DOI:10.12441/spyswjs.20250405001 [文章编号] 1673-1689(2026)03-0126-12

微酸性电解水协同抗坏血酸处理对冷藏湖羊肉品质及微生物多样性的影响

曾 霖[1] 张 斌[1] 陈争上[2] 钱书意[1*] 桂栋彬[1]

(1. 蚌埠学院食品与生物工程学院,安徽 蚌埠 233030; 2. 安徽省争华羊业集团有限公司,安徽 蚌埠 233700)

摘要:【目的】探究微酸性电解水(slightly acidic electrolyzed water,SAEW)协同抗坏血酸(ascorbic acid,AA)处理对湖羊肉在冷藏期间的品质及微生物多样性的影响。【方法】分别使用AA、SAEW、SAEW+AA保鲜液对湖羊鲜肉样品进行处理,检测4 ℃冷藏期间湖羊肉的硫代巴比妥酸反应物(thiobarbituric acid reactive substance,TBARS)值、总挥发性盐基氮(Total volatile basic nitrogen,TVB-N)值、pH和汁液流失率等理化指标变化,重点关注其对湖羊肉微生物多样性(菌落总数和菌群结构)的影响。【结果】与对照组(未使用保鲜液处理)相比,SAEW处理可显著降低湖羊肉冷藏期间的菌落总数及大肠菌群数(P<0.05),有效延缓TVB-N值、pH与汁液流失率的升高。SAEW+AA处理在湖羊肉冷藏期间的抑菌效果最显著,保持了较低的TBARS值和TVB-N值,同时有效抑制了汁液流失。在货架期方面,以菌落总数≤1×10^6 CFU/g和大肠菌群数≤1×10^4 CFU/g为可接受限值,SAEW处理将湖羊肉货架期由6 d延长至10 d,SAEW+AA组的湖羊肉微生物指标在整个冷藏期(12 d)内未超过可接受限值。冷藏湖羊肉的微生物高通量分析结果表明,AA与SAEW的单独或联用处理均可降低冷藏湖羊肉微生物的丰度和多样性,同时可提高放线菌门、酸杆菌门、好氧芽孢杆菌属、链酸嗜菌属与酸杆菌属的相对丰度。【结论】AA协同SAEW处理可有效延缓湖羊肉在冷藏期间的品质劣变,且可有效抑制菌落总数和降低微生物的丰度和多样性,延长了湖羊肉的货架期。

关键词:微酸性电解水;抗坏血酸;湖羊肉;冷藏;菌群结构

Effects of Slightly Acidic Electrolyzed Water Combined with Ascorbic Acid Treatment on the Quality and Microbial Diversity of Refrigerated Hu Sheep Meat

ZENG Lin[1] *ZHANG Bin*[1] *CHEN Zhengshang*[2] *QIAN Shuyi*[1*] *GUI Dongbin*[1]

(1. College of Food and Biological Engineering, Bengbu University, Bengbu 233030, China; 2. Anhui Zhenghua Sheep Industry Group Co., Ltd., Bengbu 233700, China)

Abstract: [**Objective**] This study aimed to investigate the effects of slightly acidic electrolyzed water (SAEW) combined with ascorbic acid (AA) treatment on the quality and microbial diversity of Hu sheep (*Ovis aries*) meat during refrigeration. [**Method**] The fresh meat samples were treated with AA, SAEW, and SAEW+AA as preservatives, respectively. The changes in physicochemical indicators, including thiobarbituric acid reactive substances (TBARS) value, total volatile basic nitrogen (TVB-N) value, pH, and drip loss rate, were monitored for the meat samples during the refrigeration at 4 ℃. Special attention was paid to the effects on the microbial diversity (total microbial count and microbial community structure). [**Result**] Compared with the control group (untreated with preservatives), the SAEW treatment reduced the total microbial count and coliform count in Hu

基金项目:安徽省教育厅高校重点研究项目(2023AH052940,2025AHGXZK30988);安徽省教育厅优秀青年教师培育项目(YQYB2023056);安徽省科技特派团项目(2023tpt034)。

通信作者:钱书意(1994—),男,博士,讲师,主要从事肉类贮存与保鲜技术研究。E-mail:syqian1994@163.com

收稿日期:2025-04-05 **修回日期:**2025-05-09

sheep meat during refrigeration (P<0.05) and effectively delayed the increases in TVB-N value, pH, and drip loss rate. Notably, the SAEW+AA group exhibited the most significant antimicrobial effect, maintaining the lowest TBARS and TVB-N values during refrigeration while effectively reducing rip loss rate. In terms of shelf life, with total microbial count ⩽ 1×10^6 CFU/g and coliform count ⩽ 1×10^4 CFU/g as the acceptable upper limits, SAEW treatment extended the shelf life of Hu sheep meat samples from 6 d to 10 d. Remarkably, the microbial indicators of the SAEW+AA group remained below acceptable upper limits throughout the entire refrigeration period (12 d). High-throughput sequencing analysis of the microbial communities revealed that AA and SAEW treatments, whether applied individually or in combination, reduced microbial abundance and diversity in Hu sheep meat. At the same time, they increased the relative abundance of Actinobacteria, Acidobacteria, *Aeribacillus*, *Streptacidiphilus*, and *Acidobacterium*. [**Conclusion**] The AA+SAEW treatment effectively delays quality deterioration of Hu sheep meat during refrigeration, and it effectively reduces total microbial count and microbial abundance and diversity, thereby extending the shelf life of Hu sheep meat.

Keywords: slightly acidic electrolyzed water; ascorbic acid; Hu sheep (*Ovis aries*) meat; refrigeration; microbial community structure

湖羊（*Ovis aries*）是皮肉兼用型绵羊，具有出肉率高、适应性强、必需氨基酸含量高等优良特性，大量养殖于浙江湖州、嘉兴及皖北等区域。宰后湖羊肉极易受到病原微生物的污染而腐败变质，存在货架期短等问题，严重制约了湖羊养殖业的健康、可持续发展。肉品抑菌保鲜技术有助于延长货架期，降低经济损失[1]。目前，物理杀菌保鲜技术在肉类领域中的应用最广泛，但存在一定缺陷。例如，低温保鲜处理会导致肉品在解冻过程中汁液渗出严重，造成营养物质流失[2]；高剂量辐照处理易诱导肉中的蛋白质和脂肪氧化分解，造成营养成分损失，并伴随着色泽的改变[3]；传统热杀菌技术能有效杀灭大部分病原微生物，但无法避免高温处理带来的负面影响[4]。因此，开发高效的抑菌保鲜方法已成为当前的研究重点。

SAEW是一种新型的绿色杀菌剂，其主要成分为次氯酸（HClO），具有广谱杀菌、高安全性、无毒、环保及无残留等特点，在食品保鲜加工领域有广阔的应用前景[5]。SAEW一般由电解盐水或盐酸溶液制备，其pH为5.0~6.5，该环境下不利于细菌生长繁殖。此外，SAEW中的HClO、ClO^-和Cl^-可通过影响细菌的生理生化反应，促使其凋亡和坏死[6]。已有研究报道，SAEW可抑制水产品以及牛肉、鸡肉等肉类中的微生物生长繁殖，从而延长其货架期[7-9]。

