

低温等离子体处理减轻采后香蕉果实冷害作用的研究

陈姝伊¹, 曾筠婷^{1,+}, 袁洋², 仲崇山^{1,*}, 曹建康², 孔令昊¹, 应花梅¹

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083;

2. 中国农业大学食品科学与营养工程学院, 北京 100083)

摘要:研究了低温等离子体单独处理(Cold plasma treatment, CPT)和结合加湿处理(RH 90%)减轻香蕉果实冷害效果。采用峰-峰值电压 20 kV, 频率 5 kHz 介质阻挡(DBD)等离子体放电, 每隔 24 h 对 6 ℃ 低温环境下的香蕉果实贮藏环境中的气体循环处理 1 min, 定期取样进行冷害指数、失重率、可溶性固形物含量、硬度、乙烯含量、CO₂ 含量等指标的测定。结果表明: CPT 能够减轻香蕉果实采后冷害的发生程度, 减缓香蕉果实质量损失。相比对照组极显著($P < 0.01$)地降低了香蕉果实贮藏包装环境中的乙烯和 CO₂ 的含量, 从而延缓了香蕉果实在低温刺激下的后熟生理进程, 增强了其对不良低温伤害的抗性。且 CPT 结合加湿处理效果更好, 在贮藏第 12 d 时冷害损伤仍然较轻, 失重率比对照组下降 49.53% ($P < 0.01$), 同时维持较高香蕉果皮硬度。但是两种处理对香蕉果肉硬度和可溶性固形物含量变化均没有明显影响。研究结果为减轻香蕉及热带水果采后冷害提供了一种新的途径。

关键词:低温等离子体, 香蕉, 冷害, 褐变, 乙烯

Effect of Cold Plasma Treatment on Alleviating Chilling Injury of Banana Fruit after Harvest

CHEN Shu-yi¹, ZENG Jun-ting^{1,+}, YUAN Yang², ZHONG Chong-shan^{1,*},

CAO Jian-kang², KONG Ling-hao¹, YING Hua-mei¹

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Effect of cold plasma treatment (CPT) and CPT plus humidity (RH 90%) on alleviating chilling injury of banana fruits was investigated. A dielectric barrier discharge (DBD, 20 kV, 5 kHz) plasma was used to treat with gas cycling in the bananas storage space at low temperature (6 ℃) for 1 min every 24 h. The index of cold damage, weight loss rate, soluble solid content, hardness, ethylene content, CO₂ content were determined by regular sampling. The results showed that, compared with the control, chilling injury and weight loss were relieved in CPT groups. CPT significantly ($P < 0.01$) removed the ethylene and reduced the concentration of CO₂ in the environment of storage, consequently compared with the control, postponed the ripening progress of banana due to the stimulation of low temperature, and enhanced its capability to endure hazardous low temperature. CPT + RH demonstrated better effect on maintaining the appearance and quality of banana fruit. For CPT + RH, the chilling injury degree was lighter compared with the control on the 12th day and the weight loss rate declined by 49.53% ($P < 0.01$). CPT + RH well kept the firmness of pericarp. However, both CPT and CPT + RH treatments did not create obvious influence on banana pulp firmness and the variation of soluble solids content. The results of this work implied that cold plasma treatment could be employed as a novel technique to relieve the chilling injury of banana and similar tropical fruits in the future.

Key words: cold plasma; banana fruit; chilling injury; browning; ethylene

中图分类号: TS255.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2020)05-0245-05

doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2020.05.040

引文格式: 陈姝伊, 曾筠婷, 袁洋, 等. 低温等离子体处理减轻采后香蕉果实冷害作用的研究[J]. 食品工业科技, 2020, 41(5): 245-249.

收稿日期: 2019-05-27 + 并列第一作者

作者简介: 陈姝伊(1997-), 女, 本科, 研究方向: 等离子应用, E-mail: 2016308010209@cau.edu.cn.

曾筠婷(1997-), 女, 本科, 研究方向: 等离子应用, E-mail: 2016308010223@cau.edu.cn.

* 通讯作者: 仲崇山(1973-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 高电压技术在农业食品中的应用, E-mail: zhongchsh@cau.edu.cn.

