

## 滑动弧放电等离子体处理对冷鲜猪肉保鲜的影响

翟国臻<sup>1,3</sup>, 李佳<sup>1,3</sup>, 郭杉杉<sup>1,3</sup>, 马挺军<sup>1,2</sup>, 孙运金<sup>1,2\*</sup>, 贾晓云<sup>3</sup>, 成晓瑜<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>北京农学院食品科学与工程学院 食品质量与安全北京实验室 北京 102206

<sup>2</sup>北京农学院 首都农产品安全产业技术研究院 等离子体工程中心 北京 102206

<sup>3</sup>中国肉类食品综合研究中心 北京 100068)

**摘要** 为了探索滑动弧放电等离子体对冷鲜猪肉的贮藏保鲜效果,研究空气、氮气、氩气滑动弧放电等离子体对猪肉品质和卫生水平的处理效果,包括感官评价、红度、菌落总数、挥发性盐基氮等品质指标。结果表明:不同放电气体处理均提高了猪肉的感官评价值和红度值。菌落总数和挥发性盐基氮测试表明滑动弧放电处理可延长猪肉的贮藏期,其中氩气处理效果最好,而氮气和空气放电处理促进了冷鲜猪肉脂肪氧化,这与等离子体处理后肉表面形态的结果一致。试验结果表明大气等离子体对冷鲜猪肉的处理效果依赖于放电气体种类。综合保鲜品质的各项指标,氩气放电处理在提高猪肉保水性和感官性能,降低猪肉表面的微生物方面具有一定的优势,可为猪肉的贮藏保鲜提供一种新的处理方法。

**关键词** 滑动弧放电; 贮藏保鲜; 感官评价; 挥发性盐基氮

**文章编号** 1009-7848(2022)01-0189-09 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2022.01.021

大气等离子体是在大气环境下产生的气体放电现象,放电产生的电子温度虽高达上万度,但离子温度较低,整体上表现为室温,也称为低温等离子体<sup>[1-3]</sup>。大气等离子体内部含有大量的活性成分,如电子、离子、自由基、激发态粒子等,具有较高的氧化特性,可对食品表面的各类食源性有害微生物进行灭杀,是一种存在巨大应用潜力的食品冷杀菌技术<sup>[4-6]</sup>。Albertos 等<sup>[7]</sup>研究发现在 70 kV、5 min 条件下采用介质阻挡放电处理鲱鱼,可以减少好氧菌属、假单胞菌属、肠杆菌属的存在水平,同时该处理对脂质氧化等品质指标没有显著影响。Kim 等<sup>[2]</sup>研究发现射频放电产生的活性氧可灭活牛肉干中的金黄葡萄球菌,且处理对牛肉干的颜色、剪切力、脂肪酸的含量没有显著影响。Jayasena 等<sup>[8]</sup>研究发现介质阻挡放电处理可显著降低猪肉中单增李斯特菌、沙门氏菌和大肠杆菌,长时间处理后对猪肉的颜色、感官评价产生负面

影响。乔维维等<sup>[9]</sup>研究发现介质阻挡放电对牛肉的杀菌率达 93%,而对牛肉的色泽没有较大的影响。由此可知,大气等离子体放电可有效灭杀食品表面的各类食源性有害微生物,在贮藏保鲜方面具有一定的优势,然而,大气等离子体中的活性成分是否对处理对象的品质造成不利影响,还有待验证。例如:介质阻挡放电会产生·OH、·O<sub>2</sub><sup>-</sup>、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>、O<sub>3</sub>等多种具有强氧化性的活性自由基,可促进猪肉的脂质氧化<sup>[10]</sup>。此外,大气等离子体放电模式较多,如何在保障杀菌的同时降低对食品品质的影响,成为大气等离子体技术在冷杀菌领域应用的关键问题。

滑动弧放电作为大气等离子体放电中的一种放电模式,兼容了热等离子体和非热等离子体的特性<sup>[11-12]</sup>。相比介质阻挡放电、射频放电,滑动弧放电具有活性离子浓度高、处理面积大、抑菌效率高的特点<sup>[13-16]</sup>,有望突破大气等离子体技术在处理面积方面的应用瓶颈。例如作者前期研究中采用滑动弧放电等离子体处理鸡蛋表面,可有效降低沙门氏菌存活率,延长了鸡蛋的贮藏保鲜周期<sup>[17]</sup>,将滑动弧放电等离子体应用于预调理鸡丁贮藏保鲜,对鸡肉的杀菌率达 96%,对其品质影响较小<sup>[18]</sup>。本研究采用滑动弧放电处理冷鲜猪肉,研究其对猪肉贮藏保鲜品质的影响,探究该放电模式在肉品保鲜中的可行性。

**收稿日期:** 2021-01-11

**基金项目:** “十三五”国家重点研发计划重点专项(2016 YFD0401503); 人才培养质量建设-高水平人才交叉培养计划-实培计划(PXM2020\_014207\_000009)

**作者简介:** 翟国臻(1996—),男,硕士生

**通信作者:** 孙运金 E-mail: aosdf2@163.com

成晓瑜 E-mail: chxyey@aliyun.com

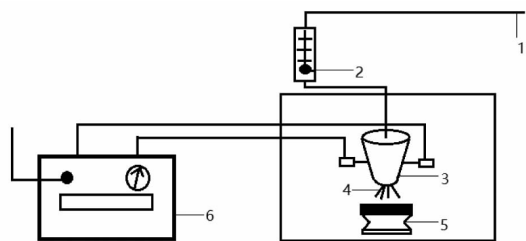
## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

