低温等离子体对甘蔗汁杀菌效果及品质的影响

邓伟丽[1]，吴佳敏[1]，黄惠梅[2]，陈杰博[1]，李敏玲[1]，王 璐[*1]

（1. 福建农林大学 国家甘蔗工程技术研究中心，福建 福州 350002；2. 福建农林大学 食品科学学院，福建 福州 350002；）

摘要：为探明低温等离子体灭菌工艺对甘蔗汁杀菌效果和品质的影响，以甘蔗汁杀菌率、多酚氧化酶酶活（PPO）、糖组分、总酚、游离氨基酸、颜色和 pH 为评价指标，研究其在不同电压和时间下的变化规律。结果表明，70 kV 处理 4 min 杀菌效果最佳，样品细菌杀菌率为 1.31 lg(N_0/N)，霉菌杀菌率为 2.34 lg(N_0/N)。处理 1 min 即可使 PPO 活性显著降低(P<0.05)。当电压升高到 50 kV 以上，蔗糖质量浓度在 1 min 内迅速降低，葡萄糖和果糖质量浓度则迅速升高。甘蔗汁总酚和游离氨基酸质量浓度均随处理时间的延长呈先下降后上升的变化趋势，但电压越高，处理后甘蔗汁的总酚质量浓度越高，游离氨基酸含量越少。60、70 kV 处理下甘蔗汁颜色变化比较明显(P<0.05)。pH 值随处理时间的延长而显著降低(P<0.05)，且电压越高下降速度越快。综合各项指标，40 kV 处理 4 min 的甘蔗汁品质较好，但灭菌效果较差，进一步延长处理时间可以获得更加安全、品质更高的甘蔗汁产品。

关键词：甘蔗汁；低温等离子体；杀菌效果；功能成分

中图分类号：TS 255.36　**文章编号：**1673-1689(2023)08-0077-10　**DOI：**10.3969/j.issn. 1673-1689.2023.08.010

Effects of Cold Plasma on Microbial Decontamination and Quality of Sugarcane Juice

DENG Weili[1]，*WU Jiamin*[1]，*HUANG Huimei*[2]，*CHEN Jiebo*[1]，*LI Minling*[1]，*WANG Lu*[*1]

(1. National Engineering Research Center of Sugarcane, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. College of Food Sciences, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: To investigate the influence of cold plasma technology on microbial decontamination and quality of sugarcane juice, the sterilizing rate, polyphenol oxidase (PPO), sugar composition, total phenolic content, free amino acid content, color and pH were selected as the evaluation indicators and the changes of these indicators at different electronic voltage and handling time were analyzed. The results showed that the highest bacteria sterilizing rate, 1.31 lg (N_0/N), and the mold sterilizing rate, 2.34 lg (N_0/N), were obtained in the juice treated at 70 kV, 4 min. The activity of PPO could be inhibited significantly after treated for 1 min (P<0.05). When the voltage was higher than 50 kV, the content of sucrose decreased rapidly in 1 min, while the content of glucose and fructose were

收稿日期：2021-06-21

基金项目：福建省科技厅科技计划项目（2023J01480）；福建省教育厅省中青年教师教育科研项目（JT180158）；国家甘蔗工程技术研发中心主任课题基金项目（NERD202231）。

*** 通信作者：**王 璐（1987—），女，博士，助理研究员，硕士研究生导师，主要从事农产品加工及贮藏方面研究。E-mail：wanglu@fafu.edu.cn

increased. The variation trends of total phenolic and free amino acid content decreased first and then increased along with the handling time. While the total phenolic content increased with the increase of electronic voltage, the free amino acid content decreased. The changes of color were significant when the electronic voltage was set at 60 kV and 70 kV (P<0.05). The pH decreased significantly during the cold plasma treatment (P<0.05), and the decrease speed under high voltage was greater than that under low voltage. Comprehensively, the juice treated under 40 kV, 4 min had the best quality, but the sterilizing efficiency was lower than that of the other treatments. In conclusion, prolong the handling time can obtain safer sugarcane juice with higher quality.

Keywords: sugarcane juice, cold plasma, microbial decontamination, functional ingredients

甘蔗汁营养丰富,口感清甜,长期以来深受人们的喜爱[1]。杀菌可有效延长产品的保质期,是甘蔗汁等饮料生产过程中的关键环节。生产上常用的灭菌方法有高温瞬时灭菌和巴氏灭菌,它们虽然能达到良好的灭菌效果,但会对甘蔗汁的色泽、风味、营养成分等造成不同程度的影响[2-3]。

近年来,低温等离子体技术作为一种新兴的冷杀菌技术在食品灭菌领域受到广泛关注[4]。在高压电场条件下,介质气体处于高度电离状态,即等离子体,其中含有的多种活性基团和粒子(如自由基、活性氧、紫外线、臭氧、氮氧化合物等)能破坏细胞结构,消灭微生物[5]。虽然等离子体内电子的温度很高,但离子与气体的温度接近常温,使得整个体系处于低温状态, 可以避免破坏食品中的热敏物质。因此与传统灭菌方法相比,低温等离子体技术具有温度低、时间短、效果好、无残留等优点。

目前,低温等离子体技术在食品方面的应用仍处于探索阶段,其大规模商业化应用和推广仍然需要大量的试验依据,国内外学者也开展了大量相关研究[6-7]。Tappi 等的研究表明,低温等离子体技术可以有效延长鲜切西瓜的保质期,而且对产品可滴定酸、可溶性固形物、颜色等理化特性没有显著影响[8]。Alves 等比较了巴氏灭菌和低温等离子体灭菌对美洲樱桃汁化学组分的影响,发现低温等离子技术能够最大限度保留产品原有的化学组分[9]。Bursac 等发现低温等离子体处理的石榴汁中花青素含量有所提高,且石榴汁颜色的变化与样品处理量和处理时间显著相关[10]。于弘慧等通过研究发现,经低温等离子体杀菌处理的梨汁多酚和维生素 C 的含量均比巴氏灭菌处理过的梨汁高[11]。上述研究充分证明了低温等离子技术在液体食品灭菌领域应用的可行性,然而目前对于产品品质的研究主要局限在可溶性固形物、多酚、抗氧化性等指标。甘蔗汁富含多种还原糖、氨基酸、多酚等营养物质,即使在低温灭菌条件下也会通过不同的反应途径发生褐变和风味改变,对甘蔗汁的感官品质有直接影响。对这些物质以及颜色、pH 等指标在低温等离子体处理过程中进行动态监测,有利于明晰甘蔗汁在低温等离子体杀菌过程中品质劣变的机理,指导生产实践中工艺的优化。

