocin (nisin) produced by *Lactococcus lactis*[J]. Process Biochemistry, 2022, 122: 76−86.
[11] KHALIL R K S, ElLEITHY A E, AYOUP M S, et al. Zein-based nisin-loaded electrospun nanofibers as active packaging mats for control of *Listeria monocytogenes* on peach[J]. Food Chemistry, 2024, 459: 140441.
[12] FANG Zhantong, YANG Yating, LIN Shuimu, et al. Development and antimicrobial activity of composite edible films of chitosan and nisin incorporated with *Perilla* essential oil-glycerol monolaurate emulsions[J]. Food Chemistry, 2025, 462: 141006.
[13] IBARRA-SÁNCHEZ L A, van TASSELL M L, MILLER M J. Antimicrobial behavior of phage endolysin PlyP100 and its synergy with nisin to control *Listeria monocytogenes* in Queso Fresco[J]. Food Microbiology, 2018, 72: 128−134.
[14] TONG Danya, HAN Panpan, LI Mingrui, et al. Sucrose laurate and nisin synergistically inhibit *Bacillus subtilis* by multiple antibacterial targets and play promising application potential in bread preservation[J]. Food Chemistry, 2025, 470: 142696.
[15] WANG Tao, WANG Shuxuan, DONG Shuchen, et al. Interaction of *Companilactobacillus crustorum* MN047-derived bacteriocins with gut microbiota[J]. Food Chemistry, 2022, 396: 133730.
[16] BOURDOUX S, ZAMBON A, van der LINDEN I, et al. Inactivation of foodborne pathogens on leek and alfalfa seeds with supercritical carbon dioxide[J]. The Journal of Supercritical Fluids, 2022, 180: 105433.
[17] HONG Jing, CHEN Taotao, HU Pei, et al. A novel antibacterial tripeptide from Chinese leek seeds[J]. European Food Research and Technology, 2015, 240(2): 327−333.
[18] WANG Jingyi, ZHANG Chi, WEN Yanchao, et al. Investigating the antibacterial mode of Limosilactobacillus reuteri LR08 regulated by soybean proteins and peptides[J]. Food Chemistry, 2024, 446: 138780.
[19] NURHARTADI E, RODTONG S, THUMANU K, et al. Antibacterial activity of enzymatic corn gluten meal hydrolysate and ability to inhibit *Staphylococcus aureus* in ultra-high temperature processed milk[J]. Food Control, 2025, 169: 110998.
[20] UPADHYAY A, UPADHYAYA I, KOLLANOOR-JOHNY A, et al. Antibiofilm effect of plant derived antimicrobials on *Listeria monocytogenes*[J]. Food Microbiology, 2013, 36(1): 79−89.
[21] YANG Shanshan, LI Xinfei, CANG Weihe, et al. Combined treatment of ε-polylysine and thermosonication to inactivate *Bacillus cereus* and their application in pasteurized milk[J]. Food Bioscience, 2023, 55: 102896.
[22] WANG Hongsu, GUO Ling, LIU Lu, et al. Composite chitosan films prepared using nisin and *Perilla* frutescense essential oil and their use to extend strawberry shelf life[J]. Food Bioscience, 2021, 41: 101037.
[23] ZHAO G, KEMPEN P J, ZHENG T, et al. Synergistic bactericidal effect of nisin and phytic acid against *Escherichia coli* O157: H7[J]. Food Control, 2023, 144: 109324.
[24] YAN Y, XIA X X, FATIMA A, et al. Antibacterial activity and mechanisms of plant flavonoids against gram-negative bacteria based on the antibacterial statistical model[J]. Pharmaceuticals, 2024, 17(3): 292.
[25] WANG Lin, XIN Meihua, LI Mingchun, et al. Effect of the structure of chitosan quaternary phosphonium salt and chitosan quaternary ammonium salt on the antibacterial and antibiofilm activity [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 242: 124877.
[26] YANG Shen, XING Yufan, GAO Jialong, et al. Lacticaseibacillus paracasei fermentation broth identified peptide, Y2Fr, and its antibacterial activity on *Vibrio parahaemolyticus*[J]. Microbial Pathogenesis, 2023, 182: 106260.
[27] QI Yongmei, DONG Yao, GU Jiayue, et al. In-depth genomic identification and safety evaluation of *Lactobacillus* Acidophilus LA85[J]. Journal of Functional Foods, 2024, 123: 106604.
[28] LIN R, YANG Z Y, AWEYA J J, et al. Selection of antimicrobial peptides derived from *Bacillus cereus*: Investigation of their antimicrobial activity and mechanism of action against *Staphylococcus aureus*[J]. LWT, 2025, 216: 117312.
[29] KAWANO A, YAMASAKI R, SAKAKURA T, et al. Reactive oxygen species penetrate persister cell membranes of *Escherichia coli* for effective cell killing[J]. Frontiers in Cellular and Infection Microbiology, 2020, 10: 496.