基金项目: 国家级大学生创新训练计划项目(201810019127)。

香蕉是广受欢迎的热带水果,我国香蕉产量已居世界第二位^[1]。但主要产于中国东南部的香蕉在秋冬季节北运北销过程中极易因低温引发冷害问题,导致香蕉品质降低,食用价值及商品价值丧失,造成巨大浪费及经济损失^[2]。因此,抑制香蕉冷害是香蕉保鲜的关键性问题。目前已有不少专家学者对香蕉冷害相关指标进行了研究。根据张建平等^[3]的研究,香蕉在6℃条件下安全贮藏天数为6.5 d,超过该安全期限,香蕉将受害。Yang等^[4]研究表明,许多果实有低温诱导乙烯的现象,即受低温胁迫后乙烯产量增加。李志刚等^[5]研究发现,香蕉果肉的硬度、弹性、粘附性、咀嚼性与冷害程度呈正相关。目前香蕉避免冷害的措施主要分为物理方法、化学方法^[6]。物理方法有人工提高环境温度、采后热处理。但热处理存在一些问题^[7],热处理不当易造成果蔬失水、变色、损伤^[8];化学方法主要是利用化学药剂喷施或涂抹在果蔬表面的方式,易在果蔬表面残留有害物质。因此,亟需开发新型的缓解香蕉冷害的新技术。

低温等离子体是一种非平衡等离子体,气体中正、负电荷总数相等,它可经气体放电产生。在低温等离子体的生成过程中会产生紫外线、带电粒子以及活性成分(Reactive Species, RS)。研究表明,采用低温等离子体处理(Cold plasma treatment, CPT)不仅可以有效杀灭果蔬表面细菌,还可分解残留的农药、降解果蔬贮藏环境中的乙烯^[9-10]。作为一种成本低廉,原料简单,环境友好型非热加工技术,低温等离子体正逐渐显现其优势^[11]。近几年低温等离子体在果蔬保鲜领域的应用已有大量研究,但CPT抑制果蔬冷害方面的研究尚未见报道。本文研究了在6℃贮藏条件下,低温等离子体处理对采后成熟香蕉冷害的抑制作用,以期能为香蕉的贮藏保鲜开发一种新的方法。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

香蕉果实 产地广西,挑选大小均匀、无病害和机械损伤,成熟度为7~8成的果实,去轴落梳,分成单个蕉指。

CTP-2000K型等离子体电源 南京苏曼等离子体科技有限公司;低温等离子体处理系统 自制;PRX-350A型恒温恒湿培养箱 宁波赛福实验仪器有限公司;PAL-1型数显糖度计 日本ATAGO公司;GC7900型气相色谱仪 上海天美(Techcomp)科学仪器有限公司;TMS-Pro型质构仪 美国Food Technology Corporation公司。

1.2 实验方法

1.2.1 样品处理与贮藏 参考Liu等^[12]的方法略作修改,将香蕉分为三组,分别为等离子体处理组(CPT组)、等离子体处理且加湿组(CPT结合加湿处理组)以及对照组(CK组)。取每四根香蕉为一组,装入305 nm×230 nm×85 mm的密闭聚丙烯保鲜盒当中,贮藏于温度6℃的恒温环境中。

对CPT组,每隔24 h将贮藏环境中的气体抽出,经过介质阻挡放电(DBD)装置电离后产生低温等离

子体,再通回盒内,该过程盒子始终保持密闭,气体经插入盒中的两管循环1 min,无外界空气进入。等离子电源施加在DBD电极上的电压为20 kV,频率为5 kHz。CPT结合加湿处理组的处理方法和CPT组完全相同,但其密闭贮藏盒底部增加一层浸湿纱布,维持盒内相对湿度为90%。对照组只将贮藏环境中的气体每24 h循环1 min,不进行其它处理。该放电装置主要由放电系统及监测系统组成(如图1所示)。放电装置由外径0.8 cm,内径0.4 cm,长13.5 cm的石英玻璃管及两根平行的长7 cm的棒状不锈钢电极组成(如图2所示)。电气监测系统由数字示波器(Tektronix TDS 2012C)与高压探头(Tektronix P6015A)组成,高压探头接于放电电极一端,实时采集电压及频率,并反映在示波器上。