大肠杆菌 O157:H7 (*Escherichia coli* O157:H7) CICC 21530、金黄色葡萄球菌 (*Staphylococcus aureus*, *S. aureus*) CICC 10001、单增李斯特菌 (*Listeria monocytogenes*) CICC 21529、沙门氏菌 (*Salmonella enterica* subsp) CICC22956, 中国工业微生物菌种保藏管理中心; 平板计数琼脂(分析纯), 北京陆桥技术股份有限公司; 叔丁醇(分析纯), 北京畅华志诚科技有限公司; 盐酸、硼酸(均为分析纯), 北京化工厂; 氧化镁(分析纯), 天津市津科精细化工研究所; 氮气、氩气, 北京市海科元昌实用气体有限责任公司; 2-巯代巴比妥酸(生化试剂), 国药集团化学试剂有限公司; 猪里脊购于北京市昌平区北农市场。

### 1.2 仪器与设备

非热滑动弧放电处理器, 实验室自制; E1010 离子溅射仪、VFD-21S 冷冻干燥仪, 日本日立公司; TESCAN5136 扫描电镜, 捷克斯洛伐克公司; TU-1810 紫外-可见分光光度计, 上海圣科仪器设备有限公司; CM-700d1 分光测色计, 日本 KONICA MINOLTA 公司; JB-CJ-2FCS 洁净工作台, 苏州佳宝净化工程设备有限公司; SCIENTZ-11 无菌均质器, 宁波新芝生物科技股份有限公司。



注: 1. 气瓶; 2. 气体流量测试表; 3. 陶瓷反应器; 4. 滑动弧放电; 5. 基台; 6. 电源。

图 1 滑动弧放电设备示意图

Fig.1 Schematic diagram of gliding arc discharge equipment

### 1.3 方法

1.3.1 滑动弧放电杀菌 分别将活化好的二代大肠杆菌 O157:H7、金黄色葡萄球菌、单增李斯特菌、沙门氏菌菌悬液离心得到菌泥。将菌泥均匀涂

在无菌载玻片的表面, 随后分别在不同气体等离子体放电下处理 30 s。将处理后的载玻片分别用无菌生理盐水反复冲洗至无菌的离心管, 混匀成菌悬液, 待用。吸取 1 mL 上述菌悬液用无菌生理盐水梯度稀释至  $10^{-6}$  梯度, 吸取 100  $\mu$ L  $10^{-6}$  梯度菌悬液至固体培养皿中, 倒置放入恒温恒湿培养箱中 37  $^{\circ}$ C 培养 12~16 h, 计数。

1.3.2 样品的处理 将猪肉去掉筋膜, 切成质量为 25 g、厚度为 5 mm 的肉片, 在无菌环境中分别用空气、氮气、氩气作为载气进行滑动弧放电处理, 处理时间 30 s 处理功率 400 W, 气体流量 40 L/min。将处理后的猪肉用无菌保鲜袋包装, 置于 4  $^{\circ}$ C 环境下保存。随后测试其贮藏期菌落总数、红度值、挥发性盐基氮、丙二醛含量, 并对猪肉表面进行形态观察及感官评价。

1.3.3 猪肉贮藏期菌落总数测定 按照国标 GB 4789.2-2016《食品微生物菌落总数测定》<sup>[19]</sup>方法测定菌落总数。

1.3.4 感官评价 按照国标 GB/T 9959.2-2008《分割冻、鲜猪瘦肉》<sup>[20]</sup>进行感官评价并略作修改。感官评价小组由食品专业的老师及同学共 12 人组成, 每 2 d 取出 1 组不同载气滑动弧放电处理前、后的猪肉, 对其色泽、气味、弹性、黏度进行打分, 总分为 40 分。各项指标评分细则见表 1。

1.3.5 猪肉红度值的测定 用标准白板校正后的 CM-700d1 分光测色计测定猪肉的红度值  $a^*$  值, 每 2 d 测试 1 次, 每个样品选取 5 个部位测量, 取平均值为最终结果。

1.3.6 挥发性盐基氮测定 参考国标 GB 5009.228-2016《食品中挥发性盐基氮的测定》<sup>[21]</sup>, 采用半微量凯氏定氮法测定 TVB-N 值。

1.3.7 丙二醛含量的测定 参考国标 GB 5009.181-2016《食品安全国家标准 食品中丙二醛的测定》<sup>[22]</sup>, 采用分光光度法测定猪肉中的丙二醛含量。

1.3.8 猪肉表面形态观察 将肉样切割成肉片, 尺寸(长 $\times$ 宽 $\times$ 厚)为 5 cm $\times$ 5 cm $\times$ 5 mm, 切割方向顺着肌纤维方向, 随后进行滑动弧放电处理。往培养皿中倒入戊二醛(2.5%)固定液(覆盖样品表面即可)。将切割后的小片样品放入装有戊二醛的离心管中室温静置 6 h, 之后放入冰箱 4  $^{\circ}$ C 保存 12 h。

