

LED 应用于蔬菜保鲜领域的研究进展

范林林, 左进华, 高丽朴, 王清* (北京市农林科学院蔬菜研究中心, 果蔬农产品保鲜与加工北京市重点实验室, 农业部华北地区园艺作物生物学与种质创制重点实验室, 农业部都市农业(北方)重点实验室, 北京 100097)

摘要 发光二极管(LED)是一种固态照明装置,具有波长更为稳定、更加节能、环保的特点,已被广泛应用于园艺产品生产,可有效提高园艺产品的产量和品质。近年LED被证明在果蔬采后保鲜领域也有优越的表现,可显著提高果蔬采后的营养品质,延缓果蔬采后衰老,减少真菌感染等。综述了LED应用于蔬菜保鲜领域的原理、特点和研究进展,同时指出目前国内外LED光照射采后蔬菜保鲜技术中存在的问题,并对未来LED光照射采后蔬菜的保鲜技术进行展望。

关键词 蔬菜;发光二极管;保鲜

中图分类号 S609+.3 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2017)08-0089-04

Research Progress in the Application of LED in Vegetables Preservation

FAN Lin-lin, ZUO Jin-hua, GAO Li-pu, WANG Qing* (Beijing Vegetable Research Center, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing Key Laboratory of Fruits and Vegetable Storage and Processing, Key Laboratory of Biology and Genetic Improvement of Horticultural Crops (North China) of Ministry of Agriculture; Key Laboratory of Urban Agriculture (North China) of Ministry of Agriculture, Beijing 100097)

Abstract LED is a solid state lighting device, and its wavelength is more stable, energy-efficient and environmentally friendly. LED is widely used in horticulture production process, and can effectively improve the yield and quality of horticultural products. In recent years, LED has been proved to have superior performance in the field of postharvest preservation, and can significantly improve the nutritional quality of fruits and vegetables after harvest, delay postharvest senescence, reduce fungal infection and so on. This article introduces the principles, characteristics and application of LED light in the fields of vegetables preservation. Furthermore, the problems in the application, and development trends and prospects in the vegetable preservation have been especially outlined.

Key words Vegetables; LED; Preservation

蔬菜作为人们日常饮食中必不可少的食物之一,能为人体提供丰富的维生素、矿物质和膳食纤维,具有抗癌、美肤、瘦身等作用。随着健康饮食观念的深入,人们越来越重视蔬菜的摄入,同时也对其品质提出了更高的要求。我国蔬菜资源非常丰富,据农业部统计,2011年我国蔬菜总产量达6.79亿t,是我国第一大农产品^[1]。采后蔬菜失去外界养分供应,而本身生命活动仍在进行,若在贮运中没有采取适当的保鲜措施,则会造成蔬菜的腐烂、变质。据统计,美国等发达国家的蔬菜采后损失率小于5%,而我国由于技术设备等原因,蔬菜采后损失率为30%左右^[2-3],这对我国蔬菜产业的发展非常不利。目前采后蔬菜的保鲜方法主要是通过减缓蔬菜水分蒸发、抑制蔬菜生理反应和控制蔬菜微生物生长繁殖来进行。

光照处理是一种新兴的应用于蔬菜保鲜的非加热物理保鲜技术,可有效地维持蔬菜外观品质和延长货架寿命^[4-5]。与传统的物理、化学保鲜技术相比,光照处理具有来源广泛、成本低廉、无毒害、环境友好型等优点^[6]。据报道,在光照条件下,蔬菜尤其是绿色蔬菜类在贮藏初期会继续进行光合作用,积累营养物质^[7-9]。发光二极管(LED)是一种固态照明装置,具有窄带宽的光波长、高辐照量、低热量、方便、可移动性、易整合到其他设备中(冰箱等)等优点,且LED的光谱波长、发光强度、装置易于控制^[10]。20世纪

60年代后期是LED的初始发展阶段,当时LED主要应用于指示照明灯领域。在随后的几年里,LED作为一种新的半导体材料,其发展相当迅速,晶体技术和光学也得到改善^[11-13]。因此,LED普遍存在,且在照明用途上得到有效利用。在园艺和农业领域,人们发现LED能促进植物生长。有研究表明,LED可提高农作物产量以及农产品中营养物质的含量^[14-16]。LED也可用于果蔬的采后保鲜,随着新型光能源LED的出现,使得LED照射更加便于对蔬菜进行采后生理调控,不同颜色可见光照射在采后蔬菜保鲜中开始规模化应用。同时,随着科技的发展,LED将会变得更加有效率,且更加便宜。

