

等离子体活化乳酸溶液对常见食源性致病菌的杀灭效果

李佳鸿¹, 严龙飞², 戴凡炜¹, 陈敏惠¹, 王玲¹, 陈飞平¹, 罗政¹, 叶明强^{1*}

(1. 广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所, 农业农村部功能食品重点实验室, 广东省农产品加工重点实验室, 广东广州 510610) (2. 南京农业大学食品科技学院, 江苏南京 210095)

摘要: 食源性致病菌一直是我国食品安全的危害之一, 如何有效控制食品中食源性致病菌的繁殖一直是研究热点。该研究以等离子体活性乳酸溶液 (Plasma-Activated Lactic Acid, PALA) 体积分数、活化时间以及反应时间的单因素实验为基础, 以大肠埃希氏菌、沙门氏菌、金黄色葡萄球菌及单核增生李斯特菌等菌种为模型, 菌落总数为响应值, 研究 PALA 对 4 种食源性致病菌的影响。研究表明: 在一定范围内, 4 种食源性致病菌的杀灭率均随 PALA 体积分数的升高、活化时间以及反应时间的延长而增大; 采用活化 120 s、体积分数为 0.2% 的 PALA 与 4 种食源性致病菌反应 10 min, 约可杀灭纯培养大肠埃希氏菌 7.71 lg CFU/mL、沙门氏菌 4.52 lg CFU/mL、金黄色葡萄球菌 4.03 lg CFU/mL、单核增生李斯特菌 3.90 lg CFU/mL。对 4 种纯培养食源性致病菌的杀灭率达 99.9% 以上 ($P < 0.05$), 可杀灭 3.9 个对数值以上菌落总数的致病菌。综上所述, PALA 可快速、高效杀灭常见食源性致病菌。

关键词: 等离子体活化乳酸溶液; 大肠埃希氏菌; 沙门氏菌; 金黄色葡萄球菌; 单核增生李斯特菌; 菌落总数

文章编号: 1673-9078(2023)09-323-329

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.9.1126

Efficacy of Plasma Activated Lactic Acid Solution in Killing Common Foodborne Pathogens

LI Jiahong¹, YAN Longfei², DAI Fanwei¹, CHEN Minhui¹, WANG Ling¹, CHEN Feiping¹, LUO Zheng¹, YE Mingqiang^{1*}

(1. Sericultural & Agri-Food Research Institute Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Functional Foods, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangdong Key Laboratory of Agricultural Products Processing, Guangzhou 510610, China)

(2. College of Food Science and Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: Foodborne pathogenic bacteria have long been one of the food safety hazards in China. How to control effectively the proliferation of foodborne pathogenic bacteria in food has always been a hot topic. Based on the single factor experiments of plasma activated lactic acid (PALA) volume concentration, activation time and reaction time, taking *Escherichia coli*, *Salmonella Enteritidis*, *Staphylococcus aureus* and *Listeria monocytogenes* as the model strains, and the total number of colonies as the response value, the effects of the PALA on four foodborne pathogens were investigated in this study. The results showed that the killing rates of four foodborne pathogens increased with an increase of the PALA volume concentration, extension of activation time and prolongation of reaction time in certain ranges. When the PALA was activated for 120 seconds, the volume concentration was 0.2%, and the reaction between PALA and the four foodborne pathogens lasted for

引文格式:

李佳鸿, 严龙飞, 戴凡炜, 等. 等离子体活化乳酸溶液对常见食源性致病菌的杀灭效果[J]. 现代食品科技, 2023, 39(9): 323-329

LI Jiahong, YAN Longfei, DAI Fanwei, et al. Efficacy of plasma activated lactic acid solution in killing common foodborne pathogens [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(9): 323-329

收稿日期: 2022-09-07

基金项目: 广东省重点研发计划项目 (2020B0202080003); 广东省乡村振兴战略专项资金 (第四批) 资助; “十四五”广东省农业科技创新十大主攻方向“揭榜挂帅”项目 (2022SDZG04); 广东省乡村振兴战略专项 (农业科技能力提升) 地方分院和专家工作站项目 (2023 研究院 06)

作者简介: 李佳鸿 (1997-), 男, 本科, 研究方向: 农产品保鲜与物流, E-mail: 867863597@qq.com

通讯作者: 叶明强 (1977-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 农产品保鲜与物流, E-mail: yemingq@163.com

10 minutes, about 7.71 lg CFU/mL of *Escherichia coli*, 4.52 lg CFU/mL of *Salmonella*, 4.03 lg CFU/mL of *Staphylococcus aureus* and 3.90 lg CFU/mL of *Listeria monocytogenes* in pure culture were killed. The killing rates of 4 kinds of the pure culture foodborne pathogens reached 99.9% ($P<0.05$), and more than 3.9 logarithm of the total number of colonies of pathogenic bacteria were killed. In summary, PALA can rapidly and efficiently kill common foodborne pathogens.