[30] 苑庆欣, 刘阔, 包旭华, 等. 白屈菜红碱抗耐甲氧西林金黄色葡萄球菌作用机制研究[J]. 畜牧兽医学报, 2024, 55(10): 4670−4678. [YUAN Qingxin, LIU Kuo, BAO Xuhua, et al. The mechanism of chelerythrine against methicillin-resistant *Staphylococcus aureus*[J]. Acta Veterinaria et Zootechnica Sinica, 2024, 55(10): 4670−4678.]
[31] 罗泽萍, 潘立卫, 李丽. 赪桐提取物抗菌活性及其对金黄色葡萄球菌的抗菌机理[J]. 南方农业学报, 2019, 50(12): 2778−2786. [LUO Zeping, PAN Liwei, LI Li. Antimicrobial activity of extracts from *Clerodendrum japonicum* and its antibacterial mechanism on *Staphylococcus aureus*[J]. Journal of Southern Agriculture, 2019, 50(12): 2778−2786.]
[32] LI Hong, LI Jun, HUA Zichun, et al. Transcriptomic combined with molecular dynamics simulation analysis of the inhibitory mechanism of clove essential oil against *Staphylococcus aureus* biofilm and its application on surface of food contact materials[J]. Food and Bioproducts Processing, 2025, 150: 131−140.
[33] QIN W, STÄRK H J, REEMTSMA T. Ruthenium red: A highly efficient and versatile cell staining agent for single-cell analysis using inductively coupled plasma time-of-flight mass spectrometry[J]. The Analyst, 2021, 146(22): 6753−6759.
[34] 李惠. 枯茗醛对金黄色葡萄球菌抑制机理研究及其应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2024. [LI Hui. Action mode of cuminaldehyde against *Staphylococcus aureus* and its application[D].

Guangzhou: South China University of Technology, 2024.]
[35] ALSAEDI A W M, AL-HILPHY A R, AL-MOUSAWI A J, et al. Non-thermal pasteurization of milk by elongated electrode moderate electrical field: Chemical and sensory analysis during cold storage and shelf-life determination[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2024, 94: 103647.
[36] BAI Fangting, GUO Du, WANG Yueyi, et al. The combined bactericidal effect of nisin and thymoquinone against *Listeria monocytogenes* in Tryptone Soy Broth and sterilized milk[J]. Food Control, 2022, 135: 108771.
[37] LI Qingxiang, YU Shuna, HAN Jinzhi, et al. Synergistic antibacterial activity and mechanism of action of nisin/carvacrol combination against *Staphylococcus aureus* and their application in the infecting pasteurized milk[J]. Food Chemistry, 2022, 380: 132009.
[38] NING Yawei, HOU Linlin, MA Mengge, et al. Synergistic antibacterial mechanism of sucrose laurate combined with nisin against *Staphylococcus aureus* and its application in milk beverage [J]. LWT, 2022, 158: 113145.
[39] WANG Lin, YUAN Tianxin, ZHANG Yan. Application of laccase-inorganic nanoflowers based time-temperature integrator to real-time monitor the freshness of pasteurized milk[J]. Food Chemistry: X, 2024, 24: 101916.
[40] ZOU Ying, YU Yuanshan, CHENG Lina, et al. Effects of curcumin-based photodynamic treatment on quality attributes of fresh-cut pineapple[J]. LWT, 2021, 141: 110902.
[41] 代晓航, 郭灵安, 魏超, 等. 金黄色葡萄球菌在草莓上生长模拟试验研究[J]. 中国食品卫生杂志, 2017, 29(1): 1−4. [DAI Xiaohang, GUO Ling'an, WEI Chao, et al. Study of simulating growth of *Staphylococcus aureus* on strawberry[J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2017, 29(1): 1−4.]
[42] NUNES NASCIMENTO J C, ALVARENGA V O, PAULINO B N, et al. *Staphylococcus aureus*in food safety: Antimicrobial resistance, detection technologies, and future perspectives[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2026, 66(3): 607−630.
[43] 陈卓, 宋俏微, 张水洞, 等. 氧化淀粉的抑菌效果及草莓涂膜保鲜应用[J]. 食品科学, 2022, 43(21): 324−331. [CHEN Zhuo, SONG Qiaowei, ZHANG Shuidong, et al. Antimicrobial effect of oxidized starch and its application as a coating for strawberry preservation[J]. Food Science, 2022, 43(21): 324−331.]
[44] SHIN Y, RYU J A, LIU R H, et al. Harvest maturity, storage temperature and relative humidity affect fruit quality, antioxidant contents and activity, and inhibition of cell proliferation of strawberry fruit[J]. Postharvest Biology and Technology, 2008, 49(2): 201−209.