除有害微生物污染外，脂肪氧化也是影响肉品品质的重要因素。羊肉含有大量的不饱和脂肪酸，易氧化、酸败，从而发生变质，并产生异味，严重影响羊肉的口感和营养价值[10]。AA是一种强抗氧化剂，可有效抑制肉类脂肪的氧化[11]。研究表明，AA能降低山羊肉、牛肉和鸡肉中的TBARS值，有效抑制脂肪氧化，维持其营养价值和感官特性[12-13]。因此，为了开发一种既能延长肉品货架期又能抑制其冷藏品质劣变的新型保鲜技术，作者研究了AA协同SAEW处理对冷藏湖羊肉贮藏品质及微生物多样性的影响，旨在为肉制品的抑菌保鲜工艺开发提供理论依据和技术支撑。

1　材料与方法

1.1　材料与试剂

屠宰后的新鲜湖羊胴体（12月龄，雄性）购自安徽省争华羊业集团有限公司。将湖羊胴体置于（4±1）℃泡沫箱中，3 h内运回实验室，然后在净化操作台上用无菌手术刀、剪刀和镊子将胴体分割成50 g左右的肉块（5 cm×5 cm×2 cm）。

盐酸、氯化钠、三氯乙酸、乙二胺四乙酸二钠、2-硫代巴比妥酸：分析纯，国药集团化学试剂有限公司；平板计数琼脂培养基：杭州百思生物技术有限公司；大肠菌群数测试片：广东达元绿洲食品安全科技股份有限公司；Axygen细菌试剂盒：江苏省康宁生命科学（吴江）有限公司；AA粉末；食品级，郑州裕和食品添加剂有限公司。

1.2　仪器与设备

次氯酸水发生器：HD-240L型，上海富强旺卫生用品有限公司；便携式水质分析仪：

MDS-2207WX型，迈德施（上海）分析仪器有限公司；电子分析天平：FA214型，海康威视数字技术（上海）有限公司；数显恒温水浴锅：HH-S6型，金坛杰瑞尔电器有限公司；恒温培养箱：PH-240A型，上海一恒科学仪器有限公司；紫外-可见分光光度计：TU1901型，北京普析通用仪器有限责任公司；全自动凯氏定氮仪：K9860型，深圳海能未来技术集团股份有限公司；立式鼓风干燥箱：HTG型，上海东麓仪器设备有限公司；台式pH计：PHS-2F型，上海仪电科学仪器股份有限公司；基因测序仪：NovaSeq 6000型，美国Illumina公司。

1.3 SAEW与AA的处理方式优化

1.3.1 SAEW与AA溶液的制备

采用次氯酸水发生器（执行标准Q31/0116000181C001），利用电解盐酸（1.60 mol/L）和氯化钠溶液（0.05 mol/L）制备SAEW。采用便携式水质分析仪测定pH，采用碘量法测定有效氯浓度。结果表明，SAEW的pH为6.02±0.16，有效氯浓度为0.002 mol/L。

根据试验需求，加入适量的无菌双蒸水溶解AA粉末制备AA溶液。

1.3.2 SAEW浸泡时间的筛选

以细菌菌落总数（total viable count，TVC）灭活量和大肠菌群灭活量为指标，确定最佳的SAEW浸泡时间。无菌称取羊肉样本的质量，加入9倍质量的无菌生理盐水，10 000 r/min匀浆2 min，然后使用生理盐水进行10倍梯度稀释。

1）TVC灭活量测定：参照GB 4789.2—2022的方法测定TVC。取1.0 mL稀释样品接种在平板计数琼脂培养基上，4 ℃孵育7 d后进行细菌菌落计数，计算TVC灭活量。

2）大肠菌群灭活量测定：参照大肠菌群数测试片说明书测定大肠菌群数，计算大肠菌群灭活量。

TVC灭活量和大肠菌群灭活量计数试验均重复3次，计数结果以CFU/g表示。

1.3.3 AA最佳浓度和浸泡时间的筛选

通过测定TBARS值来评估AA的抗氧化性能。硫代巴比妥酸会与湖羊肉脂肪氧化产物丙二醛（malondialdehyde，MDA）以2∶1的浓度比形成红棕色络合物，可通过测量络合物水平来反映脂肪氧化水平。参照GB 5009.181—2016《食品安全国家标准 食品中丙二醛的测定》的方法测定MDA质量。TBARS值（mg/kg）的计数结果以每千克羊肉中含有的MDA质量表示。

设置4种AA浓度梯度：5.68、11.36、22.72、34.08 mmol/L。将湖羊肉在含SAEW或AA的溶液中分别浸泡1、2、3、4 min，将浸泡在预冷无菌生理盐水中的湖羊肉作为对照组，样品风干后放入无菌聚丙烯包装盒中，用保鲜膜覆盖，于4 ℃保藏，7 d后取出样品测定其TBARS值，每个处理组设置3个平行。

1.4 贮藏试验

为检验AA协同SAEW处理对湖羊肉的保鲜效果，按照上述1.1的方法获得质量为50 g左右的湖羊肉样品72份，分为4个组：对照组、SAEW组、AA组和SAEW+AA组，每组样品18份。以未处理的湖羊肉样品作为对照组；对于SAEW组和AA组，分别将样品浸泡在SAEW和22.72 mmol/L AA溶液中3 min；对于SAEW+AA组，先将样品在SAEW中浸泡3 min，吸干水分，然后在22.72 mmol/L AA溶液中浸泡3 min。处理后，吸干水分，放入无菌聚丙烯包装盒中，再用保鲜膜覆盖后置于4 ℃冰箱贮藏，分别在贮藏第2、4、6、8、10、12天取样，每个处理组在每个时间点取样3份，用于微生物数量和理化指标测定。

按照上述1.1的方法获得质量为50 g左右的湖羊肉样品16份，分为4个组：对照组、SAEW组、AA组和SAEW+AA组，每个处理组4个平行，4 ℃贮藏12 d后取样，用于微生物菌群结构分析。

1.5 指标检测

1.5.1 pH

参照GB 5009.237—2016中的方法，向湖羊肉样本中加入9倍体质量的氯化钾溶液，匀浆后使用pH计测定样本的pH，每个样本测定3次，结果取平均值。

1.5.2 TVB-N值

参照GB 5009.228—2016的凯氏定氮法测定TVB-N值。将湖羊肉样品剪碎，称取2.0 g样品与1.0 g氧化镁混合均匀，装入全自动凯氏定氮仪消化管中，参照仪器操作说明书对样本进行测量。TVB-N值（mg/100 g）以100 g湖羊肉中含有的TVB-N质量计。

1.5.3　汁液流失率

称量湖羊肉样本在不同时间点的质量，每个样品做3次平行试验，按式（1）计算汁液流失率（drip loss rate，DLR）。

$$D_{LR}=[1-(m_n/m_0)]\times 100\% \quad (1)$$

式中：

D_{LR}——汁液流失率，%；

m_0——湖羊肉样本的初始质量，g；

m_n——湖羊肉样本在第n（n=2，4，6，8，10，12）天的质量，g。

1.6　菌群结构分析

使用液氮对湖羊肉样品进行低温研磨，使用细菌试剂盒参照说明书提取样本总DNA，使用引物27F（5′-AGAGTTTGATCMTGGCTCAG-3′）和1492R（5′-GGTTACCTTGTTACGACTT-3′）对细菌16S rDNA的V4区域进行扩增。然后将扩增产物送往百迈客生物科技有限公司构建cDNA文库，并使用Illumina NovaSeq 6000进行测序。对测序数据进行处理，获得有效数据Clean Reads。采用USEARCH软件对相似性高于97%的序列进行操作分类单元（operational taxonomic units，OUTs）聚类。通过R语言的Vegan分析α指数（Chao1、ACE、Simpson和Shannon），并基于α指数表征样本菌群的丰富度和多样性。