表 1 感官评价评分表

Table 1 Sensory evaluation scores

评分	色泽	气味	组织状态	黏度
10	肌肉颜色鲜艳,有光泽	具有猪肉特有的气味,无异味	弹性好,手指按压后立即恢复	表面微湿润,不粘手
8	肌肉颜色较鲜艳,有光泽	猪肉气味变淡,无异味	弹性较好,手指按压后可恢复	表面微干燥,不粘手
6	肌肉颜色暗红,无光泽	稍有异味	弹性一般,手指按压后缓慢恢复	表面干燥,微粘手
4	肌肉颜色暗红,无光泽	有异味	无弹性,手指按压后不能恢复	表面干燥,很粘手
2	肌肉颜色呈褐色,无光泽	有强异味或出现腐臭味	弹性消失,手指按压后凹陷明显	表面出现黏液,很粘手

将处理后的样品与未处理的样品离心,弃上清液,用磷酸盐缓冲溶液(PBS)洗涤 3 次,取 2.5%戊二醛固定液于离心管中(覆盖样品表面),在室温放置 6 h 后 4 ℃冰箱过夜保存。次日将样品用 PBS 漂洗 3 次,每次 10 min。乙醇梯度脱水:用体积分数 10%,30%,50%,70%,90%,95%的乙醇各脱水 1 次,无水乙醇脱水 2 次,每次持续 10 min。之后用叔丁醇洗脱置换 3 次,每次 20 min。加入少量叔丁醇覆盖样品即可,放入-20 ℃冻存 20 min。快速取出样品,在真空冷冻干燥机干燥,次日喷金,扫描电镜观察。

#### 1.4 数据处理

本试验采用 SPSS 22.0 对数据进行方差分析,采用 Duncan's 进行多重比较,差异显著的标准为  $P < 0.05$ 。用 Origin 8.0 作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同微生物的杀菌效果

大肠杆菌 O157:H7、金黄葡萄球菌、沙门氏菌、单增李斯特菌均是生鲜肉中具有代表性的食源性致病菌<sup>[23]</sup>。为了验证滑动弧放电对食源性致病微生物的杀菌效果,研究了滑动弧放电对上述冷鲜肉表面可能存在的微生物的杀菌效果。由图 2 可知,滑动弧放电处理后,大肠杆菌、金黄葡萄球菌、沙门氏菌、单增李斯特菌的菌落总数均减少。大肠杆菌通过空气、氮气、氩气放电处理后分别降低 0.3,0.7,0.9 个对数值,金黄葡萄球菌分别降低 0.2,0.5,0.9 个对数值,沙门氏菌分别降低 0.2,0.5,0.8 个对数值,单增李斯特菌分别降低 0.1,0.5,0.9 个对数值。不同气体对 4 种菌的杀菌效果各不相同,且氩气放电处理后杀菌效果最佳,氮气次之,空气最差。滑动弧放电的杀菌效果是因

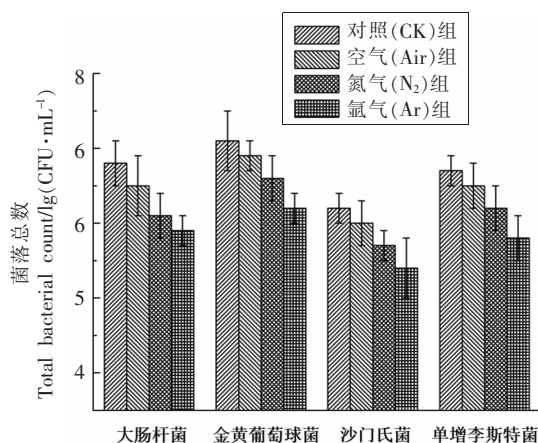


图 2 不同载气处理后菌落总数的变化

Fig.2 The changes of the total number of colonies after different carrier gas treatment

不同气体放电产生的活性物质的种类与浓度不同而存在差异性<sup>[3]</sup>。相对于以介质阻挡放电和大气等离子体射流占主流的大气放电模式<sup>[24-25]</sup>,滑动弧放电等离子体可在较短时间产生明显的杀菌效果,在杀菌的时效性方面具有一定的优势,也预示其在冷鲜肉保鲜方面具有潜在的应用价值。

### 2.2 菌落总数的影响

菌落总数是反应肉的腐败程度的重要指标,当肉中的菌落总数超过 6.0 个对数值时,则超出国家标准<sup>[26-27]</sup>。为了进一步研究滑动弧放电等离子体对冷鲜肉表面菌落总数的影响,研究了不同贮藏时间及不同放电气体处理,对冷鲜肉微生物指标的影响。由图 3 可知,随着贮藏时间的延长,不同处理条件下肉中的菌落总数呈增加趋势。对照组菌落总数在贮藏第 6 天超过 6.0 个对数值,而经滑动弧放电处理,氩气放电后第 10 天达到这个水平,氮气组第 8 天,空气组第 7 天,说明滑动弧放电处理可有效降低猪肉在贮藏期内的微生物含