Key words: Plasma activated lactic acid; *Escherichia coli*; *Salmonella enteritidis*; *Staphylococcus aureus*; *Listeria monocytogenes*; the total number of colonies

食源性致病菌污染是我国食品安全的重要危害之一。我国每年都会发生由大肠埃希氏菌、沙门氏菌、李斯特菌和金黄色葡萄球菌等引起的食物中毒事件,严重危害我国人民健康和食品安全^[1]。在食品从原料生产到终端消费的过程中,其生产、运输、加工、销售等环节均易受到不同程度的致病菌污染,从而导致食源性疾病的发生,危害消费者健康。

等离子体冷杀菌技术是近年来新兴的一种非热杀菌技术,具有安全清洁、绿色环保、简单高效等特点,在食品安全领域备受关注。等离子体活化水(Plasma-Activated Water, PAW)是通过等离子体发生装置在水表面或水下进行等离子体放电处理后制得富含活性基团的水溶液^[2,3]。因等离子体活化水具有良好的流动性、无毒无残留等优点,相较于大气压等离子体冷杀菌技术在食品领域更受学者青睐。近年来,国内外学者对等离子体活化水的灭菌机理、理化性质、生产应用均有报道,康超娣^[4]研究发现 *P. deceptionensis* CM2 经活化 60 s 的 PAW 处理 6 min 后可灭活 3.43 lg CFU/mL 的细菌;钼晓艳等^[5]研究发现活化 60 min 的 PAW 处理 30 min 后对巴氏葡萄球菌的抑菌率为 95.25%;汪家权等^[6]发现用活化 60 min 的 PAW 处理金黄色葡萄球菌生物膜 30 min 后能灭活约 4.8 个对数值的细菌。

乳酸是自然界中广泛存在的有机酸,被公认为天然抗菌剂,美国食品及药物管理局认定其为“公认安全的”,常用于冷鲜肉、新鲜果蔬等食品的抑菌保鲜以及食品加工中^[7,8]。Huang 等^[9]研究发现用 40 °C、1%乳酸清洗染菌菠菜幼叶 5 min,可有效杀灭 2.7 个对数值的的大肠杆菌 O157:H7;Youssef 等^[10]研究发现使用 2%~5%的乳酸可以有效抑制牛肉表面的大肠埃希氏菌的生长;Mahmoud^[11]研究发现用 150 mg/mL 的乳酸溶液浸泡牡蛎 10 min 后可使牡蛎表面的创伤弧菌降低至检测限以下;Aline 等^[12]研究发现 5%乳酸在染菌鸡皮贮藏期间能有效抑制空肠弯曲杆菌和肠炎沙门氏菌的生长。

PAW 的杀菌效果随着处理时间延长而提高,但过长的处理时间易导致新鲜蔬果、肉类及其制品等食品

的品质下降。研究表明 PAW 与抑菌物质复配使用可以提高杀菌效率^[13]。Jing 等^[14]发现分别用一定浓度乳酸溶液制成的等离子体活化乳酸溶液(Plasma-Activated Lactic Acid, PALA)和 PAW 处理沙门氏菌,前者细菌形态有更明显的破坏,细胞内氧化应激损伤水平更高。此外,乳酸的存在可以进一步降低溶液的 pH 值,并改变细胞膜的通透性^[15],使由等离子体产生的活性物质更易进入细胞内。本研究以纯培养大肠埃希氏菌、金黄色葡萄球菌、单核增生李斯特菌和沙门氏菌等常见食源性致病菌为模型,研究 PALA 对纯培养食源性致病菌的杀灭效果,为食品保鲜及安全生产提供理论基础以及技术支撑。

1 材料与方法

1.1 实验材料

大肠埃希氏菌(*Escherichia coli*, GDMCC 1.223=CMCC(B)44102)、单核增生李斯特菌(*Listeria monocytogenes*, GDMCC 1.347=ATCC19115)、金黄色葡萄球菌(*Staphylococcus. Aureus*, GDMCC 1.441=ATCC6538)、沙门氏菌(*Salmonella enteritidis*, GDMCC1.237=CMCC(B)50115),广东省科学院微生物研究所;平板计数琼脂(Plate Count Agar, PCA)、营养肉汤培养基(Nutrient Broth, NB)、营养琼脂培养基(Nutrient Agar, NA),广东环凯微生物科技有限公司;氯化钠、硫代硫酸钠,福晨(天津)化学试剂有限公司;乳酸,天津市大茂化学试剂厂。