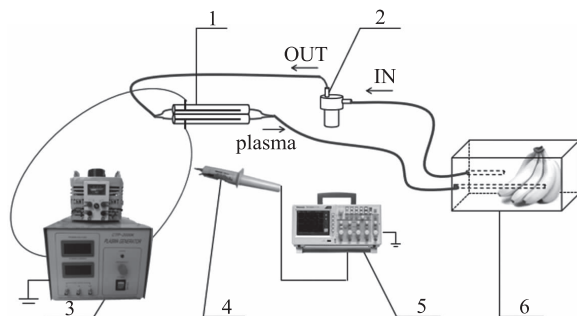


图1 低温等离子体处理系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of cold plasma treatment system

注:1:棒状电极放电装置;2:气体助推泵;
3:等离子电源及调压器;4:高压探头;
5:数字示波器;6:香蕉密闭贮藏室。

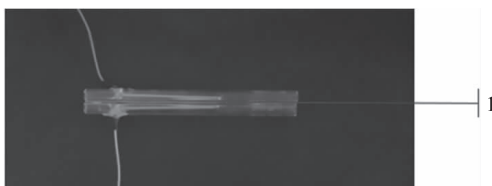


图2 放电效果实物图

Fig.2 Image of discharge effect

注:1:棒状电极上产生的紫色电晕。

以贮藏开始测量的香蕉各项指标结果作为初始值,从贮藏第2 d每隔一天测量一次各组香蕉的质量。在贮藏第3、6、9、12 d分别进行取样,去掉香蕉果肉两端部及果心,取其果肉部分测定三组香蕉果肉的糖度、硬度,去掉果皮两端部,取剩余果皮部分测量果皮硬度,抽取贮藏环境中的气体测定其中乙烯和二氧化碳含量。

1.2.2 指标测定

1.2.2.1 冷害指数 参照邱佳容等^[13]的方法,冷害程度通过观察香蕉表皮症状评价,每次评价均重复取样观察三次,结果取平均值。冷害级别如表1。香蕉冷害在果皮上的表现为组织褐变,本文均以香蕉果皮褐变程度说明其冷害程度^[14]。

每72 h统计一次,按以下公式^[15-16]计算冷害指数:

$$\text{冷害指数}(\%) = \frac{\sum(\text{分级数} \times \text{相应级果数})}{\text{总果数}} \times 100$$

表1 香蕉果实冷害指数分级标准
Table 1 Grading standards of chilling injury of banana

冷害级别(级)	香蕉表皮症状描述
0	表皮呈亮黄色,没有冷害症状
1	果皮变暗失去光泽,出现褐色小凹陷斑点,冷害面积占果皮总面积0~25%
2	果皮变暗,凹陷面积扩大,冷害面积占果皮总面积25%~50%
3	果皮变黑,凹陷面积扩大并呈水渍状,冷害面积占果皮总面积50%~75%
4	果皮大部分变黑,水渍状面积进一步扩大有连呈一片,冷害面积占果皮总面积75%~100%

(最高级数 × 总果数)

1.2.2.2 失重率 采用质量法^[17]测定,贮藏第0 d测定三组香蕉初始质量,之后每24 h对各组香蕉进行一次质量测定,按照下列公式计算失重率:

失重率(%) = (果实初始质量 - 果实贮藏后的质量) / 果实初始质量 × 100

1.2.2.3 可溶性固形物含量 采用数显糖度计测定,取香蕉中段果肉,每个样品进行3次重复测定。结果以百分数表示。

1.2.2.4 硬度 采用曹建康^[18]的方法略作修改,利用质构仪测定。采用直径为6 mm的圆柱形探头,测试速度及回程速度为60 mm/min,穿刺距离及回程距离为10 mm,测量果皮起始力设为7 N,测量果肉起始力为2 N,每蕉指均随机取三个不同位置,每个位置重复测定两次,测定结果取平均值。

1.2.2.5 乙烯含量 参照曹建康^[18]的方法,采用气相色谱仪检测,使用的乙烯标气浓度为50 μL/L,在每个密闭聚丙烯保鲜盒中重复抽取三次气体进行检测。乙烯含量使用μL/L表示。