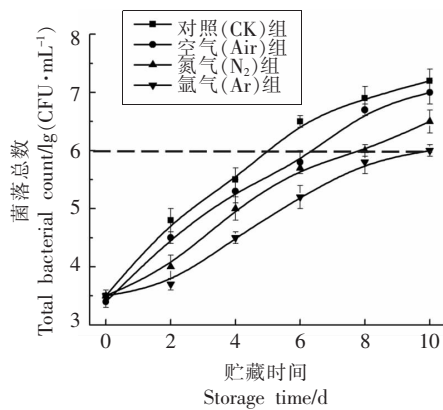


图3 不同载气处理后猪肉贮藏期内菌落总数的变化

Fig.3 The changes of the total number of colonies with pork storage period under different carrier gas treatment

量,最高可降低 1.2 个对数值,有效改善猪肉因微生物作用造成的品质变化,从而延长猪肉的贮藏保质期。等离子体具有较好的抑菌效果<sup>[28]</sup>,在新鲜食材的贮藏保鲜方面有一定的应用。例如大气等离子体可降低新鲜果皮、预调理鸡丁表面的各种有害微生物<sup>[29-30]</sup>。

### 2.3 感官评价、红度值的影响

在猪肉贮藏期内,各组猪肉的感官评价分数

逐渐降低,其中对照组分数下降最为明显,处理组的感官评价分数均普遍高于对照组 ( $P<0.05$ ),在色泽、气味、弹性和黏度方面具有明显的提升。等离子体中的活性物质浓度及种类存在较大差异,导致其对猪肉的处理效果存在较大不同,氩气放电产生的电子密度较高,离子温度较低<sup>[3]</sup>,对猪肉的处理效果更加明显,感官评价分数最高,其次为氮气组,最低为空气组。

红度值是直观判断肉的新鲜度指标,是消费者从感官上评价猪肉品质的重要指标,受氧合肌红蛋白和高铁肌红蛋白含量的影响,当血红蛋白氧化为高铁肌红蛋白时,肉的红度值降低<sup>[31]</sup>。由表 2 可知,各组猪肉的红度值随贮藏时间的延长逐渐降低,原因是猪肉中的血红蛋白不断氧化。相比对照组,滑动弧放电处理的样品红度值下降趋势减缓,氩气处理组减缓的幅度最大,氮气组次之,空气组最小。这可能是因为在滑动电弧放电处理在一定程度上抑制了蛋白内源酶的活性,降低了血红肌红蛋白氧化为高铁肌红蛋白的速率,更好地维持了猪肉的色泽。Jung 等<sup>[32]</sup>采用介质阻挡放电处理猪肉糜,猪肉的红度值随放电时间的延长而显著增加,并且贮藏期内处理的猪肉的红度值下降趋势减缓,与本试验的结论一致。

表 2 不同气体处理猪肉在贮藏期内的感官评价、红度值

Table 2 Sensory evaluation, redness of pork treated with different gases during storage period

性能指标	处理条件	贮藏时间/d					
		0	2	4	6	8	10
感官评价	对照组	38.7 ± 0.5 <sup>a</sup>	35.2 ± 0.5 <sup>a</sup>	29.5 ± 0.3 <sup>a</sup>	24.3 ± 0.6 <sup>a</sup>	22.5 ± 0.6 <sup>a</sup>	20.6 ± 0.7 <sup>a</sup>
	空气组	39.8 ± 0.6 <sup>a</sup>	35.4 ± 0.4 <sup>a</sup>	30.5 ± 0.5 <sup>b</sup>	26.5 ± 0.6 <sup>b</sup>	24.5 ± 0.7 <sup>b</sup>	23.8 ± 0.4 <sup>b</sup>
	氮气组	39.2 ± 0.3 <sup>a</sup>	35.5 ± 0.3 <sup>a</sup>	32.5 ± 0.2 <sup>c</sup>	30.3 ± 0.6 <sup>c</sup>	29.1 ± 0.4 <sup>c</sup>	27.4 ± 0.6 <sup>c</sup>
	氩气组	39.5 ± 0.4 <sup>a</sup>	36.5 ± 0.5 <sup>b</sup>	33.1 ± 0.3 <sup>c</sup>	31.5 ± 0.3 <sup>d</sup>	30.9 ± 0.6 <sup>d</sup>	30.1 ± 0.7 <sup>d</sup>
红度值	对照组	16.3 ± 0.3 <sup>a</sup>	13.8 ± 0.3 <sup>a</sup>	12.2 ± 0.2 <sup>a</sup>	11.3 ± 0.2 <sup>a</sup>	10.8 ± 0.3 <sup>a</sup>	10.0 ± 0.2 <sup>a</sup>
	空气组	16.5 ± 0.4 <sup>a</sup>	14.2 ± 0.2 <sup>a</sup>	12.8 ± 0.3 <sup>b</sup>	11.9 ± 0.4 <sup>b</sup>	11.1 ± 0.3 <sup>a</sup>	10.4 ± 0.2 <sup>a</sup>
	氮气组	16.2 ± 0.2 <sup>a</sup>	14.1 ± 0.3 <sup>a</sup>	13.0 ± 0.3 <sup>bc</sup>	12.2 ± 0.2 <sup>b</sup>	11.7 ± 0.2 <sup>b</sup>	10.8 ± 0.3 <sup>b</sup>
	氩气组	16.4 ± 0.3 <sup>a</sup>	14.5 ± 0.1 <sup>b</sup>	13.4 ± 0.1 <sup>c</sup>	12.8 ± 0.3 <sup>c</sup>	12.6 ± 0.2 <sup>c</sup>	12.5 ± 0.3 <sup>c</sup>