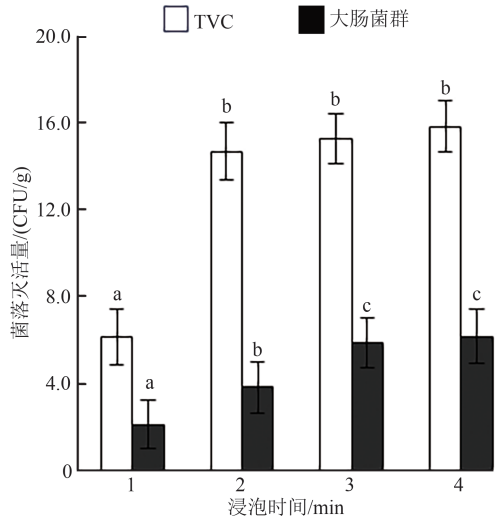
1.7　统计分析

数据以平均值±标准差表示，采用SPSS 20.0软件进行统计学分析。先进行单因素方差分析，再进行Duncan's多重比较分析，显著性差异水平设为P<0.05。通过Spearman相关性分析评估不同参数之间的相关性。

2　结果与讨论

2.1　SAEW和AA的最佳处理条件筛选

如图1所示，湖羊肉样品在SAEW中浸泡2、3、4 min时的TVC灭活量显著高于浸泡1 min时的TVC灭活量（P<0.05）；当样品在SAEW中浸泡2、3、4 min时，这3种处理方式对TVC灭活量的影响无显著差异（P>0.05）。当湖羊肉样品在SAEW中浸泡1~3 min时，大肠菌群灭活量随SAEW浸泡时间的延长而增加；当样品在SAEW中浸泡3、4 min时，这2种处理方式的大肠菌群灭活量无显著差异（P>0.05）。因此，后续试验中SAEW的浸泡时间设置为3 min。

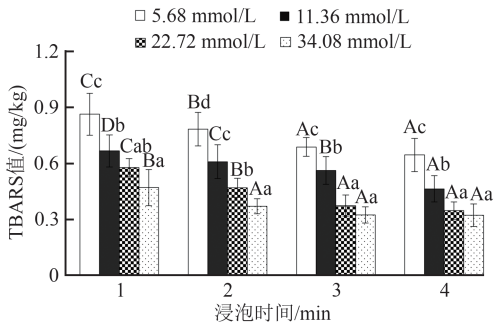


不同字母表示TVC灭活量或大肠菌群灭活量在不同取样时间点之间存在显著差异（P<0.05）。

图1　SAEW处理对湖羊肉菌落灭活效果的影响

Fig. 1　Effects of SAEW treatment on the microbial inactivation in Hu sheep meat

如图2所示，当AA的浓度相同时，TBARS值随浸泡时间的延长呈下降趋势；当浸泡时间相同时，TBARS值随AA浓度的升高呈下降趋势。当AA的浓度为22.72 mmol/L时，浸泡3、4 min时的TBARS值较小；当AA的浓度为34.08 mmol/L时，浸泡2、3、4 min的TBARS值较小。22.72 mmol/L AA浸泡3 min的处理方式与34.08 mmol/L AA浸泡3 min相比，湖羊肉样品的TBARS值无显著差异（P>0.05）。为了尽可能降低AA在湖羊肉中的残留，后续试验中AA的浓度设置为22.72 mmol/L，浸泡时间设置为3 min。



不同小写字母表示相同浸泡时间不同处理组之间差异显著（P<0.05）；不同大写字母表示相同处理组不同浸泡时间之间差异显著（P<0.05）。

图2　AA处理对湖羊肉TBARS值的影响

Fig. 2　Effects of AA treatment on TBARS value in Hu sheep meat

2.2 SAEW 和 AA 对冷藏湖羊肉 TVC 和大肠菌群数的影响

TVC 和大肠菌群数是造成肉类品质劣变的重要因素，是评判肉类食用安全性的重要指标。肉类中 TVC 和大肠菌群的可接受限值分别为 1×10^6 CFU/g 和 1×10^4 CFU/g（GB 16869—2005）。如表 1~2 所示，4 个处理组的 TVC 和大肠菌群数均随贮藏时间的延长而增加，但对照组的 TVC 和大肠菌群数的生长繁殖速度高于其他组。对照组、SAEW 组和 AA 组的菌落总数分别在贮藏 8、12、10 d 时超过 1×10^6 CFU/g，大肠菌群数分别在贮藏 6、12、8 d 时超过 1×10^4 CFU/g，表明 SAEW 和 AA 均具有良好的抑菌效果。SAEW 中含有次氯酸等抗菌成分，可高效抑制羊肉表面微生物的生长[5,14]。AA 是酸性物质，释放出的质子（H^+）会干扰细菌核酸和蛋白质的表达，抑制细菌生长[15]。SAEW+AA 组的 TVC 和大肠菌群数均在 12 d 时出现最大值，分别为 3.63×10^5 CFU/g 和 1.86×10^3 CFU/g，但均未超过可接受限值。这表明 AA 对 SAEW 的抑菌效果产生了协同效应，进一步抑制了细菌的繁殖，延缓了湖羊肉的品质劣变速度。AA 可使 SAEW 处理后的肉类 pH 进一步降低，破坏细胞结构，加速 SAEW 和 AA 向羊肉渗透，增强了抑菌效果[16]。

表 1 SAEW 和 AA 处理对湖羊肉 TVC 的影响

Table 1 Effects of SAEW and/or AA treatments on the TVC in Hu sheep meat

组别	TVC/（CFU/g）					
	2 d	4 d	6 d	8 d	10 d	12 d
对照组	4.79×10^{3d}	4.07×10^{4d}	7.08×10^{5d}	3.63×10^{7d}	3.31×10^{8d}	1.20×10^{9d}
SAEW 组	8.32×10^{2b}	1.17×10^{3b}	5.50×10^{3b}	6.76×10^{4b}	6.76×10^{5b}	1.51×10^{7b}
AA 组	1.41×10^{3c}	4.07×10^{3c}	3.02×10^{4c}	4.27×10^{5c}	1.20×10^{7c}	1.66×10^{8c}
SAEW+AA 组	2.75×10^{2a}	3.89×10^{2a}	7.94×10^{2a}	2.88×10^{3a}	3.39×10^{4a}	3.63×10^{5a}

注：同列不同小写字母表示不同处理组之间的 TVC 差异显著（$P<0.05$）。

表 2 SAEW 和 AA 处理对湖羊肉大肠菌群数的影响

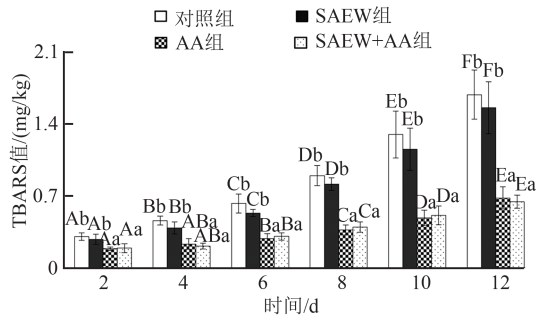
Table 2 Effects of SAEW and/or AA treatments on the coliform count in Hu sheep meat