1.2.2.6 CO₂含量 参照曹建康等^[18]的方法,采用气相色谱仪检测,使用的二氧化碳标气浓度为1‰,每个密闭聚丙烯保鲜盒重复抽取三次气体检测。二氧化碳含量使用‰表示。

1.3 数据处理

数据用Excel 2016处理,计算平均值和标准差。采用SPSS软件进行显著性差异分析。

2 结果与分析

2.1 低温等离子体处理对香蕉冷害的影响

贮藏期间各组香蕉冷害指数如图3所示,贮藏第3 d,两处理组无明显变化,对照组略有褐变,冷害指数为14.58%。贮藏第6 d,CPT组出现局部的浅褐色小斑点,冷害指数为35.42%;CPT结合加湿处理组出现轻微褐变,冷害指数为10.42%;对照组香蕉出现大范围褐色斑点,冷害指数为54.17%;贮藏第12 d,CPT结合加湿处理组褐变略有加深,但大部分果皮仍保持黄色,冷害指数为35.42%;对照组果皮整体呈现黑色,冷害指数为93.75%;CPT组褐变程度介于前两组之间,冷害指数为66.67%。可见,相比对照组,CPT极显著减轻了冷害程度($P < 0.01$),且CPT结合加湿处理进一步推迟了冷害发生($P < 0.01$)。推测是由于CPT结合加湿处理组在低温等离子体抑制冷害的同时维持了盒内较高湿度,有利于等离子体经由水溶液附着和进入果实表皮,从而发生作用。

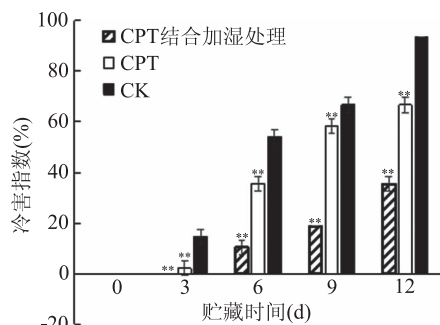


图3 低温等离子体对香蕉贮藏期间冷害指数的影响

Fig.3 Effect of cold plasma on chilling injury index of banana during storage

注:各处理组与对照组相比,*表示差异显著($P < 0.05$),**表示差异极显著($P < 0.01$),未标注表示无显著性差异。图4~图8同。

2.2 低温等离子体处理对香蕉失重率的影响

果实采后失重主要是由于水分散失和自身呼吸消耗所致。如图4所示,贮藏期间各组香蕉失重率均随时间延长而增加,未经等离子体处理的香蕉失重率处于较高水平,CPT与CPT结合加湿处理均减缓了香蕉质量损失,其中CPT结合加湿处理组失重率最低。贮藏12 d时,CPT与CPT结合加湿处理组失重率分别下降了42.43% ($P < 0.01$)、49.53% ($P < 0.01$),极显著低于CK组。可能的原因是:一方面,CPT有助于降低贮藏空间的乙烯浓度^[19-20],抑制了香蕉的呼吸作用,缓解了香蕉因水分散失、营养物质消耗导致的重量下降;另一方面,等离子体可能会分解一部分水分子,使盒内湿度下降^[12],而CPT结合加湿处理组,由于维持了包装内较高的相对湿度,在减缓香蕉呼吸消耗的同时,减少了水分散失,因此其失重率最低。

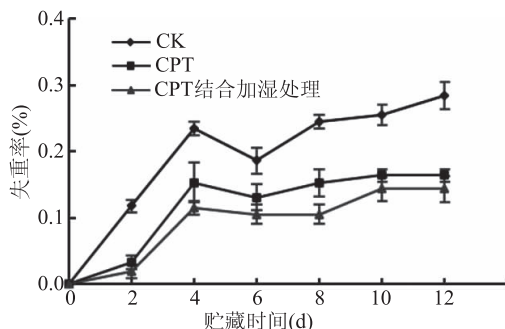


图4 低温等离子体对香蕉贮藏期间失重率的影响

Fig.4 Effect of cold plasma on weight loss rate of banana during storage

2.3 低温等离子体处理对香蕉硬度的影响

硬度反映果品与蔬菜的成熟软化程度和贮藏品质的变化,是果蔬品质评价的重要指标。如图5(A)所示,贮藏期间香蕉果皮硬度呈先上升后下降的趋势。CK、CPT组香蕉硬度整体而言均有下降,而CPT结合加湿处理维持了果皮较高硬度。如图5(B)所示,果肉硬度在贮藏最后一天与初始时基本相同,但仍经历了先上升后下降的过程。CPT、CPT结合加湿处理组果肉硬度在贮藏前后变化均不显著,等离子体处理未对果肉硬度造成明显影响。