笔者综述了LED光照应用于蔬菜保鲜领域的原理、特点和研究进展,同时指出目前国内外LED光照射蔬菜保鲜中存在的问题,并对未来LED光照射采后蔬菜的保鲜技术进行展望,旨在为我国采后蔬菜保鲜技术的发展提供参考。

1 LED光照保鲜技术原理和特点

1.1 原理

1962年美国物理学家尼克·何伦亚克发明了LED灯装置,即一种具有2个电极的半导体发光器件。LED灯的基本结构是一块电致发光的半导体材料,置于一个有引线的架子上,然后四周被环氧树脂密封。其发光的基本原理是利用半导体PN结或类似结构将电能转换成光能。但是,它能发出不同颜色光的主要原因是材料中电子和空穴所占的能级有所不同。能级的高低会影响电子和空穴复合后光子的能量,从而产生不同波长,即不同颜色的光^[17](图1)。因此,不同的材料组成就能产生不同的能级,并且发出不同颜色的光。例如红光是由镓磷化合物(GaAsP)、铝镓磷化物(AlGaAs)、铝镓铟磷化物(AlGaInP)或镓磷化物的结合体

基金项目 国家大宗蔬菜产业体系建设项目(CARS-25-E-01);西北非耕地园艺作物生态高效生产技术研究示范(201203095);北京市农林科学院青年基金项目(201404)。

作者简介 范林林(1990—),女,山东济宁人,硕士,从事农产品贮藏加工与食品资源开发等研究。*通讯作者,副研究员,从事农产品贮藏与加工研究。

收稿日期 2017-01-19

发出的光^[18-19];蓝光是由铟镓镍化物(InGa_N)和砷化镓(ZnSe)的结合体发出的光^[18-20]等。

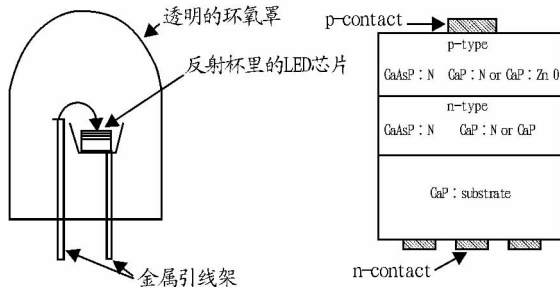


图1 LED灯的截面

Fig. 1 Sectional view of LED lamp

1.2 特点 相对于传统光源(高压钠灯和金属卤化物灯),LED灯具有光质纯、光效高、寿命长、波长类型丰富、节能环保等优点(表1)。在正常使用下,LED灯寿命可达10万h。在极端高温和电流下,LED灯的寿命会缩短,尤其是在高温、高湿的环境下,它的寿命会大大缩减,但比传统光源更耐用、使用寿命更长^[21]。LED可发射单色光,其半波宽大多为20nm,能够精确地为植物光合作用和生长发育提供所需的光谱,且能提高光能的利用率。大量研究已证明,植物需要通过光照来调控体内激素含量、形态的变化,并且不同的波长起到的作用也不同。红光(660nm)和蓝光(420~450nm)能够提高植物体内叶绿素的含量,因此它们在光合作用中最为重要^[22-24]。

表1 LED与2种常用的照明技术的性能比较

Table 1 Comparison of the properties of LED and two commonly used lighting technologies

照明技术 Lighting technology	光谱组成 ^[25,16] Spectral composition	形状、简洁性 ^[26,16] Shape and simplicity	光效 ^[26] Luminous efficacy
LED	单色,UV LED、IR LED和白色光LED	芯片小(2~5cm),可整合到不同的装置中	复合白光LEDs:100~150lm/W;2025年可达到250lm/W
荧光灯 Fluorescent lamp	广谱性、不易控制	体积大	45~80lm/W
高压钠灯 High voltage sodium lamp	广谱性、不易控制	体积大	65~150lm/W