组别	大肠菌群数/（CFU/g）					
	2 d	4 d	6 d	8 d	10 d	12 d
对照组	1.12×10^{1b}	2.75×10^{2c}	1.74×10^{4d}	2.00×10^{5d}	6.92×10^{5d}	1.48×10^{6d}
SAEW 组	4.57×10^{0a}	1.12×10^{1ab}	4.90×10^{1b}	2.75×10^{2b}	2.19×10^{3b}	2.75×10^{4b}
AA 组	5.25×10^{0a}	1.51×10^{1b}	2.95×10^{2c}	2.29×10^{4c}	1.48×10^{5c}	6.03×10^{5c}
SAEW+AA 组	4.17×10^{0a}	6.03×10^{0a}	1.32×10^{1a}	4.47×10^{1a}	2.09×10^{2a}	1.86×10^{3a}

注：同列不同小写字母表示不同处理组之间的大肠菌群数差异显著（$P<0.05$）。

2.3 SAEW 和 AA 对冷藏湖羊肉 TBARS 值的影响

羊肉中的脂肪酸，尤其是不饱和脂肪酸，在贮藏过程中易受到微生物、热、光和内源酶等作用的影响而发生氧化酸败，导致肉质劣变，产生哈喇味[17]。TBARS 是评估肉类脂肪氧化的生物标志物[18]。如图 3 所示，4 个处理组的 TBARS 值均随贮藏时间的延长而升高。在湖羊肉贮藏期间，微生物大量繁殖产生了许多醛类代谢产物，使 TBARS 值急剧上升。相同贮藏时间下，SAEW 组的 TBARS 值与对照组之间无显著差异（$P>0.05$），这一结果与 Sheng 等[8]的研究结果相似。Xuan 等[19]研究发现，冷藏条件下经 SAEW 处理的鱿鱼



不同小写字母表示相同时间的不同处理组之间差异显著（$P<0.05$）；不同大写字母表示相同处理组不同时间之间差异显著（$P<0.05$）。

图 3 SAEW 和 AA 处理对湖羊肉 TBARS 值的影响

Fig. 3 Effects of SAEW and/or AA treatments on TBARS value in Hu sheep meat

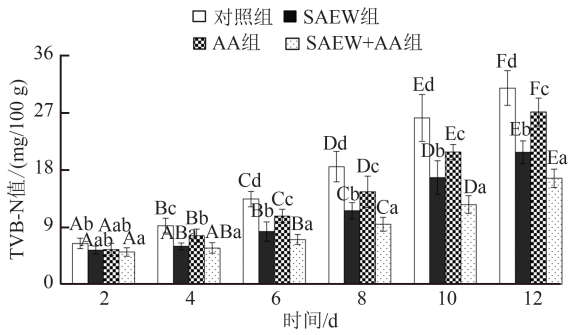
TBARS值并未出现明显下降。这些研究结果均表明，SAEW不具有抗氧化性能。在湖羊肉的整个贮藏期间，AA组的TBARS值显著低于对照组（$P<0.05$）。AA具有很强的还原性，可以消除肉类中的自由基，并抑制黄嘌呤氧化酶、脂氧化酶和环状氧化酶等酶的活性，从而缓解羊肉的脂肪氧化[20]。相同贮藏时间下，SAEW+AA组的TBARS值显著低于SAEW组（$P<0.05$），但与AA组无显著差异（$P>0.05$），表明AA可以弥补SAEW在羊肉贮藏过程中抗脂肪氧化功能的缺陷。

2.4　SAEW和AA对冷藏湖羊肉TVB-N值的影响

羊肉含有丰富的蛋白质，在内源酶和微生物的作用下，蛋白质会通过脱氨和脱羧反应产生碱性含氮化合物。TVB-N值是一种反映肉类新鲜程度的重要指标[21]。总体上看，4个处理组的TVB-N值在贮藏前期缓慢升高，在贮藏中后期快速升高，见图4。其主要原因是贮藏起始阶段，微生物数量较少，蛋白质分解较慢；随着微生物的大量生长繁殖，蛋白质的降解速度加快；此外，细胞结构破坏后释放出来的内源酶也加速了蛋白质的降解。一级鲜肉和二级鲜肉的TVB-N值的最大允许上限分别为15 mg/100 g和20 mg/100 g[22]。对照组、SAEW组和SAEW+AA组的TVB-N值分别在8、10、12 d时高于15 mg/100 g，表明SAEW和SAEW+AA均能有效减缓TVB-N值的上升（$P<0.05$），这主要归因于它们对细菌和内源酶的高效抑制作用[6,23]。对照组、SAEW组和AA组的TVB-N值分别在10、12、10 d时高于20 mg/100 g，而SAEW+AA组的TVB-N值在整个贮藏期间均低于20 mg/100 g。可能是由于AA提高了SAEW的抑菌效果，有效维持了SAEW+AA组湖羊肉样品的新鲜度。已有大量研究表明，TVB-N值与菌落总数之间存在高度相关性[21]，其作用机制有待进一步研究。

2.5　SAEW和AA对冷藏湖羊肉pH的影响

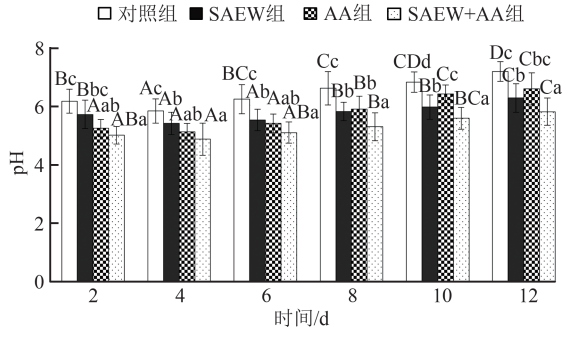
pH会直接或间接影响肉的嫩度、颜色和持水力等品质[24]。羊肉pH过低时可能出现排酸不充分导致的肉类品质劣变，pH过高时可能影响肉类的食用安全性[25]。如图5所示，对照组和SAEW组的湖羊肉pH在贮藏过程中呈先降低后升高的趋势。在湖羊肉贮藏初期，由于细胞内的氧化供应中断，细菌以葡萄糖为主要能量物质进行糖酵解代谢，其产物乳酸的积累会导致pH下降。随着贮藏时间的延长，微生物会进一步分解蛋白质产生胺、氨类等碱性物质，从而导致pH升高[26-27]。AA组和SAEW+AA组的pH随贮藏时间的延长总体呈升高趋势，这可能与细菌的繁殖和内源酶释放相关[28]。除贮藏2 d外，SAEW组的pH均显著小于对照组（$P<0.05$）。SAEW可以通过抑制微生物的生长繁殖来降低蛋白质分解，从而延缓pH的升高速度[29]。在贮藏期内，AA组的pH均小于对照组。AA呈酸性，可以渗透到细胞内，降低肉类的pH；同时，AA具有较好的抑菌效果，可延缓蛋白质的分解，从而抑制碱性物质的产生[11]。在贮藏期内，SAEW+AA组的pH小于SAEW组，这除了归因于AA溶液的酸性作用外，还与SAEW+AA的抑菌效果优于SAEW相关。已有研究表明，在一定范围内，pH降低有利于延长肉类的货架期[30]。