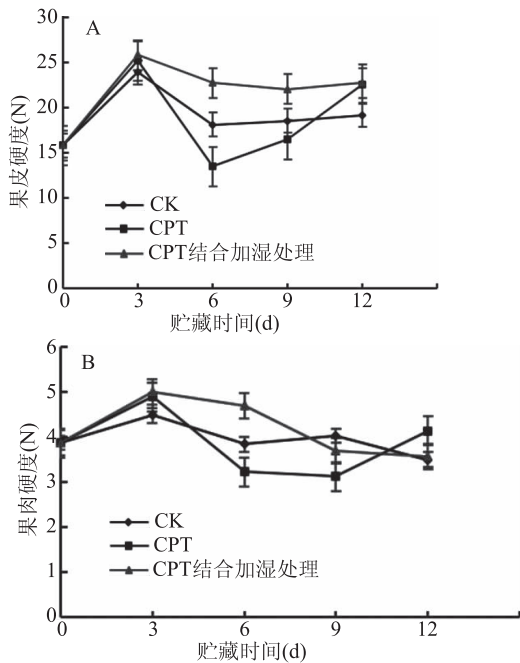


图5 低温等离子体对香蕉贮藏期间果皮(A)和果肉(B)硬度的影响

Fig.5 Effect of cold plasma on the firmness of peel(A) and pulp(B) of banana during storage

2.4 低温等离子体处理对香蕉可溶性固形物含量的影响

可溶性固形物含量是影响果实风味的重要因素。如图6所示,贮藏期间可溶性固形物含量略有上升,整体呈先升后降的变化趋势,贮藏前后无显著差异。可见,经等离子体处理过的两组香蕉可溶性固形物含量整体略低于对照组,且CPT结合加湿处理组可溶性固形物含量变化最平缓。可能是等离子体处理抑制了香蕉的呼吸作用,使贮藏期间淀粉等糖类物质分解比CK组更缓慢。

2.5 低温等离子体处理对贮藏环境气体的影响

2.5.1 低温等离子体处理对环境中的乙烯含量的影响

密闭贮藏环境中的乙烯由香蕉自身释放,且香蕉受低温胁迫后乙烯产量增加^[6],当乙烯浓度大时,将增强果蔬的呼吸作用,加速成熟和衰老过程,不利于果蔬贮藏保鲜^[19]。如图7所示,三组贮藏环境中乙烯含量均先增加后下降,CK组乙烯含量在第6d达到峰值,CPT及CPT结合加湿处理组第6d时的乙烯含量比对照组下降77.78%和86.67%,且在贮藏期间内这两组的乙烯含量整体低于CK组。这是由于介

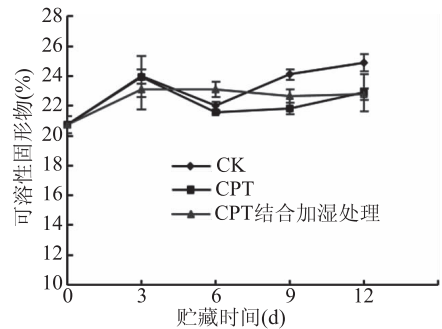


图6 低温等离子体对香蕉贮藏期间可溶性固形物含量的影响

Fig.6 Effect of cold plasma on the variation of soluble solids content of banana during storage

质阻挡放电产生的低温等离子体可以降解香蕉贮藏环境中的乙烯^[19-20],减缓香蕉呼吸强度,降低香蕉腐败变质速度。CPT结合加湿处理组乙烯含量略低于CPT组,推测是CPT结合加湿处理组维持了盒内较高相对湿度,水分子受到高能电子的作用而产生羟基自由基,羟基自由基与 C_2H_2 反应,一定程度提高了降解乙烯的效率^[21]。