1.2 主要仪器设备

PG-1000ZD 型低温等离子液体处理发生器,南京苏曼等离子科技有限公司;5810R 型高速离心机,德国 Eppendorf 公司;GR60DP 型高压灭菌器,致微(厦门)仪器有限公司;DY-200B 全温培养摇床,天津市泰斯特仪器有限公司;Master Touch-Q15 型去离子纯水机,上海和泰仪器有限公司;LRH-150F 型生化培养箱,上海一恒科学仪器有限公司;PB-10 标准型 pH 计,德国 Sartorius 公司。

1.3 实验方法

1.3.1 制备菌悬液

参考相启森等^[16]的方法并稍作改进,分别从-80℃冰箱中取出单核增生李斯特菌、沙门氏菌、大肠埃希氏菌和金黄色葡萄球菌等菌种冻干管,室温解冻后挑取一环菌液于营养琼脂培养基上活化培养24 h,选取活力旺盛的单菌落接种至营养肉汤液体培养基中,于37℃、160 r/min 恒温摇床培养12 h。取20 mL培养物于50 mL离心管,于25℃、4 000 r/min 离心5 min,弃去上清液后加入等体积无菌生理盐水并混匀,制成浓度约为8 log CFU/mL的菌悬液备用。

1.3.2 等离子体活性乳酸溶液的制备

参照赵莹等^[17]的方法并略作修改,选用空气为工作气体,调整低温等离子液体处理发生器工作电压为19 kV,工作电流0.024 mA,电流频率为20 kHz,取250 mL一定浓度的乳酸溶液于500 mL烧杯中,将等离子体射流装置喷枪置于烧杯液面下约10 mm处理一定时间,制得一定浓度PALA备用。

1.3.3 单因素实验

保持低温等离子液体处理发生器的工作状态不变,分别考察PALA体积分数(0%、0.05%、0.1%、0.2%, V/V)、活化时间(0、30、60、90和120 s)、反应时间(0、2、4、6、8、10 min)对纯培养大肠埃希氏菌、沙门氏菌、金黄色葡萄球菌、单核增生李斯特菌的影响,以微生物实验结果评价PALA的杀菌效果,确定最佳因素水平。在考察单一变量对4种食源性致病菌的影响时,其余变量均保持最高水平。

1.3.4 微生物测定

参照《GB 4789.2-2016 食品安全国家标准食品微生物学检验菌落总数测定》并略做修改^[18],取2 mL菌悬液和等体积等离子体活化乳酸于10 mL离心管中,均质后静置反应一定时间后加入50 μ L 0.1 mol/L $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 以终止反应^[19]。用质量分数为0.85%无菌NaCl进行梯度稀释后,吸取1 mL稀释液与约10 mL冷却至46℃的PCA混匀,待琼脂冷却凝固后倒置于37℃培养箱中培养18~24 h,进行菌落计数并统计,结果以lg CFU/mL表示。

1.4 数据处理及分析

所有实验均独立重复3次,结果以平均值 $\pm$ 标准偏差显示,采用SPSS 26.0软件进行单因素方差分析,利用Duncan's多重比较进行显著性差异分析。采用Origin 2020进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同体积分数PALA对食源性致病菌的影响