不同小写字母表示相同时间不同处理组之间差异显著（$P<0.05$）；不同大写字母表示相同处理组不同时间之间差异显著（$P<0.05$）。

图4　SAEW和AA处理对湖羊肉TVB-N值的影响

Fig. 4　Effects of SAEW and/or AA treatments on TVB-N value in Hu sheep meat



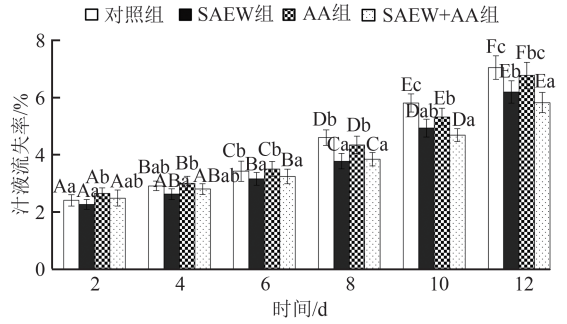
不同小写字母表示相同时间不同处理组之间差异显著（$P<0.05$）；不同大写字母表示相同处理组不同时间之间差异显著（$P<0.05$）。

图5　SAEW和AA处理对湖羊肉pH的影响

Fig. 5　Effects of SAEW and/or AA treatments on pH in Hu sheep meat

2.6 SAEW和AA对冷藏湖羊肉汁液流失率的影响

汁液流失率是反映肉类保水性和嫩度的重要指标[31]。如图6所示，4个处理组的汁液流失率均随贮藏时间的延长而升高。其主要原因是微生物的分解作用和内源酶的自溶作用破坏了肌原纤维的网络结构，增加了细胞膜的通透性，导致结合水变为自由水，降低了保水性能[32]。另外，微生物的生长繁殖和酶的催化反应需要消耗一部分水，导致肌肉的汁液流失率增加[33]。在6~12 d贮藏时间内，SAEW组的汁液流失率显著低于对照组（$P<0.05$）。SAEW可以通过抑制微生物的生长繁殖和内源酶活性来降低蛋白质分解，从而使羊肉维持较好的保水性[5]。AA组的汁液流失率在2 d时显著高于对照组（$P<0.05$），其主要原因可能是AA降低了羊肉的pH，而肌肉蛋白净电荷数随H^+浓度的升高而降低，导致分子斥力减小，肌原纤维结构收缩，保水性降低[34]。同时，AA改变了细胞膜的通透性，导致细胞内的水分流失增加[35]。值得一提的是，SAEW+AA组的汁液流失率在贮藏前期（2~8 d）略高于SAEW组（$P>0.05$），但在贮藏后期（10~12 d），SAEW+AA组的汁液流失率在相同贮藏时间的处理组中最低。后期可考虑延长试验贮藏期，详细探讨SAEW协同AA对肌肉的保水效果。



不同小写字母表示相同时间不同处理组之间差异显著（$P<0.05$）；不同大写字母表示相同处理组不同时间之间差异显著（$P<0.05$）。

图6 SAEW和AA处理对湖羊肉汁液流失率的影响

Fig. 6 Effects of SAEW and/or AA treatments on drip loss rate in Hu sheep meat

2.7 TVC、大肠菌群数与理化指标之间的相关性分析

如表3所示，TVC与TBARS值、TVB-N值、pH和汁液流失率呈正相关，大肠菌群数也与TBARS值、TVB-N值、pH和汁液流失率呈正相关。湖羊肉为微生物的生长繁殖提供了丰富的营养物质。微生物大量生长繁殖后，破坏了湖羊肉细胞的结构完整性，导致湖羊肉的TBARS值、TVB-N值、pH和汁液流失率等指标发生变化，这表明TVC和大肠菌群数增加是导致湖羊肉腐败的根本原因[1]。因此，抑制微生物的生长繁殖可延缓湖羊肉品质的劣变速度，延长湖羊肉货架期[36]。

表3 TVC、大肠菌群数与理化指标之间的相关性分析

Table 3 Correlation analysis between TVC, coliform count and physicochemical indicators

理化指标	TVC		大肠菌群数	
	R	*P*	*R*	*P*
TBARS值	0.794	0.000	0.705	0.000
TVB-N值	0.928	0.000	0.921	0.000
pH	0.757	0.000	0.764	0.000
汁液流失率	0.857	0.000	0.843	0.000

注：当R为正数且$P<0.05$时，两者呈正相关；当R为负数且$P<0.05$时，两者呈负相关；当$P>0.05$时，两者相关性不显著。

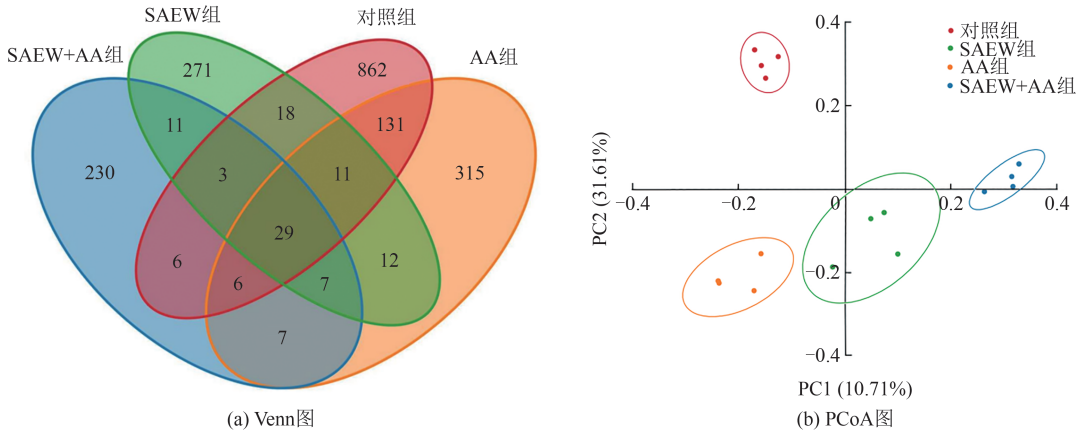
2.8 菌群结构

2.8.1 菌群测序数据质量和OTUs分析

与利用传统的培养分离方法鉴定微生物菌群相比，高通量测序可以快速、高效地鉴定出样本中的大部分微生物，包括低丰度和不可培养的微生物[37]。为了揭示AA与SAEW协同抑菌效果的作用机制，本研究采用高通量测序技术分析了湖羊肉样品表面的微生物群落结构。在本研究中，16个样本共获得1 155 270条有效序列，每个样本有效序列平均数为72 204条。对有效序列进行聚类分析，共获得1 919个OTUs，4个处理组共有29个OTUs，仅占OTUs总数的1.51%，见图7（a）。物种Venn分析结果表明，对照组、SAEW组、AA组和SAEW+AA组的OTUs数量分别为1 066、362、518和299，表明SAEW、AA和SAEW+AA均可以减少湖羊肉中微生物的OTUs数量，这与菌落总数的试验结果一致，表明AA和SAEW处理湖羊肉均可有效抑制细菌微生物繁殖、延长货架期。主坐标分析（PCoA）结果显示，PC1为10.71%，PC2为31.61%，各组内的样本紧密聚集在一起，表明平行组之间的重复性较好；SAEW组、AA组和SAEW+AA组均与对照组明显区分，表明SAEW、AA和SAEW+AA处理改变了湖羊肉微生物群落的结构组成[38]，见图7（b）。

2.8.2　α多样性指数

α多样性指数可用于衡量样本菌群的丰富度和多样性。ACE指数和Chao1指数越大，样本菌群的丰富度越高；Shannon指数越大、Simpson指数越小，样本菌群的多样性越高[39]。如表4所示，各样品的覆盖率均达到99.90%，表明测序深度好，可用于菌群α多样性分析[40]。SAEW组和SAEW+AA组的ACE指数、Chao1指数和Shannon指数均低于对照组，而Simpson指数高于对照组。羊肉含有丰富的营养物质，可为细菌的快速生长繁殖提供大量的氮源、碳源和其他营养成分，从而导致菌群的丰富度和多样性较高[37]。SAEW可杀灭大部分细菌，导致菌群的丰富度和多样性下降[7,9]。AA组的ACE指数和Chao1指数均显著低于对照组（$P<0.05$），而Shannon指数和Simpson指数与对照组相比无显著差异，表明AA可降低湖羊肉样本菌群的丰富度，但不影响菌群的多样性。AA影响了微生物的生长环境（尤其是pH），导致菌群丰富度发生了变化[41]。