作者利用介质阻挡放电等离子体设备对甘蔗汁进行灭菌处理,探讨灭菌时间、电源电压对甘蔗汁的灭菌效果和品质的影响,为低温等离子技术在果蔬汁领域的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

供试甘蔗品种为雪蔗,收获于福建农林大学国家甘蔗工程技术研究中心试验基地,收获后立即进行清洗、分段和榨汁。所得甘蔗汁通过 0.07 mm 的滤网进行过滤后于-18 ℃冷冻储存。

4-叔丁基环己醇、没食子酸、乙醇等及平板计数培养基、马铃薯葡萄糖琼脂计数培养基:均购于阿拉丁生化科技有限公司; 氨基酸混合物标准品:购于日本和光纯药工业公司;HPLC 级甲醇: 购于 Sigma-Aldrich 公司。

1.2 仪器与设备

小型榨汁机: 中国浙江省永康食品机械厂产品;CTP-2000K 介质阻挡放电等离子体设备: 中国南京苏曼等离子体科技有限公司产品;LDZM-

80KCS-II 型高压灭菌锅：上海申安医疗机械厂产品；SCIENTZ-10 真空冷冻干燥机：中国宁波市森康生物技术有限公司产品；E2698 型高效液相色谱仪：美国 Waters 公司产品；Synergy HTX 型多功能酶标仪：美国 Biotech 公司产品；L-8900 氨基酸分析仪：日本日立公司产品；UV-1100B 型紫外-可见分光光度计：上海美谱达仪器有限公司产品；TG16.5 型高速离心机：上海卢湘仪离心机仪器有限公司产品；SW-CJ-2FD 型洁净工作台：苏州安泰空气技术有限公司产品；NH310 色差仪：中国深圳三恩时科技有限公司产品。

1.3 实验方法

1.3.1 低温等离子体处理 向两个电极之间的反应釜中添加 50 mL 甘蔗汁样品，在不同的电源电压（40、50、60、70 kV）和灭菌时间（1、2、3、4 min）对甘蔗汁进行灭菌处理，处理后的甘蔗汁立即进行微生物检测，并将样品于-18 ℃储藏等待品质指标检测，未进行低温等离子体灭菌处理的新鲜甘蔗汁作为空白对照。

1.3.2 微生物指标的测定 根据食品安全国家标准 GB4789.2—2016《食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定》和 GB4789.1—2016《食品安全国家标准 食品微生物学检验 霉菌和酵母计数》进行甘蔗汁微生物指标的测定[12]。每组设置 2 个稀释梯度，分别吸取 1 mL 样品液于平板计数琼脂（plate count agar，PCA）培养基和马铃薯葡萄糖琼脂（potato dextrose agar，PDA）培养基上，涂布均匀。PCA 平板在 37 ℃培养 48 h，PDA 平板在 28 ℃培养 5 d。分别用于计数细菌菌落总数和霉菌菌落总数。杀菌率以 lg（N_0/N）表示，N_0 表示处理前甘蔗汁中菌落数，N 表示处理后甘蔗汁中菌落数。

1.3.3 多酚氧化酶活性的测定 多酚氧化酶活性的测定参考 Mao 等所述方法[13]，并稍做修改。将 25 μL 甘蔗汁添加到 150 μL 用磷酸盐缓冲液（pH 6.5）定容的 0.07 mol/L 邻苯二酚溶液中，用酶标仪每隔 1 min 在 420 nm 处测量吸光度。单位活性 U 定义为 $0.001\Delta A_{420}$/min。

1.3.4 蔗糖、葡萄糖、果糖的测定 蔗糖、葡萄糖、果糖的测定采用高效液相色谱法[14]，选取示差折光检测器进行检测。先将甘蔗汁样品在 10 000 r/min 离心 10 min，取上清液进行检测。色谱条件：进样量 10 μL，Waters SugarPak 色谱柱（6.5 mm×300 mm，10 μm），柱温 65 ℃，流动相为超纯水，流量 4 mL/min。通过比对标准品的保留时间和建立标准曲线来进行糖类物质的定性和定量分析。

1.3.5 总酚的测定 采用福林-酚法进行总酚检测[15]。取 25 mL 样品，在-20 ℃下真空干燥 24 h 后溶解于 25 mL 体积分数 75%的乙醇中，以 10 000 r/min 的速度离心 10 min。取上清液 1 mL，加入 5 mL 质量分数为 10%的福林酚溶液和 4 mL 质量分数 7.5%的碳酸钠溶液，加水定容至 25 mL。室温下放置 60 min，测定其在 765 nm 波长下的吸光度。以不同质量浓度的没食子酸作标准曲线，结果以每毫升甘蔗汁样品中含有的没食子酸质量表示。

1.3.6 游离氨基酸的测定 按照 Yang 等提出的方法[16]，使用氨基酸分析仪检测游离氨基酸。甘蔗汁样品用等体积的质量分数 10%磺基水杨酸在 4 ℃下沉淀 2 h，然后以 10 000 r/min 离心 10 min，取上清液进行检测，进样量为 20 μL。通过比对标准品色谱峰进行定性分析，建立标准曲线并对单个氨基酸进行定量分析。

1.3.7 颜色及 pH 的测定 分别使用色差仪和 pH 计进行甘蔗汁颜色及 pH 的测定。颜色值表示为 L^*（白/暗），a^*（红色度/绿色度），和 b^*（黄色度/蓝色度）。低温等离子体处理前后甘蔗汁的色差根据下式计算：

$$\Delta E=\sqrt{(L^*-L_0)^2+(a^*-a_0)^2+(b^*-b_0)^2}$$

式中：ΔE 为色差；L^*、a^*、b^* 表示检测样品的颜色值；L_0、a_0、b_0 表示未处理的颜色值。

根据 ΔE 的大小，可以将不同处理后甘蔗汁的色差变化描述为不明显（$\Delta E\leqslant 0.5$），轻微明显（$0.5<\Delta E\leqslant 1.5$），明显（$1.5<\Delta E\leqslant 3.0$），较显著（$3.0<\Delta E\leqslant 6.0$）和显著（$6.0<\Delta E\leqslant 12.0$）。

1.4 数据分析

数据结果表示为平均值±标准差。采用 Office Excel 和 JMP 10.0 进行数据统计分析，基于 Turkey's HSD 检验进行均值比较分析，显著性水平取 $P<0.05$。