注:不同小写字母表示在相同贮藏期不同处理条件下差异显著( $P<0.05$ )。

### 2.4 TVB-N 值的影响

挥发性盐基氮是评价猪肉新鲜度的重要指标,反映猪肉中蛋白质被分解为氨、胺类物质的含量,表示蛋白质的降解程度。由图 4 可知,随着贮藏期的延长,对照样品的 TVB-N 值不断增加,经

滑动弧放电处理的 TVB-N 值均小于对照组 ( $P<0.05$ ),氩气组处理效果好于氮气组,空气组处理效果最弱。根据 GB 2707-2016《食品安全国家标准 鲜(冻)畜、禽产品》<sup>[33]</sup>挥发性盐基氮  $\leq 15$  mg/100 g,对照组在第 6 天 TVB-N 值为 (18.1±1.1)

mg/100 g, 超过国家标准, 氩气处理组在第 8 天仍低于国家标准。针对猪肉的蛋白质易发生降解, 从而影响肉制品的加工特性及营养价值<sup>[32,34]</sup>, 采用滑动弧放电处理降低了微生物含量, 同时抑制了酶的活性<sup>[35]</sup>, 减少蛋白质的降解, 从而达到保鲜效果。黄明明等<sup>[36]</sup>研究发现通过介质阻挡放电处理牛肉, 减少了微生物对蛋白质的分解, 从而降低了牛肉的 TVB-N 值, 与本试验结论相符。

## 2.5 MDA 值的影响

脂肪氧化会产生一些醛、酮类化合物, 会产生不良风味, 降低猪肉的品质<sup>[37-38]</sup>。MDA 值是猪肉脂

肪氧化程度的重要指标, 表示脂肪次级氧化产生丙二醛的含量。由图 5 可知, 贮藏期内, 猪肉中脂肪发生氧化, MDA 值不断增大。空气、氮气放电处理组的 MDA 值均大于对照组, 氩气放电处理的 MDA 值低于对照组 ( $P < 0.05$ )。等离子体因放电形式、放电气体种类、放电参数不同而产生的活性粒子的浓度与种类存在较大的差异, 因此对肉的脂质氧化效果不同<sup>[39]</sup>。同理, 滑动弧放电处理因活性粒子成分不同而对猪肉脂肪的氧化程度存在较大差异。对于猪肉的贮藏保鲜特性, 氩气处理效果最佳。

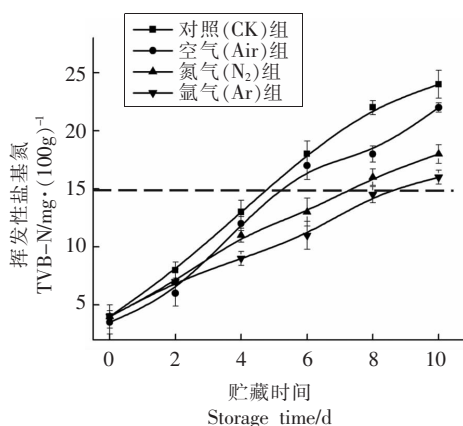


图 4 不同载气处理猪肉在贮藏期内 TVB-N 值的变化

Fig.4 The changes of TVB-N value of pork treated with different gases during storage period

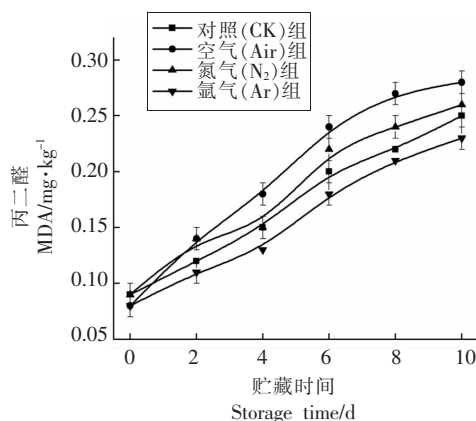


图 5 不同载气处理猪肉在贮藏期内 MDA 值的变化

Fig.5 The changes of MDA value of pork treated with different carrier gas during storage period

## 2.6 表面形貌的影响

猪肉表面结构主要为结构蛋白与肌原纤维蛋白组成的网状结构。由图 6 可知, 经空气和氮气放电处理后, 猪肉的表面结构微孔尺寸有所扩大, 网络结构有所降低, 这可能是因为滑动弧放电产生的一定浓度的原子氧和 NO<sup>[40]</sup>, 这些具有氧化性的粒子促进了脂肪中不饱和脂肪酸的氧化、分解, 导致其网络结构改变。其中空气、氮气放电产生较高浓度的原子氧和 NO, 因此空气、氮气放电处理后微孔尺寸扩大。相比其它气体放电处理, 氩气放电处理对猪肉表面的影响较小, 这可能是因为氩气放电等离子体的电子密度较高, 主要活性成分为低浓度的羟基自由基, 不足以对猪肉表面网状结构产生影响。通过猪肉的表面形态观察可知, 滑动