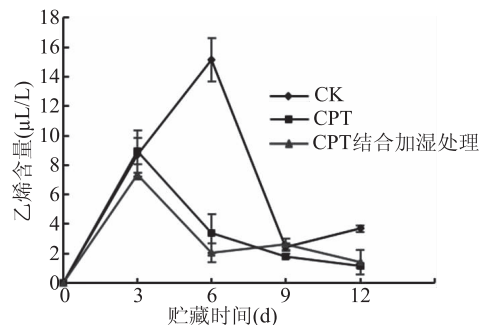


图7 低温等离子体对香蕉贮藏环境中乙烯含量的影响

Fig.7 Effect of cold plasma on the ethylene content in the environment of banana during storage

2.5.2 低温等离子体处理对环境中的二氧化碳含量的影响 贮藏包装中的二氧化碳含量反映了果实呼吸作用强度。如图8所示,CK组二氧化碳含量积累程度最高,CPT组和CPT结合加湿处理组含量相对较低,说明CK组香蕉呼吸强度高于处理组,这可能是由于低温等离子体可诱导果蔬气孔减小^[22],抑制了香蕉的呼吸作用。其中,在11d之前,CPT结合加湿处理组 CO_2 含量比CPT高。等离子体对 CO_2 有分解的效果,然而 CO_2 的分解随着相对湿度的增加而降低,因为水分子受到高能电子的作用而产生羟基自由基,与 CO_2 分解的中间产物CO反应生成新的 CO_2 ^[23]。

3 结论

本实验研究了低温等离子体处理对减轻香蕉果实采后冷害程度的影响,结果表明:低温贮藏12d后,CPT与CPT结合加湿处理组失重率分别下降了42.43% ($P < 0.01$)、49.53% ($P < 0.01$),极显著低于CK组;CPT及CPT结合加湿处理组第6d时的乙烯

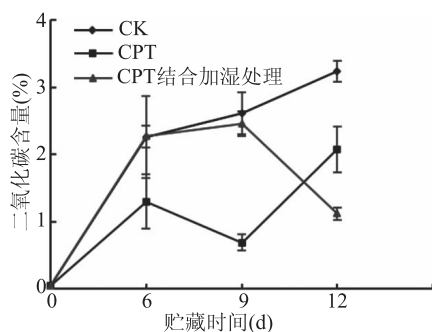


图8 低温等离子体对香蕉贮藏期间环境中二氧化碳的影响

Fig.8 Effect of cold plasma on the

CO₂ content in the environment of banana during storage

含量相比如对照组下降 77.78% 和 86.67%。等离子体处理对香蕉果实食用品质无显著影响, CPT 结合加湿处理组的可溶性固形物、果皮硬度的维持效果最好。低温等离子体可降解贮藏环境中的乙烯、降低二氧化碳含量, 抑制香蕉呼吸强度, 减缓腐败速度。总体而言, CPT 结合加湿处理组的香蕉, 各项指标优于 CK 组和 CPT 组。表明低温等离子体处理未来可能成为减轻香蕉及热带果实采后冷害的一种新途径, 该方法的作用机理和最优工艺参数还有待深入研究。

参考文献

[1] 联合国粮农组织. 联合国粮农组织共用数据库 [DB/OL]. <http://www.fao.org/faostat/zh/#data/QC/visualize>.

[2] 王勇, 谢会, 张昭其, 等. 香蕉果实贮藏冷害与 PAL 活性及可溶性蛋白活性的关系[J]. 果树学报, 2004, 21(2): 149-152.

[3] 张建平. 香蕉果实低温冷害指标研究[J]. 热带农业科学, 1991(2): 56-59.

[4] Yang S F, Hoffman N E. Ethylene biosynthesis and its regulation in higher plants [J]. Annual Review of Plant Physiology, 1984, 35(1): 155-189.

[5] 李志刚, 陈文冰, 郝利平, 等. 香蕉果实冷害过程中质构特性变化研究[J]. 山西农业大学学报: 自然科学版, 2016, 36(6): 450-456.