(a) Venn图　　(b) PCoA图

图7　OTUs样本分布Venn图和PCoA图

Fig. 7　Venn diagram of sample distribution based on OTUs and PCoA plot

表4　α多样性指数分析

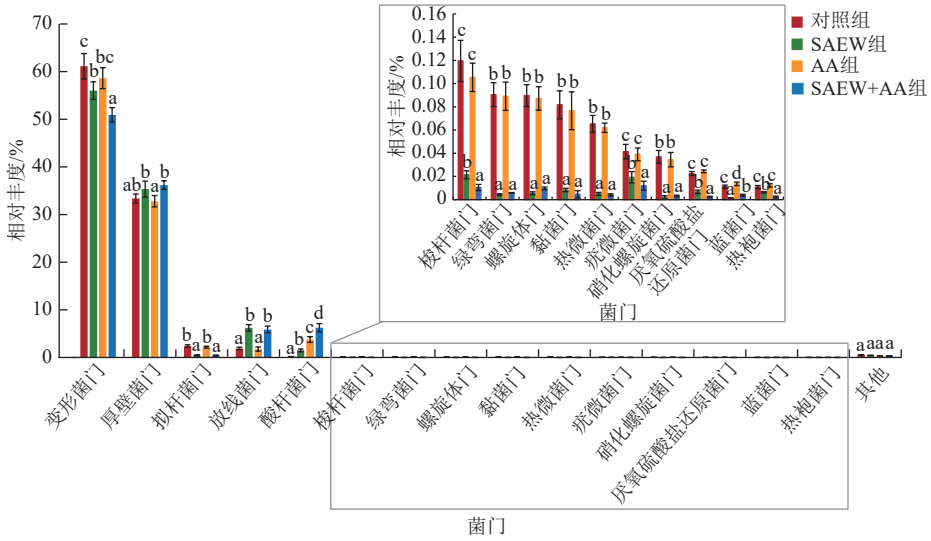
Table 4　α Diversity index analysis

组别	ACE指数	Chao1指数	Shannon指数	Simpson指数	覆盖率/%
对照组	282.15±31.34^{c}	285.60±28.94^{c}	2.71±0.34^{b}	0.74±0.06^{a}	99.90
SAEW组	120.79±15.32^{a}	127.44±12.47^{a}	2.42±0.17^{a}	0.87±0.09^{b}	99.90
AA组	205.42±18.71^{b}	215.64±21.58^{b}	2.64±0.26^{b}	0.79±0.06^{ab}	99.90
SAEW+AA组	102.93±14.53^{a}	105.87±9.45^{a}	2.28±0.32^{a}	0.92±0.08^{b}	99.90

注：同列不同小写字母表示不同处理组之间差异显著（$P<0.05$）。

2.8.3　门水平上菌群结构水平差异

在门水平上对不同处理组的菌群结构水平进行差异分析，见图8。相对丰度超过1%的菌门有变形菌门（Proteobacteria）、厚壁菌门（Firmicutes）、拟杆菌门（Bacteroidota）和放线菌门（Actinobacteria）。在对照组中，变形菌门和厚壁菌门占绝对优势，两者相对丰度占比为94.47%。变形菌门和厚壁菌门在自然环境中无处不在，是细菌中最多的2类菌门。SAEW组的变形菌门相对丰度显著低于对照组（$P<0.05$）。变形菌门含有大量的食源性致病菌和腐败菌，如沙门氏菌属（*Salmonella*）、大肠杆菌属（*Escherichia coli*）、埃希氏菌属（*Escherichia*）和假单胞菌属（*Pseudomonas*）等[42-43]。SAEW具有较好的抑菌效果，抑制了这些细菌的生长繁殖，从而延长了羊肉的货架期。SAEW+AA组的变形菌门相对丰度显著低于对照组和SAEW组（$P<0.05$），表明AA与SAEW在抑制变形菌门菌群过程中产生了协同效应。此外，SAEW组和SAEW+AA组的放线菌门和酸杆菌门（Acidobacteria）的相对丰度均显著高于对照组（$P<0.05$）。放线菌门中的许多细菌可高效抑制其他病原微生物的生长繁殖，如链酸嗜菌属（*Streptacidiphilus*）[44]。酸杆菌门为嗜酸性细菌[45]，SAEW和AA溶液均可降低湖羊肉的pH，为



不同小写字母表示不同处理组之间差异显著（$P<0.05$）。

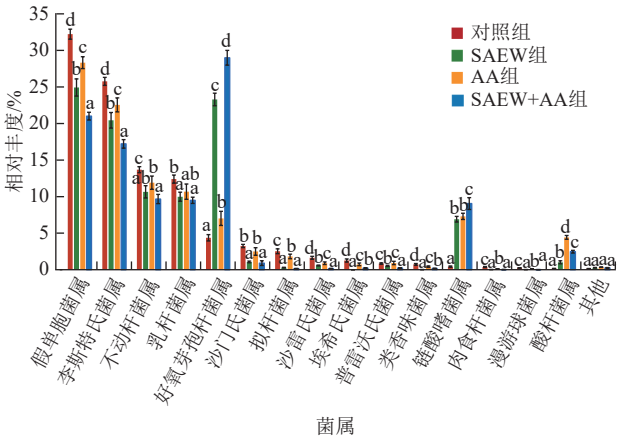
图 8　SAEW 和 AA 对门水平上菌群结构的影响

Fig. 8　Effects of SAEW and/or AA treatments on microbial phyla

酸杆菌的生长繁殖提供了有利条件。酸杆菌的大量繁殖使其成为湖羊肉表面的优势菌群，消耗了大量的营养物质，从而抑制了其他病原微生物的生长繁殖。因此，提高放线菌门和酸杆菌门微生物的相对丰度有助于延长湖羊肉的货架期。

2.8.4　属水平上菌群结构水平差异

在属水平上对不同处理组的菌群结构水平差异进行分析，结果见图 9。相对丰度超过 1% 的菌属有假单胞菌属、李斯特氏菌属（*Listeria*）、不动杆菌属（*Acinetobacter*）、乳杆菌属（*Lactobacillus*）、好氧芽孢杆菌属（*Aeribacillus*）、沙门氏菌属、拟杆菌属（*Bacteroides*）、沙雷氏菌属（*Serratia*）和埃希氏菌属。在对照组中，假单胞菌属、李斯特氏菌属、不动杆菌属和乳杆菌属占绝对优势，4 种菌属相对丰度占比为 84.06%。假单胞菌属和不动杆菌属在自然环境中无处不在，它们可以通过产生铁载体来抑制其他腐败菌的生长，从而使其具有较高的相对丰度[46]。假单胞菌属可以将肉类分解成酮类、酯类、乙醛和三甲胺等有害物质，是造成畜肉腐败的主要致病菌和腐败菌[47]。因此，羊肉屠宰场所应经常消毒灭菌，保持环境卫生清洁。SAEW 组中大部分细菌的相对丰度显著低于对照组，如假单胞菌属、李斯特氏菌属、不动杆菌属和乳杆菌属等。已有研究表明，SAEW 对大部分食源性致病菌的生长繁殖具有较好的抑制效果[5]，通过抑制这些细菌的生长繁殖，从而延长了羊肉