弧放电处理的猪肉脂肪氧化结果与图 5 一致。

## 3 结论

采用滑动弧放电等离子体对 4 种生鲜肉中常见微生物进行杀菌处理, 结果发现氩气杀菌效果最佳, 氮气次之, 空气最差。采用滑动弧放电对猪肉表面进行处理, 比较不同放电气体处理下猪肉的感官特性、红度和脂肪氧化等外观和品质指标的变化。感官评价和红度测定结果表明, 氩气处理评分最高, 氮气次之, 空气最低, 然而均高于对照组。在抑菌效果方面, 氩气放电处理可降低猪肉的菌落总数, 最高可达 1.2 个对数值, 其次为氮气和空气。脂肪氧化和表面形貌测定结果表明, 空气和氮气放电处理促进脂肪氧化, 氩气处理可延缓猪

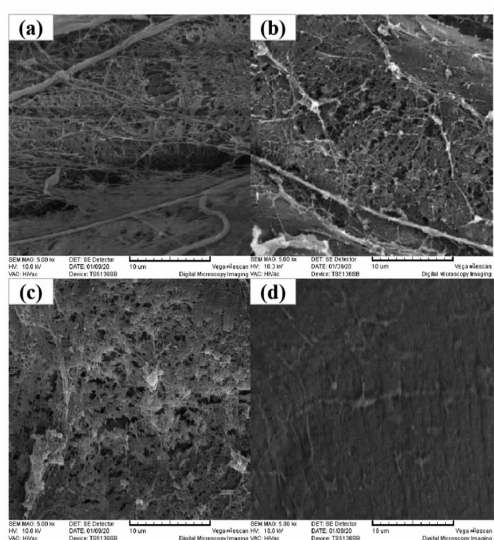


图6 不同载气处理猪肉表面结构的影响(a. 对照组; b. 空气处理组;c. 氮气处理组;d. 氩气处理组)  
Fig.6 Effect of different carrier gas on pork surface structure (a. control group, b. air treatment, c. nitrogen treatment, d. argon treatment)

肉的脂肪氧化程度。总之,滑动弧放电等离子体技术为猪肉贮藏保鲜提供一种新的处理方法。

### 参 考 文 献

- [1] ATTRI P, KIM Y H, PARK D H, et al. Generation mechanism of hydroxyl radical species and its lifetime prediction during the plasma-initiated ultraviolet (UV) photolysis[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 9332-9339.
- [2] KIM J S, LEE E J, CHOI E H, et al. Inactivation of *Staphylococcus aureus* on the beef jerky by radio-frequency atmospheric pressure plasma discharge treatment[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2014, 22: 124-130.
- [3] HOFFMANN C, BERGANZA C, ZHANG J. Cold atmospheric plasma: Methods of production and application in dentistry and oncology[J]. Medical Gas Research, 2013, 3(1): 1-15.
- [4] BOURKE P, ZIUZINA D, BOEHM D, et al. The potential of cold plasma for safe and sustainable food production[J]. Trends in Biotechnology, 2018, 36(6): 615-626.
- [5] DENG X T, SHI J J, KONG M G. Physical mechanisms of inactivation of *Bacillus subtilis* spores using cold atmospheric plasmas[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2006, 34(4): 1310-1316.
- [6] 张晔, 刘志伟, 谭兴和, 等. 冷等离子体食品杀菌应用研究进展[J]. 中国酿造, 2019, 38(1): 20-24. ZHANG Y, LIU Z W, TAN X H, et al. Research progress of cold plasma application in food sterilization[J]. China Brewing, 2019, 38(1): 20-24.
- [7] ALBERTOS I, MARTIN-DIANA A B, CULLEN P J, et al. Shelf-life extension of herring (*Clupea harengus*) using in-package atmospheric plasma technology[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2019, 53: 85-91.
- [8] JAYASENA D D, KIM H J, YONG H I, et al. Flexible thin-layer dielectric barrier discharge plasma treatment of pork butt and beef loin: Effects on pathogen inactivation and meat-quality attributes[J]. Food Microbiology, 2015, 46: 51-57.
- [9] 乔维维, 黄明明, 王佳媚, 等. 低温等离子体对生鲜牛肉杀菌效果及色泽的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(23): 237-242. QIAO W W, HUANG M M, WANG J M, et al. Effect of cold plasma on sterilization and color of fresh beef[J]. Food Science, 2017, 38(23): 237-242.
- [10] 孟婧怡, 黄明明, 王佳媚, 等. 低温等离子体冷杀菌处理时间及电压强度对生鲜猪肉脂质氧化的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(3): 135-141. MENG J Y, HUANG M M, WANG J M, et al. Impact of cold plasma cold sterilization processing time and voltage on fresh pork lipid oxidation[J]. Food Science, 2019, 40(3): 135-141.
- [11] 鲁娜, 孙丹凤, 王冰, 等. 交流旋转滑动弧的放电特性[J]. 高电压技术, 2018, 44(6): 1930-1937. LU N, SUN D F, WANG B, et al. Discharge characteristic of AC rotating gliding arc[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(6): 1930-1937.
- [12] 王静, 杜长明, 张路路, 等. 滑动弧放电等离子体杀菌的研究进展[J]. 环境工程, 2010, 28(6): 113-117. WANG J, DU C G, ZHANG L L, et al. Progress in research of gliding ARC discharge plasma for sterilization[J]. Environmental Engineering, 2010, 28(6): 113-117.
- [13] 严建华, 戴尚莉, 李晓东, 等. 气液两相滑动弧放电中自由基的光谱研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(12): 2115-2119. YAN J H, DAI S L, LI X D, et al. Spectroscopic study of free radicals in gas-liquid two-phase gliding arc discharge[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(12): 2115-2119.