2 结果与分析

2.1 低温等离子体处理对甘蔗汁杀菌灭酶效果的影响

2.1.1 杀菌效果 低温等离子体处理对杀菌率的影响见图 1，低温等离子体处理对甘蔗汁细菌和霉菌杀菌率均随着灭菌时间的延长而增加。当处理时

间小于 3 min，电压对细菌杀菌率的影响不显著(P>0.05)，70 kV 处理 4 min 的样品细菌杀菌率达到 1.31 lg(N_0/N)，显著高于其他电压下的样品(P<0.05)。不同电压下的霉菌杀菌率却存在显著差异(P<0.05)，电压越高霉菌杀菌率越高，最高可达 2.34 lg(N_0/N)。低温等离子体杀菌技术利用活性氧、活性氮、带电粒子、紫外光子等破坏细胞结构来杀灭微生物[17]。在较短的处理时间内设备释放的等离子体活性成分较少，随着电压和时间的增加，等离子体的活性成分增加，从而达到更好灭菌效果。根据《食品安全国家标准 饮料》[18]中的规定，要求果汁饮料中的菌落总数≤100 CFU/mL，霉菌≤20 CFU/mL，本实验中仅 70 kV，4 min 处理的样品菌落总数(82±6) CFU/mL，霉菌(4±1) CFU/mL，达到了标准要求。

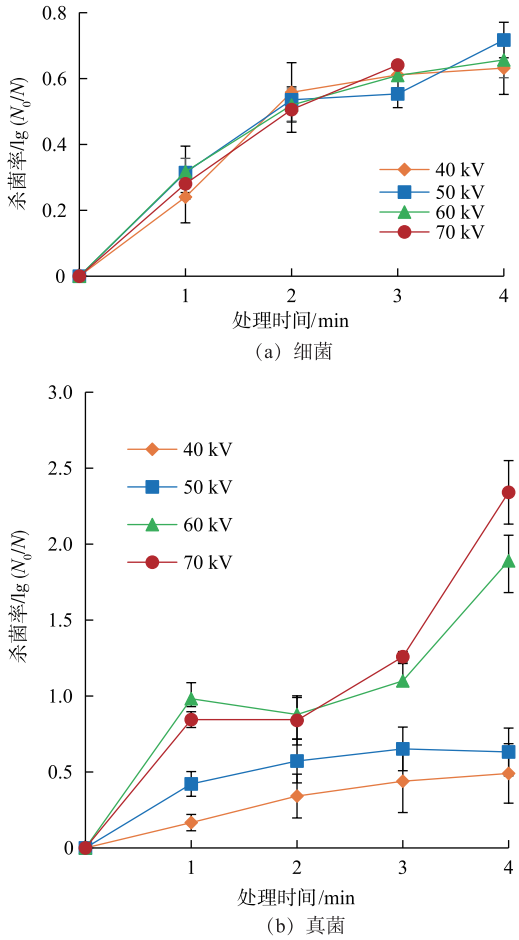


图 1　低温等离子体处理对甘蔗汁杀菌效果的影响

Fig. 1　Effects of cold plasma on microbial decontamination of sugarcane juice

2.1.2　多酚氧化酶活性　多酚氧化酶(PPO)能催化甘蔗汁中内源性多酚物质氧化生成黑色素，导致甘蔗汁褐变。图 2 为甘蔗汁在低温等离子体处理过程中 PPO 活性的变化，从图 2 可看出低温等离子体处理 1 min 即可使甘蔗汁 PPO 活性显著降低(P<0.05)，但随着灭菌时间的增加，其 PPO 活性在低电压下略微升高，在高电压下基本不变。本实验结果表明低温等离子体处理可以在短时间内对甘蔗汁中 PPO 的活性达到一定的抑制效果，与 Surowsky 等基于食品模拟体系的低温等离子体处理 PPO 灭活实验结果一致[19]。这可能是由于低温等离子体处理会使蛋白质氨基酸侧链结构发生改变、α-螺旋结构减少，酶活降低[21-22]。

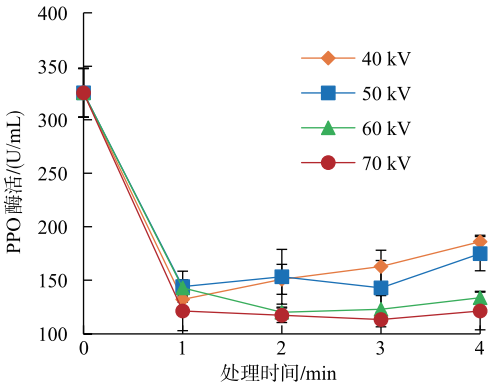


图 2　低温等离子体处理对甘蔗汁多酚氧化酶(PPO)酶活的影响

Fig. 2　Effects of cold plasma on polyphenol oxidase (PPO) activity of sugarcane juice

2.2　低温等离子体处理对甘蔗汁品质的影响

2.2.1　蔗糖、葡萄糖、果糖　糖是甘蔗汁中水以外质量浓度最高的物质，对甘蔗汁的风味有重要影响。图 3 为不同灭菌参数对糖类变化的影响。在 40 kV 下，蔗糖、葡萄糖、果糖质量浓度基本不变。当电压升高到 50 kV 以上时，蔗糖质量浓度在 1 min 内迅速降低，葡萄糖和果糖质量浓度也在 1 min 内迅速升高，1 min 后各糖组分质量浓度没有明显变化(P>0.05)。3 种糖类物质在低温等离子体处理前期的变化，可能是蔗糖在高电压条件下发生水解生成葡萄糖和果糖所致。此外，李娅楠等在分析苹果糖酸组分时认为，各糖组分的甜度有所不同，果糖的甜度值最高(1.75)，蔗糖次之(1.0)，葡萄糖最低(0.75)[22]。可见，低温等离子体处理过程中糖类的变化对甘蔗汁甜度有直接影响，尤其在高电压条件下，果糖和葡萄糖的大量增加可提高甘蔗汁的甜度。