不同小写字母表示不同处理组之间差异显著（$P<0.05$）。

图 9　SAEW 和 AA 处理对属水平上菌群结构的影响

Fig. 9　Effects of SAEW and/or AA treatments on microbial genera

的货架期。SAEW+AA 组中大部分细菌的相对丰度显著低于 SAEW 组，如假单胞菌属、李斯特氏菌属和沙雷氏菌属（*Serratia*）等，表明 AA 在 SAEW 抑制腐败菌过程中产生了协同效应。有趣的是，SAEW 组和 SAEW+AA 组的好氧芽孢杆菌属相对丰度均显著高于对照组（$P<0.05$），且 SAEW+AA 组的好氧芽孢杆菌属相对丰度显著高于 SAEW 组（$P<0.05$）。芽孢杆菌可以通过产生内生孢子来抵抗外界环境的不利因素。此外，芽孢杆菌生长繁殖速度快，空间占比大，可以通过竞争来抑制其他有害微生物的生长繁殖[48]。SAEW 组、AA 组和

SAEW+AA组中的链酸嗜菌属和酸杆菌属（*Acidobacterium*）的相对丰度均显著高于对照组（$P<0.05$），且SAEW+AA组中的链酸嗜菌属和酸杆菌属的相对丰度均显著高于SAEW组（$P<0.05$）。链酸嗜菌属和酸杆菌属适宜的生长环境偏酸性[45,49]。SAEW和AA溶液均可降低湖羊肉中的pH，为它们的生长繁殖提供了有利条件。链酸嗜菌属可以有效抑制其他病原微生物的生长繁殖[44]。酸杆菌属的大量繁殖使其成为羊肉表面的优势菌群，消耗了大量的营养物质，从而抑制了其他病原微生物的生长繁殖。因此，提高链酸嗜菌属和酸杆菌属的相对丰度有助于延长羊肉的货架期。

3　结论

为优化一种新型肉制品的抑菌保鲜工艺，本文探究了SAEW协同AA处理对湖羊肉冷藏期间品质变化及微生物多样性的影响。首先，确定了SAEW和AA的最佳处理条件：SAEW浸泡时间3 min、AA浓度22.72 mmol/L、AA浸泡时间3 min。贮藏试验结果表明，SAEW有效抑制了湖羊肉中细菌的生长，降低了TVB-N值和pH等理化指标的上升速率。SAEW+AA处理则在有效抑菌的同时保持了较低的TBARS值和汁液流失率，更有效地抑制了湖羊肉脂肪氧化和品质劣变。此外，SAEW处理将湖羊肉货架期从6 d延长至10 d，而SAEW+AA组微生物指标更是在整个冷藏期间内（12 d）未超过可接受限值。高通量测序结果表明，SAEW+AA处理有效降低了微生物的丰富度和多样性，抑制了腐败菌的生长繁殖。综上所述，AA可弥补SAEW的抗氧化性能缺陷，与SAEW延缓湖羊肉品质劣变产生了协同效应，后续可进一步探讨SAEW和AA处理对湖羊肉蛋白质氧化、风味、滋味物质等方面的影响，为SAEW+AA复合保鲜剂在畜肉保鲜贮藏中的应用推广提供参考。

参考文献

[1] XU M M, KAUR M, PILLIDGE C J, et al. Microbial biopreservatives for controlling the spoilage of beef and lamb meat: their application and effects on meat quality[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2022, 62(17): 4571-4592.

[2] QIAN S Y, LI X, WANG H, et al. Effect of sub-freezing storage (−6, −9 and −12 ℃) on quality and shelf life of beef [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2018, 53(9): 2129-2140.

[3] INDIARTO R, IRAWAN A N, SUBROTO E. Meat irradiation: a comprehensive review of its impact on food quality and safety[J]. Foods, 2023, 12(9): 1845.

[4] SONI A, SMITH J, THOMPSON A, et al. Microwave-induced thermal sterilization: a review on history, technical progress, advantages and challenges as compared to the conventional methods [J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 97: 433-442.

[5] DU Y L, TIAN Q, LI G J, et al. Advanced application of slightly acidic electrolyzed water for fresh-cut fruits and vegetables preservation[J]. Food Research International, 2024, 195: 114996.

[6] ISSA-ZACHARIA A. Application of slightly acidic electrolyzed water as a potential sanitizer in the food industry [J]. Journal of Food Quality, 2024, 2024: 5559753.

[7] ZHANG C C, XIE J. Ultrasound-assisted slightly acidic electrolyzed water in aquatic product sterilization: a review [J]. Foods, 2022, 11(23): 3863.

[8] SHENG X W, SHU D Q, TANG X J, et al. Effects of slightly acidic electrolyzed water on the microbial quality and shelf life extension of beef during refrigeration[J]. Food Science & Nutrition, 2018, 6(7): 1975-1981.

[9] CICHOSKI A J, FLORES D R M, DE MENEZES C R, et al. Ultrasound and slightly acid electrolyzed water application: an efficient combination to reduce the bacterial counts of chicken breast during pre-chilling[J]. International Journal of Food Microbiology, 2019, 301: 27-33.

[10] 张朵朵，牛鹏飞，葛鑫禹，等. 超临界CO_2萃取羊肉油脂及其脂肪酸组成的变化[J]. 食品与生物技术学报，2023，42(7)：37-43.
ZHANG D D, NIU P F, GE X Y, et al. Supercritical CO_2 extraction of mutton fat and changes in its fatty acid composition [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2023, 42(7): 37-43.(in Chinese)

[11] GĘGOTEK A, SKRZYDLEWSKA E. Ascorbic acid as antioxidant [J]. Vitamins and Hormones, 2023, 121: 247-270.

[12] GUTIÉRREZ-DEL-RÍO I, LÓPEZ-IBÁÑEZ S, MAGADÁN-CORPAS P, et al. Terpenoids and polyphenols as natural antioxidant agents in food preservation[J]. Antioxidants, 2021, 10(8): 1264.

[13] CHENG J B, ZHANG X X, XU D, et al. Relationship

between rumen microbial differences and traits among Hu sheep, Tan sheep, and Dorper sheep[J]. Journal of Animal Science, 2022, 100(9): skac261.

[14] KONG D W, HAN R W, YUAN M D, et al. Slightly acidic electrolyzed water as a novel thawing media combined with ultrasound for improving thawed mutton quality, nutrients and microstructure [J]. Food Chemistry, 2023, 18: 100630.

[15] ELBARBARY A M, EL-SAWY N M, HEGAZY E A. Antioxidative properties of irradiated chitosan/vitamin C complex and their use as food additive for lipid storage [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2015, 132 (24): app. 42105.

[16] PENG Z, HE Y Y, WANG D L, et al. Double emulsion (W/O/W) microcapsule preparation of novel bacteriocin lactococcin036019 with synergistic compound vitamin C prolongs the antibacterial activity in food matrix[J]. Food Bioscience, 2024, 57: 103597.

[17] HUANG X, AHN D U. Lipid oxidation and its implications to meat quality and human health[J]. Food Science and Biotechnology, 2019, 28(5): 1275-1285.

[18] TRINDADE R A, MANCINI-FILHO J, VILLAVICENCIO A L C H. Natural antioxidants protecting irradiated beef Burgers from lipid oxidation[J]. LWT-Food Science and Technology, 2010, 43(1): 98-104.