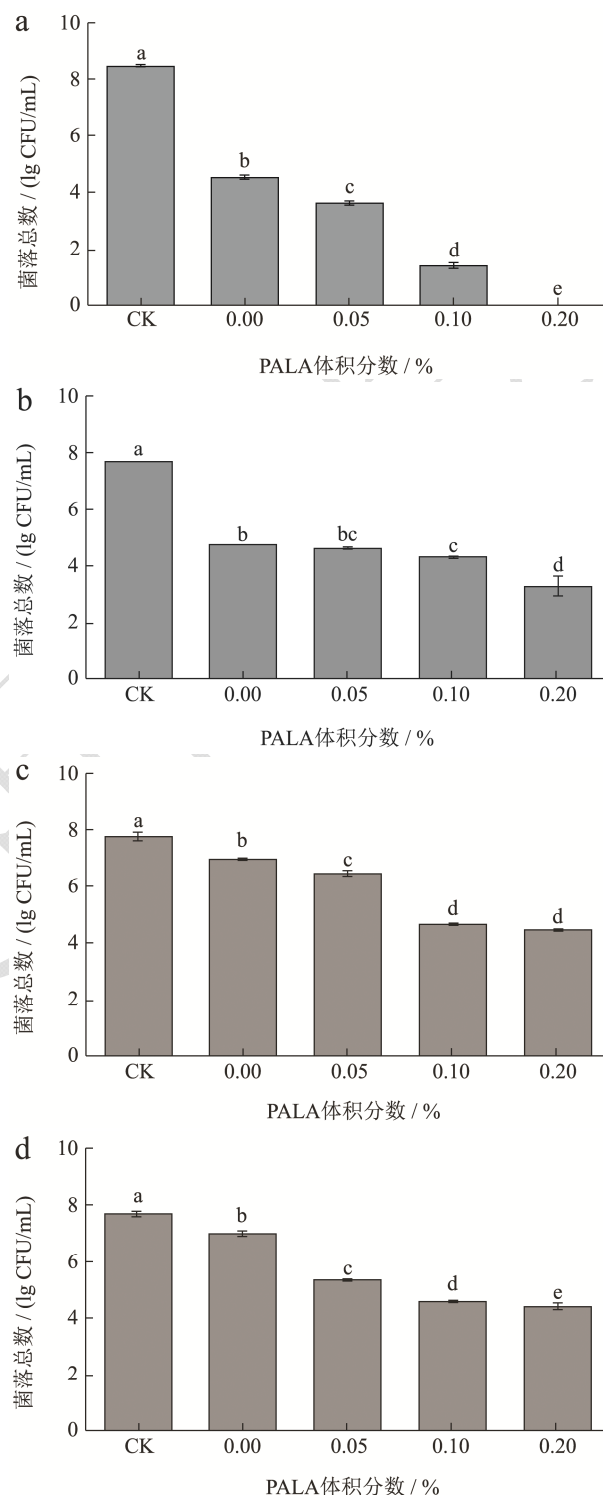


图1 不同浓度PALA对4种食源性致病菌菌落总数的影响

Fig.1 Effects of different concentrations of PALA on the total number of colonies of four foodborne pathogens

注: 图中小写字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$); a 为 PALA 体积分数对大肠埃希氏菌的影响; b 为 PALA 体积分数对沙门氏菌的影响; c 为 PALA 体积分数对金黄色葡萄球菌的影响; d 为 PALA 体积分数对单核增生李斯特菌的影响。

由图 1a、1b 可知,在保持 PALA 活化时间为 120 s、反应时间为 10 min 不变的前提下,大肠埃希氏菌及沙门氏菌 2 种革兰氏阴性菌菌落总数随着 PALA 体积分数的升高而不断下降,大肠埃希氏菌菌落总数减少了 7.48 个对数值,沙门氏菌菌落总数减少了 4.43 个对数值,其中在 PALA 体积分数达到 0.2%时,大肠埃希氏菌的杀灭率达 100%;而在图 1c、1d) 中,金黄色葡萄球菌及单核增生李斯特菌的菌落总数随 PALA 体积分数升高而缓慢降低,金黄色葡萄球菌菌落总数减少了 3.28 个对数值,单核增生李斯特菌菌落总数减少了 3.29 个对数值,其中金黄色葡萄球菌的菌落总数在 0.1%和 0.2%体积分数的 PALA 处理后无显著差异 ($P<0.05$);对比图 1a、1b 和图 1c、1d,发现阳性对照组 0.00%浓度(即等离子体活化水,Plasma-Activated Water, PAW)可以杀灭 2.95 log CFU/mL 的大肠埃希氏菌和沙门氏菌,而仅能杀灭 0.79 log CFU/mL 金黄色葡萄球菌和 0.70 log CFU/mL 单核增生李斯特菌。这与相启森等^[16]研究结果一致。这是因为革兰氏阳性菌 G^+ 相比革兰氏阴性菌 G^- 具有更厚的细胞壁,其肽聚糖结构更为致密,能在一定程度上阻碍 PALA 中活性基团对其细胞膜的氧化。研究表明,在等离子体放电过程中会产生大量的活性氧(Reactive Oxygen Species, ROS)和活性氮(Reactive Nitrogen Species, RNS)基团,这些活性基团向水扩散的过程中进一步反应生成 $ONOO^-$ 、 NO_2^- 、 NO_3^- 、 $HO_2\cdot$ 、 H_2O_2 、 O_3 、 1O_2 (单线态氧)等活性化学物质,在酸性环境下 $HO_2\cdot$ 会促使细胞膜脂质氧化,并与其他活性物质共同作用,促使微生物细胞裂解^[20-23]。PALA 生成过程中产生的 ROS 和 RNS 部分反应见表 1。随着环境中的 H^+ 的增加, PALA 中活性基团的氧化能力进一步增强,加快微生物细胞膜脂质的氧化破裂,诱导微生物细胞氧化应激,造成微生物细胞损伤和死亡^[24-27]。