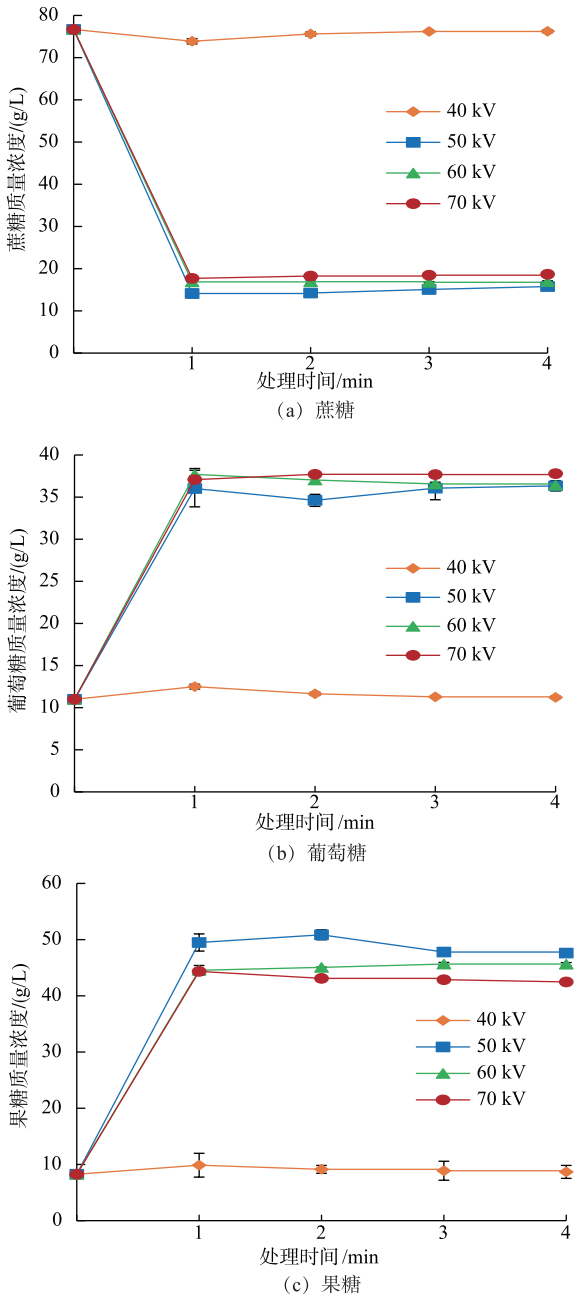


图 3　低温等离子体处理对甘蔗汁、蔗糖、葡萄糖、果糖质量浓度的影响

Fig. 3　Effects of cold plasma on contents of sucrose, glycose and fructose of sugarcane juice

2.2.2　总酚　由图 4 可见,低温等离子体处理使得甘蔗汁总酚含量呈先降低后升高趋势，灭菌 1 min 后,随着灭菌时间的增加,总酚质量浓度增加。电压对总酚质量浓度也有明显影响(P<0.05),电压越高,总酚质量浓度越高。由于甘蔗汁在低温等离子处理过程中 PPO 的活性没有被完全抑制,所以酶促褐变反应的发生可能会导致多酚物质的消耗。酸樱桃汁在低温等离子处理过程中总酚质量浓度呈现下降趋势[23],这可能是酚类物质与等离子体中的活性氧、自由基等基团发生反应导致的。而在 Herceg 等的研究中,低温等离子体处理使石榴汁中的总酚含量提高了 33.03%[24],这是因为在水果中部分酚类物质是以共价键结合在植物基质中的,低温等离子体处理会破坏这种共价键,使更多酚类物质被释放出来[25]。基于上述分析,本实验中甘蔗汁总酚含量的变化趋势,可能是酶促褐变、多酚抗氧化和共价键断裂共同作用的结果。低温等离子体处理前期可能主要发生酶促褐变反应和自由基的清除,中后期则主要发生共价键的断裂,且电压越高,共价键断裂的越多,总酚质量浓度越高。

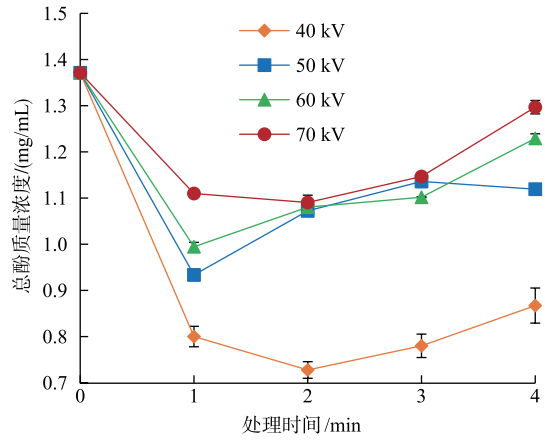


图 4　低温等离子体处理对甘蔗汁总酚的影响

Fig. 4　Effects of cold plasma on total phenolic of sugarcane juice

2.2.3　游离氨基酸　低温等离子体处理对甘蔗汁中游离氨基酸的影响见表 1。作者共检测到 32 种游离氨基酸,表 1 中仅展示了质量浓度高于5 mg/L 的 17 种氨基酸。在未处理甘蔗汁（0 kV,0 min）中,氨基酸总质量浓度高达 904 mg/L,质量浓度最高的氨基酸为天门冬氨酸(194.03 mg/L),其次为丝氨酸(99.67 g/mL)和丙氨酸(94.22 g/mL)。天门冬氨酸呈鲜味,丝氨酸和丙氨酸主要呈甜味[26],对甘蔗汁良好的风味起到了重要作用。所有氨基酸在处理过程中均发生了显著变化(P<0.05)。如图 5,除谷氨酸外,其他游离氨基酸在低温等离子处理过程中的变化趋势与总游离氨基酸质量浓度一样:先降低,在 2 min 时达到最低值，随后再随着处理时间的延长而

升高,且电压越大,游离氨基酸质量浓度越少($P<0.05$)。有研究表明,低温等离子体处理过程中释放的活性氧自由基可以使肽键断裂、氨基酸侧链氧化[27],进而影响氨基酸的质量浓度。氨基酸是美拉德反应的重要前体物质,Yu 等认为在低温等离子体处理过程中会发生美拉德反应,消耗大量游离氨基酸[28]。因此,氨基酸含量变化与蛋白质和氨基酸在低温等离子体处理过程中发生的复杂化学反应相关。甘蔗汁在低温等离子体处理前期(2 min 前)主要发生氨基酸侧链氧化和美拉德反应,导致氨基酸减少,随后由于肽键逐渐断裂和蛋白质水解,氨基酸质量浓度有所回升。电压对氨基酸质量浓度也有影响,Luo 等在研究肌纤维蛋白在低温等离子体处理过程中的变化时发现,低电压下游离氨基酸会因蛋白质的聚合而减少,而高电压会加速蛋白质的降解,使游离氨基酸含量增加[29]。

未处理甘蔗汁中的谷氨酸质量浓度明显低于低温等离子体处理的样品($P<0.05$),在 40 kV 处理 2 min 时质量浓度最高(53.43 mg/L)。在 50、60、70 kV 条件下,谷氨酸质量浓度随着处理时间的延长而显著增加($P<0.05$),且在相同处理时间下,电压对谷氨酸质量浓度影响不显著($P>0.05$)。谷氨酸是重要的鲜味氨基酸,其质量浓度的变化对甘蔗汁风味存在一定的影响,但其变化机理有待进一步研究。