[19] XUAN X T, FAN Y F, LING J G, et al. Preservation of squid by slightly acidic electrolyzed water ice[J]. Food Control, 2017, 73: 1483-1489.

[20] MŁYNARSKA E, BISKUP L, MOŻDŻAN M, et al. The role of oxidative stress in hypertension: the insight into antihypertensive properties of vitamins A, C and E[J]. Antioxidants, 2024, 13(7): 848.

[21] BEKHIT A E A, HOLMAN B W B, GITERU S G, et al. Total volatile basic nitrogen (TVB-N) and its role in meat spoilage: a review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 109: 280-302.

[22] HOLMAN B W B, BEKHIT A E A, WALLER M, et al. The association between total volatile basic nitrogen (TVB-N) concentration and other biomarkers of quality and spoilage for vacuum packaged beef[J]. Meat Science, 2021, 179: 108551.

[23] MUMTAZ S, MUMTAZ S, ALI S, et al. Evaluation of antibacterial activity of vitamin C against human bacterial pathogens[J]. Revista Brasleira de Biologia, 2021, 83: e247165.

[24] ANDRÉS-BELLO A, BARRETO-PALACIOS V, GARCÍA-SEGOVIA P, et al. Effect of pH on color and texture of food products[J]. Food Engineering Reviews, 2013, 5(3): 158-170.

[25] JANKOWIAK H, CEBULSKA A, BOCIAN M. The relationship between acidification (pH) and meat quality traits of Polish white breed pigs[J]. European Food Research and Technology, 2021, 247(11): 2813-2820.

[26] DE ALAGOAS U F, DE LIMA JÙNIOR D M, DE CARVALHO F F, et al. Intrinsic factors affecting sheep meat quality: a review[J]. Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias, 2016, 29(1): 03-15.

[27] LU Z K, LI J Y, YUAN C, et al. Evaluation of mutton quality characteristics of Dongxiang tribute sheep based on membership function and gas chromatography and ion mobility spectrometry[J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 852399.

[28] HAMOEN J R, VOLLEBREGT H M, VAN DER SMAN R G M. Prediction of the time evolution of pH in meat [J]. Food Chemistry, 2013, 141(3): 2363-2372.

[29] WU G, FAROUK M M, CLERENS S, et al. Effect of beef ultimate pH and large structural protein changes with aging on meat tenderness[J]. Meat Science, 2014, 98 (4): 637-645.

[30] HOLMAN B W B, KERR M J, REFSHAUGE G, et al. Post-mortem pH decline in lamb semitendinosus muscle and its relationship to the pH decline parameters of the longissimus lumborum muscle: a pilot study[J]. Meat Science, 2021, 176: 108473.

[31] 汪辰晨, 赵建伟, 陈龙, 等. 温度波动对冷鲜鸡贮藏品质的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2024, 43(9): 10-20.
WANG C C, ZHAO J W, CHEN L, et al. Effects of temperature fluctuation on storage quality of chilled chicken[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2024, 43(9): 10-20.(in Chinese)

[32] 杨乐, 刘丽莉, 王浩阳, 等. 猪肝蛋白复合膜性能及其在肉品保鲜中的应用[J]. 食品与机械, 2024, 40(3): 127-133, 140.
YANG L, LIU L L, WANG H Y, et al. Study on the performance of porcine liver protein composite membrane and its application in meat preservation[J]. Food & Machinery, 2024, 40(3): 127-133, 140.(in Chinese)

[33] GONZALEZ-RIVAS P A, CHAUHAN S S, HA M, et al. Effects of heat stress on animal physiology, metabolism, and meat quality: a review[J]. Meat Science, 2020, 162: 108025.

[34] QIAN S Y, HU F F, LI X, et al. On the emerging of thawing drip: role of myofibrillar protein renaturation[J].

Food Chemistry，2022，393：133398.

[35] MATARNEH S K，SILVA S L，GERRARD D E. New insights in muscle biology that alter meat quality [J]. Annual Review of Animal Biosciences，2021，9：355-377.

[36] WANG T J，GUO H Y，ZHANG H，et al. Dynamics of bacterial communities of lamb meat packaged in air and vacuum pouch during chilled storage [J]. Food Science of Animal Resources，2019，39(2)：209-221.

[37] WEN R X，LV Y C，LI X G，et al. High-throughput sequencing approach to reveal the bacterial diversity of traditional yak jerky from the Tibetan regions [J]. Meat Science，2021，172：108348.

[38] ZHANG L L，REN W Y，BI Y L，et al. Effects of different feeding patterns on the rumen bacterial community of Tan lambs，based on high-throughput sequencing of 16S rRNA amplicons [J]. Frontiers in Microbiology，2023，14：1228935.

[39] CHEN T T，JIANG H W，HE Y J，et al. Histopathological，physiological，and multi-omics insights into the hepatotoxicity mechanism of nanopolystyrene and/or diclofenac in *Mylopharyngodon piceus* [J]. Environmental Pollution，2024，341：122894.

[40] ZHANG Q Q，LI D，ZHANG W，et al. Comparative analysis of the bacterial diversity of Chinese fermented sausages using high-throughput sequencing [J]. LWT-Food Science and Technology，2021，150：111975.

[41] RIAZ RAJOKA M S，THIRUMDAS R，MEHWISH H M，et al. Role of food antioxidants in modulating gut microbial communities：novel understandings in intestinal oxidative stress damage and their impact on host health [J]. Antioxidants，2021，10(10)：1563.

[42] ZHU Y L，WANG W，LI M，et al. Microbial diversity of meat products under spoilage and its controlling approaches [J]. Frontiers in Nutrition，2022，9：1078201.

[43] 徐元柳，刘迪迪，王兆丹，等. 植物提取物抑菌机理及联合现代新兴技术在肉类保鲜中的应用进展[J]. 食品与机械，2024，40(11)：238-244.
XU Y L，LIU D D，WANG Z D，et al. Research progress on the antibacterial mechanism of natural plant extracts and its application in meat preservation by combining with modern emerging technologies [J]. Food & Machinery，2024，40(11)：238-244.(in Chinese)

[44] NGEMA S S，MADOROBA E. A mini-review of anti-listerial compounds from marine Actinobacteria (1990—2023)[J]. Antibiotics，2024，13(4)：362.

[45] KALAM S，BASU A，AHMAD I，et al. Recent understanding of soil acidobacteria and their ecological significance：a critical review [J]. Frontiers in Microbiology，2020，11：580024.

[46] SHEIR S，IBRAHIM H，HASSAN M，et al. Incidance of Psychotropic bacteria in frozen chicken meat products with special reference to *Pseudomonas* species [J]. Benha Veterinary Medical Journal，2020，39(1)：165-168.

[47] MARCELLI V，OSIMANI A，AQUILANTI L. Research progress in the use of lactic acid bacteria as natural biopreservatives against *Pseudomonas* spp. in meat and meat products：a review [J]. Food Research International，2024，196：115129.

[48] LÜCKING G，ALBRECHT K，MÄRTLBAUER E，et al. Draft genome sequences of two thermophilic，spore-forming *Aeribacillus pallidus* strains isolated from dairy products [J]. Microbiology Resource Announcements，2024，13(1)：e0089623.

[49] MADHAIYAN M，SARAVANAN V S，SEE-TOO W S，et al. Genomic and phylogenomic insights into the family *Streptomycetaceae* lead to the proposal of six novel genera [J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology，2022，72(10)：005570.