表 1 PALA 产生过程中部分化学反应

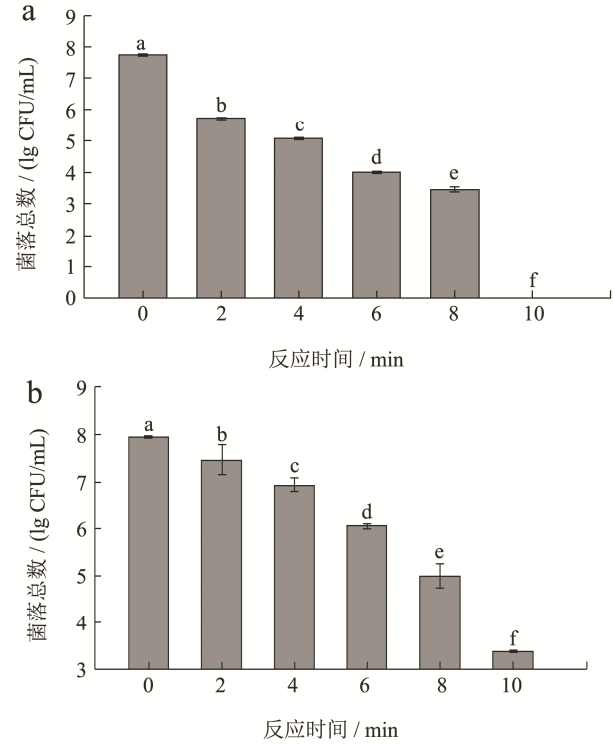
Table 1 Part of the chemical reaction for PALA production		
活性成分	产生机理	
羟基自由基($OH\cdot$)	$H_2O+e\rightarrow OH\cdot+H+e^-$	[1]
臭氧(O_3)	$O_2+e\rightarrow O\cdot+O$	[2]
	$O+O_2\rightarrow O_3$	[3]
亚硝酸(NO_2^-)	$N+O_2\rightarrow NO+O$	[4]
	$2NO+O_2\rightarrow 2NO_2$	[5]
	$NO+OH\cdot\rightarrow HNO_2$	[6]
过氧化氢(H_2O_2)	$OH+OH\cdot\rightarrow 2NO_2$	[7]
过氧亚硝酸($ONOO^-$)	$H_2O_2+HNO_2+H^+\rightarrow ONOOH+H_2O$	[8]

4 种食源性致病菌的菌落总数均随着 PALA 的体积分数升高而降低。这与赵电波等^[28]发现一致。赵电

波等^[28]研究发现,等离子体活性水联合苯乳酸处理大肠杆菌 O157:H7,其杀灭率随苯乳酸浓度的升高而增强。因 0.2%的 PALA 对 4 种致病菌杀灭效果最好,经处理后大肠埃希氏菌、沙门氏菌、金黄色葡萄球菌以及单核增生李斯特菌分别减少了 7.48、4.43、3.28 和 3.29 log CFU/mL,杀灭率达 99.9%以上 ($P<0.05$),故选择体积分数为 0.2%的 PALA 进行后续实验。

2.2 不同反应时间对食源性致病菌的影响

由图 2 可知,在保持 PALA 体积分数为 0.2%、活化时间为 120 s 不变的前提下, PALA 对 4 种致病菌的杀菌率随着反应时间的增加而增大,在 10min 时大肠埃希氏菌、沙门氏菌、金黄色葡萄球菌以及单核增生李斯特菌分别减少了 7.76、4.56、4.48 和 4.27 log CFU/mL,4 种致病菌的杀菌率均达到 99.9% ($P<0.05$)。周小霞等^[29]研究发现经处理 30 min 后有 5.53 log CFU/mL 的金黄色葡萄球菌生物膜被灭活,PAW 对金黄色葡萄球菌生物膜的灭活效果随等离子体处理时间的延长而增加,这与本研究结果一致。图 2a 中的大肠埃希氏菌在反应 10 min 后杀菌率可达 100% ($P<0.05$),图 2b~d 中沙门氏菌、金黄色葡萄球菌和单核增生李斯特菌的杀菌率达 99.9%以上 ($P<0.05$)。而沙门氏菌在反应 10 min 后仍有 3.39 log CFU/mL,相比同为 G^- 的大肠埃希氏菌对 PALA 的敏感性更低。这可能是沙门氏菌可以通过改变流出系统、孔蛋白和膜渗透性来增强自身的耐药性^[30],降低 PALA 对其细胞膜的氧化损伤,防止胞内蛋白质、核酸等流失。