- 2008(8): 1851-1855.
- YAN J H, DAI S L, LI X D, et al. Emission spectroscopy diagnosis of the radicals generated in gas-liquid phases gliding arc discharge [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008(8): 1851-1855.
- [14] TIYA-DJOWE A, ACAYANKA E, MBOUOPDA A P, et al. Producing oxide catalysts by exploiting the chemistry of gliding arc atmospheric plasma in humid air[J]. Catalysis Today, 2019, 334: 104-112.
- [15] 杨昭. 过硫酸盐气液两相滑动弧放电等离子体处理有机废水的研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
- YANG Z. Study on the treatment of phenol wastewater by two phase gliding arc discharge plasma with sodium sulfate[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018.
- [16] 张晓星, 肖熔艳, 黄杨珏. 低温等离子体处理 SF6 废弃综述[J]. 电工技术学报, 2016, 31(24): 16-24.
- ZHANG X X, XIAO H Y, HUANG Y J. A review of degradation of SF6 waste by low temperature plasma[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(24): 16-24.
- [17] 朱莉华, 李燕, 仝其根, 等. 大气滑动弧放电对沙门氏菌的灭活机制及在鸡蛋保鲜中的应用[J]. 食品科学, 2017, 38(9): 133-137.
- ZHU L H, LI Y, TONG Q G, et al. Inactivation mechanism of *Salmonella* by atmospheric gliding arc discharge and its application in the preservation of eggs[J]. Food Science, 2017, 38(9): 133-137.
- [18] 刘政, 李娜, 伍军, 等. 用于调理鸡肉的大气等离子体冷杀菌工艺优化[J]. 食品工业科技, 2019(16): 145-150.
- LIU Z, LI N, WU J, et al. Process optimization of nonthermal sterilization of atmospheric plasma technology applied on pre-processed chicken[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(16): 145-150.
- [19] 国家食品药品监督管理总局, 国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准食品微生物学检验菌落总数测定: GB 4789.2-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 1-5.
- China Food and Drug Administration, National Health and Family Planning Commission. National standard for food safety: Determination of total number of bacteria in food microbiology: GB 4789.2-2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016: 1-5.
- [20] 国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. 分割鲜、冻猪瘦肉: GB/T 9959.2-2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008: 1-5.
- State Administration of Quality Supervision, Standardization Administration of China. Segmentation of fresh and frozen lean pork: GB/T 9959.2-2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008: 1-5.
- [21] 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 5009.288-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 1-8.
- National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. National standard for food safety determination of volatile base nitrogen in food: GB 5009.288-2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016: 1-8.
- [22] 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丙二醛的测定: GB 5009.181-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 1-6.
- National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. National standard for food safety determination of malondialdehyde in food: GB 5009.181-2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016: 1-6.
- [23] MISRA N N, CHEORUN J. Applications of cold plasma technology for microbiological safety in meat industry[J]. Trends in Food Science & Technology, 2017, 64: 74-86.
- [24] 谢菁. 冷鲜猪肉复合保鲜包装技术的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2019.
- XIE J. Research on composite packaging technology of chilled pork[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2019.
- [25] LIAO X Y, LIU D H, XIANG Q S, et al. Inactivation mechanisms of non-thermal plasma on microbes: A review [J]. Food Control, 2017, 75: 83-91.
- [26] LÓPEZ M, CALVO T, PRIETO M, et al. A review on non-thermal atmospheric plasma for food preservation: Mode of action, determinants of effectiveness, and applications[J]. Frontiers in Microbiology, 2019, 10: 622-642.
- [27] 唐森, 张鹏, 张义浩, 等. 香茅油在冷却猪肉糜保鲜中应用的研究[J]. 肉类工业, 2019(2): 16-20.
- TANG S, ZHANG P, ZHANG Y H, et al. Study on the application of citronella oil in preservation of cooling ground pork [J]. Meat Industry, 2019(2):