表 1　低温等离子体处理对甘蔗汁游离氨基酸质量浓度的影响

Table 1　Effects of cold plasma on content of free amino acids of sugarcane juice

电压/kV	时间/min	质量浓度/(mg/L)					
		磷酸丝氨酸	天门冬氨酸	苏氨酸	丝氨酸	谷氨酸	丙氨酸
0	0	39.02±1.97^{bcde}	194.03±19.15^{b}	38.17±7.35^{a}	99.67±19.01^{a}	15.19±0.54^{h}	94.22±17.43^{a}
40	1	45.88±0.43^{ab}	179.52±0.87bc	27.53±0.33^{bc}	62.83±0.85^{bc}	36.25±0.26^{bcde}	65.89±1.03^{bc}
	2	35.87±1.44^{cdefg}	148.4±31.23^{def}	18.11±0.28^{efgh}	41.88±1.68^{e}	29.44±5.89^{fg}	53.34±0.16^{bcdef}
	3	41.08±3.69^{bc}	224.48±7.42^{b}	24.87±1.35^{bcd}	59.25±3.18^{bcd}	53.43±0.90^{b}	58.82±2.93^{bcdef}
	4	54.12±8.55^{a}	162.27±26.43^{cde}	28.08±5.04^{b}	65.47±11.69^{b}	24.93±1.79^{g}	64.94±11.18^{bcd}
50	1	41.42±0.99^{bc}	122.58±7.02^{fgh}	23.58±0.81^{bcde}	66.01±2.19^{b}	32.44±3.54^{ef}	68.54±2.36^{b}
	2	37.29±2.47^{bcdef}	104.28±3.26^{h}	21.19±0.50^{cdefg}	59.21±1.14^{bcd}	33.25±1.52^{ef}	61.70±0.91^{bcde}
	3	39.94±0.26^{bcd}	125.83±3.50^{fgh}	22.46±0.33^{bcedf}	62.85±0.61^{bc}	36.86±1.85^{bcde}	65.64±0.54^{bc}
	4	45.59±9.83^{ab}	140.01±0.71^{efg}	23.92±0.48^{bcde}	66.33±1.09^{b}	41.88±0.72^{b}	68.96±1.12^{b}
60	1	32.48±0.73^{cdefg}	135.82±0.9^{efg}	18.11±0.15^{efgh}	61.07±0.14^{bcd}	32.54±0.24^{ef}	49.25±0.16^{efg}
	2	29.12±0.33^{efg}	125.64±1.46^{fgh}	16.37±0.12^{fgh}	55.01±0.23^{bcde}	32.00±0.43^{ef}	44.41±0.24^{fg}
	3	33.75±2.60^{cdefg}	142.31±1.75^{efg}	18.30±0.10^{defgh}	60.87±0.42^{bcd}	33.93±0.93^{cdef}	49.10±0.43^{efg}
	4	29.98±1.46^{defg}	170.88±16.34^{bcd}	19.63±0.33^{defgh}	65.87±1.69^{b}	40.10±4.32^{bc}	52.46±1.02^{cdefg}
70	1	26.58±0.46^{g}	104.08±0.61^{h}	13.96±0.08^{h}	47.08±0.34^{cde}	31.62±0.16^{ef}	44.30±0.25^{fg}
	2	25.54±0.08^{g}	101.03±0.85^{h}	13.18±0.02^{h}	44.21±0.05^{de}	33.54±0.46^{def}	41.72±0.06^{g}
	3	26.09±0.76^{g}	115.12±1.83^{gh}	14.77±0.11^{gh}	49.51±0.42^{bcde}	37.96±0.69^{bcde}	46.52±0.39^{efg}
	4	27.28±0.72^{fg}	124.62±1.16^{fgh}	15.77±0.12^{fgh}	52.94±0.39^{bcde}	39.97±0.35^{bcd}	49.69±0.31^{edfg}
电压/kV	时间/min	质量浓度/(mg/L)					
		缬氨酸	蛋氨酸	异亮氨酸	亮氨酸	酪氨酸	苯丙氨酸
0	0	63.81±11.69^{a}	11.37±1.69^{a}	34.56±6.14^{a}	36.48±6.61^{a}	21.31±3.7^{a}	27.23±4.78^{a}
40	1	46.42±0.95^{b}	8.71±0.14^{b}	28.14±0.41^{b}	28.85±0.37^{b}	18.03±0.42^{ab}	27.07±0.19^{a}
	2	39.77±1.21^{bcde}	5.24±1.75^{cde}	18.46±1.27^{defg}	18.90±1.09^{defgh}	11.35±2.57^{d}	17.20±3.82^{bcd}
	3	41.83±2.54^{bcd}	4.26±0.17^{def}	23.11±1.26^{bcd}	24.06±1.37^{bcd}	11.46±0.67^{d}	17.64±1.04^{bc}
	4	43.99±6.18^{bc}	7.38±1.08^{bc}	25.74±4.46^{bc}	26.65±4.66^{bc}	15.68±2.70^{bc}	21.31±3.28^{b}
50	1	36.40±1.50^{bcdefg}	6.82±0.17^{bc}	19.81±0.69^{de}	20.83±0.75^{cdef}	12.31±0.55^{cd}	14.90±0.22^{cde}
	2	33.00±1.08^{defghi}	5.92±0.08^{cde}	17.95±0.32^{defg}	18.90±0.40^{defgh}	11.32±0.16^{d}	13.88±0.38^{cdef}
	3	35.59±0.45^{cdefgh}	6.36±0.01^{cd}	18.91±0.20^{def}	20.05±0.21^{defg}	11.63±0.09^{d}	14.17±0.63^{cdef}
	4	37.36±0.74^{bcdef}	7.07±0.35^{bc}	19.97±0.40^{cde}	21.18±0.39^{cde}	12.37±0.30^{cd}	14.20±0.71^{cdef}