[6] 张立新, 郝利平, 魏巍, 等. 不同强度冷激处理对香蕉耐冷性的影响[J]. 食品科技, 2016, 41(4): 61-64.

[7] 王立斌, 刘升. 采后热处理降低果蔬贮藏冷害研究进展[J]. 农产品加工, 2011(4): 77-79.

[8] 张俊巧, 山肋和树. 热处理对催熟香蕉老化斑点产生的抑制研究[J]. 食品科技, 2009, 34(1): 49-52.

[9] Song A Y, Oh Y J, Kim J E, et al. Cold plasma treatment for

microbial safety and preservation of fresh lettuce[J]. Food Science and Biotechnology, 2015, 24(5): 1717-1724.

[10] Baier M, G6rgen M, Ehlbeck J, et al. Non-thermal atmospheric pressure plasma: Screening for gentle process conditions and antibacterial efficiency on perishable fresh produce [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2014, 22(4): 147-157.

[11] 康超娣, 相启森, 刘骁, 等. 等离子体活化水在食品工业中应用研究进展[J]. 食品工业科技, 2018, 39(7): 348-352.

[12] Liu C M, Nishida Y, Iwasaki K, et al. Prolonged preservation and sterilization of fresh plants in controlled environments using high-field plasma [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2011, 39(2): 717-724.

[13] 邱佳容, 张良清, 陈纯, 等. 冷激处理对冷藏香蕉果实内源多胺和乙烯的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2016(11): 75-80.

[14] 张俊巧. 果蔬低温保鲜低温伤害综述[J]. 南方园艺, 2007, 18(5): 71-73.

[15] Wang R, Wang L, Yuan S, et al. Compositional modifications of bioactive compounds and changes in the edible quality and antioxidant activity of Friar plum fruit during flesh reddening at intermediate temperatures [J]. Food Chemistry, 2018, 254: 26-35.

[16] 王丽敏, 洪凯, 李倩倩, 等. 不同包装对冷藏和货架期黑布朗李果实品质及乙烯释放速率的影响[J]. 食品工业科技, 2017, 38(14): 272-275.

[17] Sottile F, Peano C, Giuggioli N R, et al. The effect of modified atmosphere packaging on the physical and chemical quality of fresh yellow plum cultivars [J]. Journal of Food Agriculture & Environment, 2013, 11(3): 363-367.

[18] 曹建康. 果蔬采后生理生化实验指导[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2007: 45-99.

[19] 陈姗姗, 冯涛. 介质阻挡放电催化氧化果蔬贮藏环境中的乙烯[J]. 江苏农业科学, 2013, 41(3): 221-222.

[20] 马挺军, 史喜成, 白书培, 等. 介质阻挡放电降解果蔬贮藏环境中的乙烯[J]. 农业工程学报, 2010, 26(s2): 390-393.

[21] Kang H, Choi B, Son G, et al. C₂H₄ Decomposition behavior of a non-thermal plasma discharge-photocatalyst system for an air purifying device [J]. JSME International Journal Series B, 2006, 49(2): 419-425.

[22] 张平. 果蔬贮藏保鲜的技术创新[J]. 农产品加工, 2011(5): 8-9.

[23] Zheng G, Jiang J, Wu Y, et al. The mutual conversion of CO₂ and CO in dielectric barrier discharge (DBD) [J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2003, 23(1): 59-68.

(上接第 244 页)

生理指标的影响[J]. 食品工业科技, 2017, 38(11): 314-323.

[38] 李军军. 缓释型乙醇保鲜剂制备及对杨梅、蓝莓贮藏品质的影响[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2014.

[39] 郭禹, 姜宇芙, 钟佳, 等. 乙醇熏蒸对采后油豆角衰老相关生理指标的影响[J]. 食品与机械, 2016(5): 144-147.

[40] Ayala-zavala J F, Wang S Y, Wang C Y, et al. Methyl

jasmonate in conjunction with ethanol treatment increases antioxidant capacity, volatile compounds and postharvest life of strawberry fruit [J]. European Food Research and Technology, 2005, 221(6): 731-738.

[41] 韩红艳. 乙醇对桃果实采后生理、贮藏品质的影响[D]. 晋中: 山西农业大学, 2003.