- 16–20.
- [28] LIAO X, LIU D, XIANG Q, et al. Inactivation mechanisms of non-thermal plasma on microbes: A review[J]. *Food Control*, 2017, 75: 83–91.
- [29] BHIHDE S, SALVI D, SCHAFFNER D W, et al. Effect of surface roughness in model and fresh fruit systems on microbial inactivation efficacy of cold atmospheric pressure plasma[J]. *Journal of Food Protection*, 2017, 80(8): 1337–1346.
- [30] ROH S H, LEE S Y, PARK H H, et al. Effects of the treatment parameters on the efficacy of the inactivation of *Salmonella* contaminating boiled chicken breast by in-package atmospheric cold plasma treatment[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2019, 293: 24–33.
- [31] PATANGE A, BOEHM D, ZIUZINA D, et al. High voltage atmospheric cold air plasma control of bacterial biofilms on fresh produce[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2019, 293: 137–145.
- [32] JUNG S, LEE J, LIM Y, et al. Direct infusion of nitrite into meat batter by atmospheric pressure plasma treatment[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2017, 39: 113–118.
- [33] 国家食品药品监督管理总局, 国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 鲜(冻)畜、禽产品: GB 2707–2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 12–23.
- State Food and Drug Administration, National Health and Family Planning Commission. National standard for food safety: Fresh (frozen) livestock and poultry products: GB 2707–2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016: 12–23.
- [34] 贾娜, 孙嘉, 王乐田, 等. 没食子酸对猪肉糜脂肪和蛋白氧化的抑制作用及对肉糜品质特性的影响[J]. *肉类研究*, 2019, 33(3): 1–6.
- JIA N, SUN J, WANG L T, et al. Effect of gallic acid on inhibition of lipid and protein oxidation and quality of pork patties during chilled storage[J]. *Meat Research*, 2019, 33(3): 1–6.
- [35] KE Z G, HUANG Q. Inactivation and heme degradation of horseradish peroxidase induced by discharge plasma[J]. *Plasma processes and polymers*, 2013, 10(8): 731–739.
- [36] 黄明明, 乔维维, 章建浩, 等. 低温等离子体冷杀菌对生鲜牛肉主要腐败菌及生物胺抑制效应研究[J]. *食品科学技术学报*, 2018, 36(4): 17–23.
- HUANG M M, QIAO W W, ZHANG J H, et al. Effects of cold plasma cold sterilization on major spoilage bacteria and biogenic amines in beef[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2018, 36(4): 17–23.
- [37] 李靖. 不同冻藏时间猪背最长肌的品质变化研究[D]. 成都: 西华大学, 2018.
- LI J. Quality changes of pork longissimus dorsi with different frozen storage time[D]. Chengdu: Xihua University, 2018.
- [38] 刘文营, 王守伟, 王俊钢, 等. 天然活性物质在肉及肉制品脂肪氧化调控中的应用研究进展[J]. *中国食品学报*, 2019, 19(12): 293–303.
- LIU W Y, WANG S H, WANG J G, et al. Research progress of natural active substances applied in fat oxidation control of meat and meat products[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2019, 19(12): 293–303.
- [39] XIANG Q S, LIU X F, LI J G, et al. Influences of cold atmospheric plasma on microbial safety, physicochemical and sensorial qualities of meat products[J]. *Journal of Food Science & Technology*, 2018, 55(3): 846–857.
- [40] NIKIFOROV A, LI L, BRITUN N, et al. Influence of air diffusion on the OH radicals and atomic O distribution in an atmospheric Ar (bio)plasma jet[J]. *Plasma Sources Science and Technology* 2014, 23(1): 15015–15025.

### Effect of Gliding Arc Discharge Plasma Treatment on the Preservation Effect of Cold Fresh Pork

Zhai Guozhen<sup>1,3</sup>, Li Jia<sup>1,3</sup>, Guo Shanshan<sup>1,3</sup>, Ma Tingjun<sup>1,2</sup>, Sun Yunjin<sup>1,2\*</sup>, Jia Xiaoyun<sup>3</sup>, Cheng Xiaoyu<sup>3\*</sup>

(\*Beijing Laboratory for Food Quality and Safety, College of Food Science and Engineering,

Beijing University of Agriculture, Beijing 102206



<sup>2</sup>*Plasma Engineering Center, Capital Agricultural Product Safety Industrial Technology Institute,  
Beijing University of Agriculture, Beijing 102206*

<sup>3</sup>*Meat Research Center, Beijing 100068)*

**Abstract** In order to explore the storage and preservation effect of atmospheric plasma on cold fresh pork, effect of air, nitrogen and argon discharge plasma treatment on the quality and sanitation levels of cold fresh pork was investigated, including variations of quality indicators such as sensory evaluation, Red value, total number of colonies, volatile base nitrogen (TVB-N). The results showed that different discharge gas treatment enhanced the sensory evaluation and red value of pork. The total number of bacterial colonies and TVB-N test showed that gliding arc discharge treatment could prolong the storage life of pork, among which argon treatment was the best, and nitrogen and air discharge treatment promoted the fat oxidation of cold fresh pork, as consistent with the morphology results of plasma treated samples. These results showed that effect of atmospheric plasma treatment depends on the type of discharge gas species. Based on the index situation of comprehensive fresh-keeping quality, argon discharge plasma showed its owning advantages in improving water retention and sensory performance while reducing microorganisms on the surface of cold fresh pork, which would provide a new treatment method for the storage and preservation of cold fresh pork.

**Keywords** gliding arc discharge; storage and preservation; sensory evaluation; TVB-N