续表 1

电压/kV	时间/min	质量浓度/(mg/L)					
		缬氨酸	蛋氨酸	异亮氨酸	亮氨酸	酪氨酸	苯丙氨酸
60	1	30.10±0.69^{efghij}	4.5±0.04^{deg}	16.62±0.08^{efgh}	16.17±0.16^{efghi}	10.29±0.27^{de}	13.60±0.30^{cdef}
	2	27.13±0.63^{ghij}	3.75±0.09^{efg}	15.09±0.04^{efgh}	14.63±0.05^{ghi}	9.14±0.14^{def}	12.27±0.24^{def}
	3	29.93±0.34^{efghij}	4.16±0.29^{ef}	16.71±0.01^{efgh}	16.33±0.02^{efghi}	10.30±0.02^{de}	13.43±0.12^{cdef}
	4	32.43±0.51^{defghij}	3.99±1.04^{efg}	17.48±0.20^{defgh}	17.25±0.22^{efghi}	9.35±0.95^{def}	12.86±0.97^{cdef}
70	1	24.32±0.15^{ij}	1.99±0.13^{gh}	12.75±0.05^{gh}	13.26±0.01^{hi}	6.67±0.08^{ef}	10.14±0.19^{ef}
	2	22.65±0.26^{j}	1.42±0.19^{h}	11.85±0.10^{h}	12.38±0.08^{i}	6.10±0.09^{f}	9.50±0.05^{f}
	3	25.59±0.20^{hij}	2.70±0.10^{fgh}	13.36±0.18^{fgh}	13.86±0.14^{hi}	6.90±0.07^{ef}	9.96±0.09^{ef}
	4	27.49±0.14^{fghij}	3.05±0.02^{fgh}	14.2±0.09^{efgh}	14.76±0.12^{fghi}	7.27±0.12^{ef}	10.53±0.13^{ef}
电压/kV	时间/min	质量浓度/(mg/L)					
		γ-氨基丁酸	赖氨酸	组氨酸	精氨酸	脯氨酸	总氨基酸
0	0	50.49±8.05^{a}	28.37±5.02^{a}	20.30±3.96^{a}	45.29±9.85^{a}	13.33±1.34^{b}	840.95±65.57^{a}
40	1	37.08±2.00^{b}	21.06±0.32^{b}	13.53±0.09^{bc}	29.84±0.73^{b}	18.3±1.07^{a}	701.08±6.83^{b}
	2	25.20±0.43^{defg}	13.39±1.15^{cde}	8.51±0.58^{defgh}	18.26±0.21^{cd}	6.96±1.91^{def}	509.30±3.63^{def}
	3	34.32±1.64^{bc}	17.16±1.01^{bc}	11.33±0.72^{bcd}	25.11±1.55^{bc}	7.45±0.73^{cde}	684.93±32.18^{b}
	4	35.55±5.43^{bc}	21.44±3.82^{b}	14.79±2.63^{b}	33.76±7.95^{b}	10.36±2.67^{bc}	662.54±63.65^{bc}
50	1	28.92±0.54^{cde}	15.37±0.32^{cd}	10.68±0.21^{cde}	16.11±0.95^{cd}	7.04±1.39^{cdef}	548.65±22.31^{cde}
	2	26.39±0.73^{def}	13.74±0.43^{cde}	9.39±0.43^{defg}	13.57±0.51^{d}	5.37±0.19^{efgh}	490.81±14.27^{defg}
	3	28.58±0.28^{cde}	13.75±1.24^{cde}	9.44±0.39^{defg}	14.72±0.58^{d}	6.21±0.14^{defg}	537.76±8.37^{de}
	4	30.04±0.74^{bcd}	15.53±0.47^{cd}	10.49±0.29^{cdef}	17.54±2.91^{cd}	9.16±0.56^{cd}	586.72±13.93^{bcd}
60	1	19.35±0.41^{fgh}	11.80±0.17^{def}	8.47±0.09^{defgh}	13.17±0.05^{d}	3.93±1.08^{fgh}	481.34±2.67^{defg}
	2	16.76±0.57^{h}	10.77±0.10^{def}	7.51±0.05^{efgh}	11.60±0.04^{d}	2.73±0.29^{h}	437.67±4.47^{efg}
	3	19.19±1.22^{fgh}	12.12±0.36^{def}	8.45±0.46^{defgh}	13.23±0.28^{d}	3.24±0.44^{gh}	489.52±1.48^{defg}
	4	21.62±0.30^{efgh}	12.15±0.58^{def}	8.45±0.44^{defgh}	14.55±0.33^{d}	4.74±1.42^{efgh}	537.87±20.83^{de}
70	1	18.81±0.22^{gh}	9.14±0.07^{ef}	6.13±0.17^{gh}	9.59±0.13^{d}	4.30±0.70^{efgh}	387.82±2.74^{fg}
	2	15.87±0.04^{h}	8.40±0.04^{f}	5.64±0.03^{h}	8.81±0.07^{d}	4.29±0.03^{efgh}	368.97±0.95^{g}
	3	17.81±0.15^{gh}	9.40±0.04^{ef}	6.32±0.01^{gh}	9.80±0.09^{d}	4.14±0.14^{efgh}	412.98±3.97^{fg}
	4	19.78±0.10^{fgh}	10.17±0.15^{ef}	6.89±0.15^{fgh}	10.62±0.09^{d}	4.79±0.18^{efgh}	443.21±3.56^{efg}

注:结果表示为平均值±标准差,同列不同小写字母表示不同处理之间差异显著(P<0.05)。

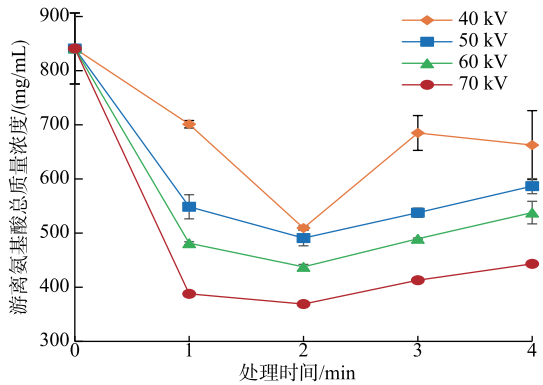


图 5 低温等离子处理对甘蔗汁氨基酸总质量浓度的影响

Fig. 5 Effects of cold plasma on total content of free amino acids of sugarcane juice

2.2.4 颜色及 pH 值 低温等离子处理对甘蔗汁颜色和 pH 值的影响如图 6 所示。分别采用 L^*,a^* 和 b^* 描述甘蔗汁的暗度、红/绿值和黄/蓝值。在 40 kV 处理下甘蔗汁各颜色指标变化均不明显(P>0.05);50 kV 处理下仅 a^* 值有所升高;而 60、70 kV 处理下甘蔗汁 a^* 值和 b^* 值均明显随着处理时间的延长而增大(P<0.05),L 值则减少(P<0.05),颜色明显朝着褐色方向变化。甘蔗汁的褐变进一步证明了低温等离子处理过程中会发生美拉德反应和酶促褐变反应。