照明技术 Lighting technology	光子效率 ^[27] Photon efficiency $\mu\text{mol}/\text{J}$	开灯至灯 全亮所用时间 ^[26] Time of turn on all lights	使用寿命 ^[27-28] Service life//h	坚固性 ^[26] Ruggedness
LED	0.89~1.70	几乎立即亮	50000	不易碎
荧光灯 Fluorescent lamp	0.95	大约3min	10000~17000	电灯泡、固定装置的组成部件易碎
高压钠灯 High voltage sodium lamp	1.30~1.70	预热时间10min, 20min后全亮	10000~17000	电灯泡、固定装置的组成部件易碎

2 LED光照对蔬菜采后品质的影响

蔬菜采后品质的维持通常是通过控制适宜的温湿度条件和气体成分来实现,大量研究表明,光照对于蔬菜采后的成熟衰老和品质维持有重要作用。LED光照可抑制采后蔬

菜的衰老,且提高其营养成分含量。如表2所示,不同的蔬菜所需LED光照强度、光谱组成不同,并且在蔬菜的品质保持上保鲜效果也不同。

表2 LED光照对采后蔬菜保鲜效果的影响

Table 2 Effect of LED lighting on preservation of postharvest vegetables

应用 Application	采后蔬菜 Postharvest vegetables	LED(波长) LED(wavelength)	强度 Intensity	处理方式 Processing ways	保鲜效果 Preservation effect	参考文献 Reference literature
成熟\衰老 延缓蔬菜的	黄瓜	白色光	75 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	持续照射	维持色泽,抑制黄化	[29]
Delaying the ripening and senescence of vegetables	番茄	白色光	75 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	持续照射	提高抗氧化能力	[30]
	生菜	白色光	1.4 $\mu\text{E}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	间歇照射	抑制叶绿素降解,维持较高的脱镁叶绿素含量	[31]
	西兰花	红色光(660nm)	50 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	持续照射	相比于蓝、白光,抑制黄化、乙烯释放量	[32]
	番茄	蓝色光(440~450nm)	85.7 $\mu\text{E}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	持续照射	相比于红光,保持较高的硬度,维持色泽	[33]
Increasing nutrients	生菜	白光	1.4 $\mu\text{E}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	间歇照射	相比于无光对照,维持较高的类胡萝卜素	[31]
	西兰花	红色光(660nm)	50 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	持续照射	相比于白光,维持较高的V _c 含量	[32]
	番茄	蓝色光(440~450nm)	85.7 $\mu\text{E}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	持续照射	相比于红光,保持较高的谷氨酸、 γ -氨基丁酸含量	[33]
	圆白菜	白光、蓝光(436nm)、绿光(524nm)、红光(665nm)	1.38、1.515、1.455、1.065W	持续照射	各色光均能维持较高的叶绿素、V _c 、总酚含量	[34]
	黄瓜	白色光	75 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	持续照射	维持较高的V _c 含量	[29]
	番茄	白色光	75 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	持续照射	维持较高的TSS、V _c 含量	[29]

2.1 LED 单色光对蔬菜采后品质的影响 关于可见光、紫外线等在维持蔬菜贮运品质中的应用逐渐引起了研究者的注意,近年国内外对于光质,尤其是单色光的研究已成为热点^[41],原因是 LED 单色光具有波长更为稳定、节能、环保的特点,可精确研究单色光对蔬菜采后品质的影响。

蒲高斌等^[35]研究表明,相比于其他光质,红光可有效改善转色期番茄的果实着色,是促进番茄红素合成的最有效光质,而蓝光能显著提高番茄的 V_c 含量。随着人们对蔬菜营养成分的重视以及新型有效保鲜技术的需求,可见光照射在蔬菜保鲜中营养品质的调控方面应用逐渐增多;不同颜色弱光照射对芦笋、西兰花、青椒、猕猴桃等在贮运中的品质维持具有一定的效果^[36-38]。Alba 等^[39]报道,相比于其他光质,红光定时处理番茄可将番茄红素含量提高 2~3 倍。Lester 等^[40]研究表明,在菠菜贮藏期间,连续光照可提高其各种生物活性物质含量。Noichinda 等^[5]研究发现,光照处理可增加芥蓝贮藏期间葡萄糖和果糖含量,抑制 V_c 含量下降。Martínez-Sánchez 等^[8]研究表明,连续光照处理鲜切生菜的失重率要比无光对照组的低 0.4%。Liu 等^[41]研究表明,光照可显著提高收获期番茄果实的品质。