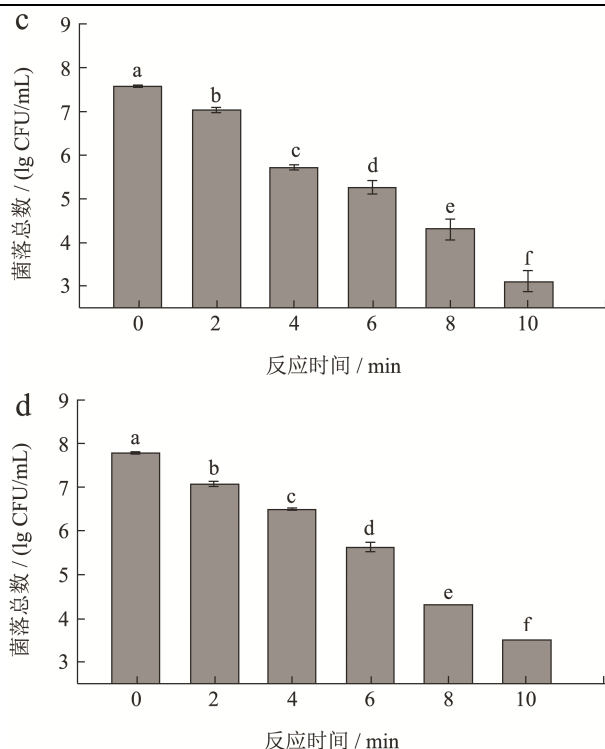


图2 不同反应时间对4种食源性致病菌菌落总数的影响

Fig.2 Effects of different reaction times on the total number of colonies of four foodborne pathogens

注：图中小写字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)；a 为不同反应时间对大肠埃希氏菌的影响；b 为不同反应时间对沙门氏菌的影响；c 为不同反应时间对金黄色葡萄球菌的影响；d 为不同反应时间对单核增生李斯特菌的影响。

2.3 不同活化时间 PALA 对食源性致病菌的影响

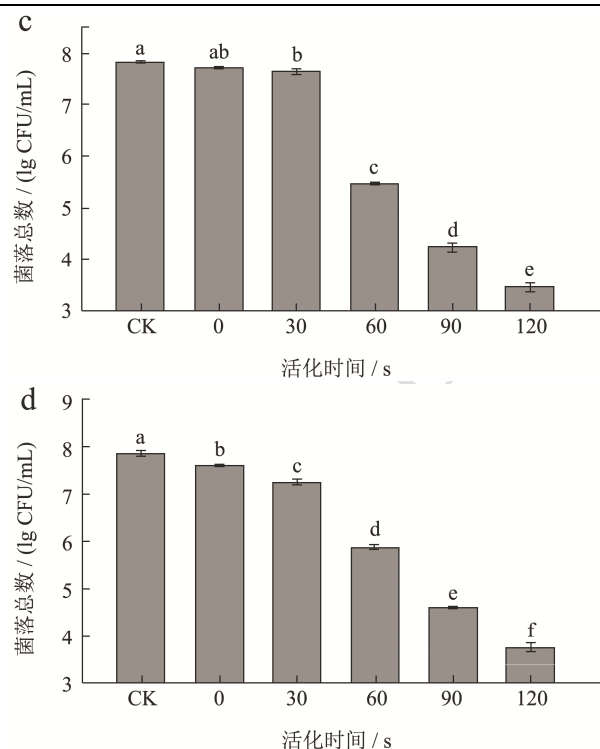
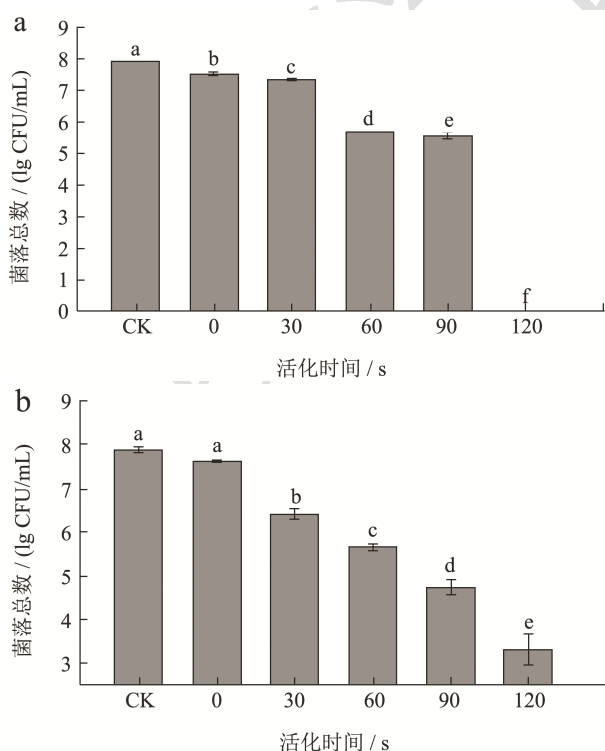