40 kV 处理的甘蔗汁其色差值 ΔE<0.5,进一步说明其颜色与未处理的甘蔗汁相比没有显著变化,

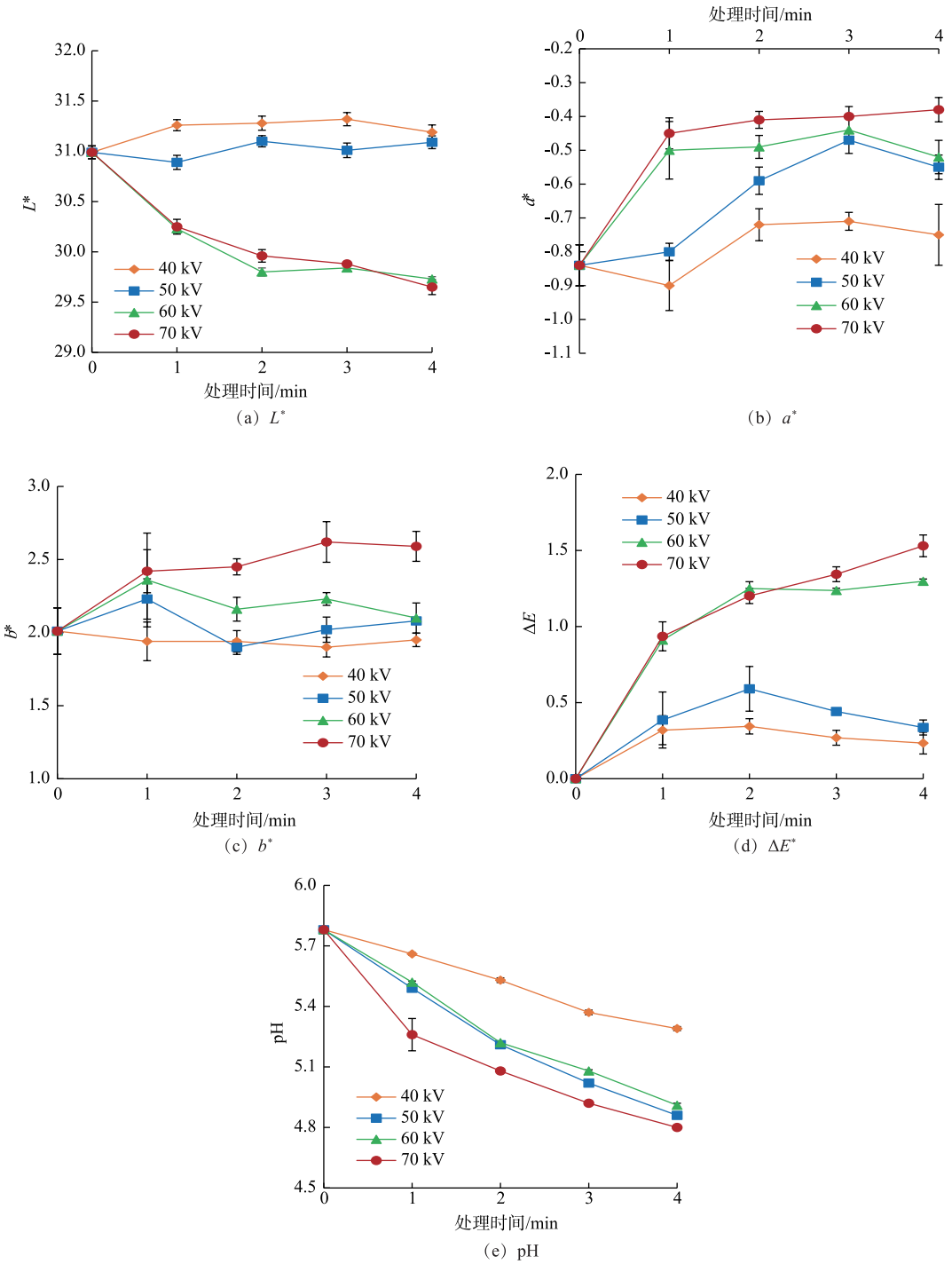


图 6　低温等离子体处理对甘蔗汁颜色 L^*、a^*、b^*、ΔE 和 pH 的影响

Fig. 6　Effects of cold plasma on color L^*, a^*, b^*, ΔE and pH of sugarcane juice

除 70 kV 处理 4 min 的甘蔗汁 ΔE 大于 1.5,颜色具有明显变化，其他条件下的甘蔗汁 ΔE 均小于 1.5，表明颜色仅发生轻微变化。而现有研究中采用高温瞬时灭菌工艺生产的黄瓜汁和石榴汁的 ΔE 均高于 2.3[30],可见低温等离子体处理在维持果汁颜色品质方面具有很大优势。

如图 6(e),甘蔗汁 pH 值在低温等离子处理过程中呈下降趋势,这个结果与苹果汁[25]、橙汁[31]相同。同一处理时间下,电压越高,pH 值值越低。对于 pH 的降低，一种解释是低温等离子体处理过程中

产生的氮氧化合物会进一步生成硝酸或亚硝酸而引起样品的酸化[32]，另一种解释是水或其他物质在低温等离子体处理过程中电离出的 H^+会降低样品的 pH[33]。Rodrigues 等则认为有机酸含量的增加是导致低温等离子体处理过的橙汁 pH 值下降的主要原因[34]。

3 结 语

低温等离子体能够快速、有效地消灭甘蔗汁中的细菌和霉菌，对 PPO 活性也有一定抑制作用，但仅 70 kV，处理 4 min 的样品符合国家标准对果汁饮料的微生物限量要求。在 40 kV 下，蔗糖、葡萄糖、果糖质量浓度基本不变。当电压升高到 50 kV 以上，蔗糖质量浓度迅速降低，葡萄糖和果糖质量浓度迅速升高，1 min 后蔗糖和葡萄糖质量浓度没有明显变化，而果糖质量浓度有所减少。甘蔗汁总酚质量浓度和游离氨基酸质量浓度均随着处理时间呈先下降后上升的变化趋势，在处理 4 min 后两者质量浓度最接近未处理组的样品。总酚质量浓度随着电压的升高而升高，游离氨基酸则减少。60、70 kV 处理下甘蔗汁颜色有明显褐变。pH 值在低温等离子处理过程中呈下降趋势，且电压越高pH 值降低速度越快。综上所述，在 40 kV 处理 4 min 的甘蔗汁具有良好的品质，但其灭菌效果较差，进一步延长处理时间可以获得更加安全、品质更高的甘蔗汁产品。低温等离子体应用于甘蔗汁的杀菌，能得到良好的杀菌效果，并且可以很大程度保留甘蔗汁的营养物质和感官风味，具有广阔的应用前景。

参考文献：

[1] WANG L，WANG P，DENG W，et al. Evaluation of aroma characteristics of sugarcane （*Saccharum officinarum* L.） juice using gas chromatography-mass spectrometry and electronic nose[J]. **LWT–Food Science and Technology**，2019，108：400-406.

[2] WANG L，DENG W，WANG P，et al. Comparative analyses of three sterilization processes on volatile compounds in sugarcane juice[J]. **Transactions of the ASABE**，2019，62(6)：1689-1696.

[3] WANG L，DENG W，WANG P，et al. Degradations of aroma characteristics and changes of aroma related compounds，PPO activity，and antioxidant capacity in sugarcane juice during thermal process[J]. **Journal of Food Science**，2020，85(4)：1140-1150.