图3 不同活化时间 PALA 对4种食源性致病菌菌落总数的影响

Fig.3 Effects of different activated times on the total number of colonies of four foodborne pathogens

注：图中小写字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)；a 为不同活化时间 PALA 对大肠埃希氏菌的影响；b 为不同活化时间 PALA 对沙门氏菌的影响；c 为不同活化时间 PALA 对金黄色葡萄球菌的影响；d 为不同活化时间 PALA 对单核增生李斯特菌的影响。

由图3可知，在保持 PALA 体积分数为 0.2%、反应时间为 10 min 不变的前提下，空白对照组 (CK) 与阳性对照组 (活化 0 s，即 0.2% 乳酸溶液) 对 4 种致病菌的影响较小，未经活化的 0.2% 乳酸溶液仅能杀灭 0.39 log CFU/mL 大肠埃希氏菌、0.26 log CFU/mL 金黄色葡萄球菌、0.09 log CFU/mL 沙门氏菌和 0.25 log CFU/mL 单核增生李斯特菌，说明单纯的乳酸溶液无法高效杀灭食源性致病菌，这与汪陈洁^[8]的研究结果相似。在保持浓度和反应时间不变的情况下，随着活化时间的增加，PALA 对 4 种致病菌的杀灭率逐渐升高：活化 30 s 可杀灭菌落总数 0.09~1.49 log CFU/mL；活化 60 s 时可杀灭菌落总数 1.98~2.39 log CFU/mL；活化 90 s 时可杀灭菌落总数 2.37~3.53 log CFU/mL；活化 120 s 时杀灭菌落总数均大于 3.9 log CFU/mL。这可能因为 PALA 中的活性物质需要一定时间积累并达到一定浓度才能高效杀灭微生物，当活化时间较短时，溶液中的 ROS 和 RNS 等未能积累达到杀灭微生物的阈值。研究表明，ROS 和 RNS 会导致溶液的氧化还原电位 (Oxidation-Reduction Potential, ORP) 升高，而

ORP 是影响细菌失活的重要原因之一,且 ORP 值随等离子体活化时间的延长而增加并逐渐趋于平稳^[4,24,27]。

3 结论

综上所述, PALA 能够有效杀灭大肠埃希氏菌、沙门氏菌、金黄色葡萄球菌和单核增生李斯特菌,且其杀灭效果随 PALA 体积分数的升高、活化时间以及反应时间的延长而提升。经活化 120 s 最终体积分数为 0.2% 的 PALA 反应 10 min, 4 种纯培养食源性致病菌杀灭率均达 99.9% ($P < 0.05$), 其中约杀灭了大肠埃希氏菌 7.71 log CFU/mL、沙门氏菌 4.52 log CFU/mL、金黄色葡萄球菌 4.03 log CFU/mL、单核增生李斯特菌 3.90 log CFU/mL。在今后的研究中应进一步明确 PALA 的杀菌机理, 系统评价 PALA 对食品表面微生物的杀灭效果以及对食品感官、理化性质、营养价值和贮藏期等指标的影响, 为未来 PALA 在食品领域产业化、规模化的应用提供理论基础及技术支持。