[4] CHIZOBA E F G，SUN D W，CHENG J H. A review on recent advances in cold plasma technology for the food industry：current applications and future trends[J]. **Trends in Food Science and Technology**，2017，69：46-58.

[5] 王卓，周丹丹，彭菁，等. 低温等离子体对蓝莓果实的杀菌效果及对其品质的影响[J]. 食品科学，2018，39(15)：101-107.

[6] 张志伟. 常压低温等离子体对鲜切胡萝卜表面金黄色葡萄球菌的杀菌效果及品质影响[J]. 粮油食品科技，2018，26(3)：50-55.

[7] MANDAL R，SINGH A，PRATAP S A. Recent developments in cold plasma decontamination technology in the food industry[J]. **Trends in Food Science and Technology**，2018，80(2)：93-103.

[8] TAPPI S，GOZZI G，VANNINI L，et al. Cold plasma treatment for fresh-cut melon stabilization[J]. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**，2016，33：225-233.

[9] ALVES F E G，SILVA L M A，DE BRITO E S，et al. Evaluation of thermal and non-thermal processing effect on non- prebiotic and prebiotic acerola juices using 1H qNMR and GC-MS coupled to chemometrics[J]. **Food Chemistry**，2018，265：23-31.

[10] BURSAC K D，PUTNIK P，DRAGOVIC-UZELAC V，et al. Effects of cold atmospheric gas phase plasma on anthocyanins and color in pomegranate juice[J]. **Food Chemistry**，2016，190：317-323.

[11] 于弘慧，马挺军，孙运金，等. 低温等离子体杀菌工艺的优化及其对梨汁品质和抗氧化活性的影响[J]. 食品工业科技，2018，39(9)：212-217.

[12] 中华人民共和国国家和计划生育委员会，国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定：GB4789.2—2016[S]. 北京：中国标准出版社，2016.

[13] MAO L C，XU Y Q，QUE F. Maintaining the quality of sugarcane juice with blanching and ascorbic acid[J]. **Food Chemistry**，2007，104(2)：740-745.

[14] 林月绪，张华，陈如凯. HPLC-RID 测定甘蔗茎节蔗糖、葡萄糖和果糖含量[J]. 福建农林大学学报(自然科学版)，2015，44(3)：232-235.

[15] KADAM U S，GHOSH S B，DE S，et al. Antioxidant activity in sugarcane juice and its protective role against radiation induced

DNA damage[J]. **Food Chemistry**,2008,106(3):1154-1160.
[16] YANG Y,XIA Y,WANG G,et al. Effects of boiling,ultra-high temperature and high hydrostatic pressure on free amino acids, flavor characteristics and sensory profiles in Chinese rice wine[J]. **Food Chemistry**,2019,275:407-416.
[17] 章建浩,黄明明,王佳媚,等. 低温等离子体冷杀菌关键技术装备研究进展[J]. 食品科学技术学报,2018,36(4):8-16.
[18] 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 饮料:GB7101—2015[S]. 北京:中国标准出版社,2015.
[19] SUROWSKY B,FISCHER A,SCHLUETER O,et al. Cold plasma effects on enzyme activity in a model food system [J]. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**,2013,19:146-152.
[20] PANKAJ S K,MISRA N N,CULLEN P J. Kinetics of tomato peroxidase inactivation by atmospheric pressure cold plasma based on dielectric barrier discharge[J]. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**,2013,19:153-157.
[21] TAKAI E,KITANO K,KUWABARA J,et al. Protein inactivation by low-temperature atmospheric pressure plasma in aqueous solution[J]. **Plasma Processes and Polymers**,2012,9(1):77-82.
[22] 李娅楠,闫雷玉,张波,等. 不同苹果品种果实糖酸组分特征研究[J]. 果树学报,2021,38(11):1877-1889.
[23] ELEZ G I,REZEK J A,MILOSEVIC S,et al. The effect of gas phase plasma treatment on the anthocyanin and phenolic acid content of sour cherry Marasca(*Prunus cerasus var.* Marasca) juice[J]. **LWT–Food Science and Technology**,2015,62(1):894-900.
[24] HERCEG Z,KOVACEVIC D B,KLJUSURIC J G,et al. Gas phase plasma impact on phenolic compounds in pomegranate juice [J]. **Food Chemistry**,2016,190:665-672.
[25] XIANG Q,LIU X,LI J,et al. Effects of dielectric barrier discharge plasma on the inactivation of *Zygosaccharomyces rouxii* and quality of apple juice[J]. **Food Chemistry**,2018,254(136):201-207.
[26] 牛丽影,刘春菊,李大婧,等. 高温灭菌过程中三种鲜食玉米汁游离糖与氨基酸含量变化的比较[J]. 现代食品科技,2019,35(2):47-54.
[27] SUROWSKY B,FROHLING A,GOTTSCHALK N,et al. Impact of cold plasma on *Citrobacter freundii* in apple juice: inactivation kinetics and mechanisms[J]. **International Journal of Food Microbiology**,2014,174:63-71.
[28] YU J J,JI H,CHEN Y,et al. Analysis of the glycosylation products of peanut protein and lactose by cold plasma treatment: Solubility and structural characteristics[J]. **International Journal of Biological Macromolecules**,2020,158:1194-1203.
[29] LUO J,MUHAMMAD N M,YAN W,et al. Effects of dielectric barrier discharge cold plasma treatment on the structure and binding capacity of aroma compounds of myofibrillar proteins from dry-cured bacon[J]. **LWT–Food Science and Technology**, 2020,117:1-7.
[30] LIU F,ZHANG X,ZHAO L,et al. Potential of high-pressure processing and high-temperature/short-time thermal processing on microbial,physicochemical and sensory assurance of clear cucumber juice[J]. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**,2016,34:51-58.
[31] XU L,GARNER A L,TAO B,et al. Microbial inactivation and quality changes in orange juice treated by high voltage atmospheric cold plasma[J]. **Food and Bioprocess Technology**,2017,10(10):1778-1791.
[32] STOFFELS E,SAKIYAMA Y,GRAVES D B. Cold atmospheric plasma:charged species and their interactions with cells and tissues[J]. **IEEE Transactions on Plasma Science**,2008,36(4):1441-1457.
[33] KORACHI M,GUROL C,ASLAN N. Atmospheric plasma discharge sterilization effects on whole cell fatty acid profiles of *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus*[J]. **Journal of Electrostatics**,2010,68(6):508-512.
[34] RODRIGUES S,BOURKE P,CULLEN P J,et al. Fructooligosaccharides integrity after atmospheric cold plasma and high-pressure processing of a functional orange juice[J]. **Food Research International**,2017,102:282-290.