参考文献

- [1] 史展,王周利,岳田利,等.低温等离子体杀灭食源性致病菌的研究进展[J].食品工业科技,2021,42(6):363-370,382.
- [2] ZHANG Qian, LIANG Yongdong, FENG Hongqing, et al. A study of oxidative stress induced by non-thermal plasma-activated water for bacterial damage [J]. Applied Physics Letters, 2013, 102(20): 203701.
- [3] Samooel Jung, Hyunjoo Kim, Sanghoo Park, et al. The use of atmospheric pressure plasma-treated water as a source of nitrite for emulsion-type sausage [J]. Meat Science, 2015, 108: 132-137.
- [4] 康超娣.等离子体活化水对鸡肉源 *P. deceptionensis* 杀菌效果及机制研究[D].郑州:郑州轻工业大学,2019.
- [5] 鉅晓艳,刘舒彦,李海蓝,等.等离子体活化水对加州鲈巴氏葡萄球菌的抑制作用[J].食品科技,2020,45(11):124-130.
- [6] 汪家权,周小霞,许子牧,等.等离子体活化水灭活金黄色葡萄球菌生物膜[J].环境工程学报,2019,13(7):1766-1772.
- [7] 白晶,朱秋劲,徐世涛,等.3 种绿色减菌技术在食品中的应用研究进展[J].肉类研究,2019,33(12):61-68.
- [8] 汪陈洁.乳酸对常见食源性致病菌的抗菌活性与作用机理[D].武汉:华中农业大学,2014.
- [9] HUANG Yaoxin, CHEN Haiqiang. Effect of organic acids, hydrogen peroxide and mild heat on inactivation of *Escherichia coli* O157:H7 on baby spinach [J]. Food Control, 2011, 22: 1178-1183.
- [10] Youssef M K, Yang X, Badoni M, et al. Survival of acid-adapted *Escherichia coli* O157:H7 and not-adapted *E. coli* on beef treated with 2% or 5% lactic acid [J]. Food Control, 2013, 34(1): 13-18.
- [11] Mahmoud B S M. Controlling *Vibrio vulnificus* and spoilage bacteria in fresh shucked oysters using natural antimicrobials [J]. Letters in Applied Microbiology, 2014, 58(1): 1-7.
- [12] Aline Chaine, Elodie Arnaud, Alain Kondjoyan, et al. Effect of steam and lactic acid treatments on the survival of *Salmonella enteritidis* and *Campylobacter jejuni* inoculated on chicken skin [J]. Food Microbiol, 2013, 162(3): 276-282.
- [13] Michael N, LevyStuart B. Molecular mechanisms of antibacterial multidrug resistance [J]. Cell, 2007, 128(6): 1037-1050.
- [14] Jing Qian, Chen Wang, Hong Zhuang, et al. Oxidative stress responses of pathogen bacteria in poultry to plasma-activated lactic acid solutions [J]. Food Control, 2020, 118: 107355.
- [15] A M León Peláez, C A Serna Cataño, E A Quintero Yepes, et al. Inhibitory activity of lactic and acetic acid on *Aspergillus flavus* growth for food preservation [J]. Food Control, 2012, 24(1-2): 177-183.
- [16] 相启森,张嵘,杜桂红,等.等离子体活化水对沙门氏菌的灭活作用及机制研究[J].食品工业科技,2021,42(8):138-143.
- [17] 赵莹,严龙飞,严文静,等.低温等离子体活化水与介质阻挡放电联合处理对草莓冷杀菌效果及品质的影响[J].食品科学,2022,43(17):105-116.
- [18] GB 4789.2-2016,食品安全国家标准食品微生物学检验菌落总数的测定[S].
- [19] Tian Ding, Xiao-Ting Xua, Jiao Li, et al. Disinfection efficacy and mechanism of slightly acidic electrolyzed water on *Staphylococcus aureus* in pure culture [J]. Food Control, 2016, 60: 505-510.
- [20] Thirumdas R, Kothakota A, Annapure U, et al. Plasma activated water (PAW): Chemistry, physico-chemical properties, applications in food and agriculture [J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 77: 21-31.
- [21] Peter Bruggeman, Christophe Leys. Non-thermal plasmas in and in contact with liquids [J]. Journal of Physics D-Applied Physics, 2009, 42(5): 053001.
- [22] Perinban Sellam, Orsat Valérie, Raghavan Vijaya. Nonthermal plasma-liquid interactions in food processing: A review [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2019, 18(6): 1985-2008.
- [23] 郭俭.低温等离子体杀菌机理与活性水杀菌作用研究[D].杭州:浙江大学,2016.
- [24] 白妍.等离子体活化水对蜡样芽孢杆菌(*B. cereus*)芽孢的杀灭效果与机理研究[D].杭州:浙江大学,2020.

- [25] Ercan Utku K, Smith Josh, JiHai-Feng, et al. Chemical changes in nonthermal plasma-treated N-acetylcysteine (NAC) solution and their contribution to bacterial inactivation [J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 20365.
- [26] Zhao Yiming, Patange Apurva, Sun Dawen, et al. Plasma-activated water: Physicochemical properties, microbial inactivation mechanisms, factors influencing antimicrobial effectiveness, and applications in the food industry [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2020, 19(6): 3951-3979.
- [27] Oehmigen K, H hänel M, Brandenburg R, et al. The role of acidification for antimicrobial activity of atmospheric pressure plasma in liquids [J]. Plasma Processes & Polymers, 2010, 7(3-4): 250-257.
- [28] 赵电波,王少丹,郑凯茜,等.等离子体活化水-苯乳酸协同杀灭大肠杆菌 O157:H7 作用及机制研究[J].食品工业科技, 2022,43(14):138-143.
- [29] 周小霞.低温等离子体失活水中细菌和等离子体活化水失活生物膜的研究[D].合肥:合肥工业大学,2019.
- [30] 吴上.食品加工理化因子对鼠伤寒沙门氏菌耐药性的影响及相关机制研究[D].无锡:江南大学,2021.