阎瑞香等^[42]研究表明,在 5℃ 贮藏条件下,不同 LED 光源对芦笋在贮藏中颜色变化的影响存在差异;LED 绿光和白光照射可较好地保持芦笋的感官品质,抑制其叶绿素的降解,进而有效地抑制蔬菜的褪绿黄化,减缓芦笋的衰老进程,有利于芦笋的贮藏保鲜;而 LED 红光、黄光和蓝光照射对芦笋的感官品质和营养物质影响与对照相比不显著。张娜等^[43]研究表明,LED 红光处理能抑制西兰花叶绿素含量的下降,抑制色差值 L^* 升高,维持色差值 a^* 及 b^* 稳定,降低呼吸强度,推迟呼吸高峰,延缓乙烯生成速率,贮藏结束时,光照处理组感官评分极显著高于对照组 ($P < 0.01$)。说明 LED 红光能够延缓西兰花褪绿、黄化,有利于西兰花的保鲜贮藏。Dhakal 等^[33]研究表明,相比于无光对照和 LED 红光组,LED 蓝光处理可较好地延长番茄的货架寿命,维持其较高的硬度和番茄红素含量,抑制其成熟衰老进程,对番茄有较好的保鲜作用。Ma 等^[32]研究表明,LED 红光可较好地抑制西兰花的黄化、成熟衰老,除此之外,还可较好地抑制西兰花的乙烯释放量,维持其较高的抗坏血酸盐含量;而 LED 蓝光却没有以上效果。日本三菱电机公司研制出利用 LED 进行蔬菜保鲜的新方法,在冷藏库内用 590 nm 的橙色光 LED 照射蔬菜,蔬菜的 V_c 含量大大增加;此前,用普通照明灯光贮存的蔬菜 V_c 含量普遍下降,例如花椰菜的 V_c 含量最初为 100 mg/kg,3 d 后减少到 80 mg/kg;而采用新的光照方法, V_c 含量从 100 mg/kg 增加到 110 mg/kg。另外,卷心菜的黄色菜心也因 LED 光照变成绿色, V_c 含量也明显提高。该方法改变了蔬菜的冷藏概念,从单纯的保鲜提高到保持其营养功能^[44]。

2.2 LED 复合光对蔬菜采后品质的影响 在普通冷藏环境下,弱光照射能适当延长蔬菜的货架寿命^[45],且不同的光配比、光强度对蔬菜的保鲜品质影响较大^[46-49]。李宁等^[38]研究表明,以无光处理为对照,研究 LED 红蓝、LED 红绿复合

光对西兰花保鲜效果的影响,结果表明:LED 红蓝复合光保鲜效果显著,不仅可延长西兰花货架寿命,而且可延缓乙烯释放量峰值、呼吸跃变出现的时间,降低呼吸跃变的峰值,抑制膜脂过氧化对西兰花造成的损伤。刘晓英等^[49]研究发现,较大比例红光照射处理全生育期樱桃番茄果实能促进可滴定酸的形成,60% 的蓝光可提高番茄果实中的 V_c 含量。伍新龄等^[51]研究发现,与无光对照相比,LED 红蓝复合光间歇照射有利于保持西兰花良好的外观品质,抑制营养物质的流失速率,延缓其衰老进程,对西兰花具有较好的保鲜效果,与低温避光处理相比较,西兰花货架期可延长 5 d 以上。王超等^[50]研究发现,10 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 光照处理有利于保持采后西芹的叶绿素和 V_c 含量,10 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 光强下背光面和无光处理组的叶绿素损失率分别是迎光面下的 1.56 和 1.50 倍, V_c 损失率分别是迎光面下的 1.67 和 1.86 倍;在控制好相对湿度的前提下,光照处理不会加大西芹的失重率;10 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 光照可较好地维持西芹的硬度。雷静等^[52]研究表明,4℃ 贮藏过程中,LED 红蓝单色弱光照射能促进绿熟期樱桃番茄更好地完成后熟,延缓成熟衰老,保持营养物质含量;与对照相比,LED 红光和蓝光弱光照射可显著促进樱桃番茄还原糖和可溶性总糖的合成 ($P < 0.05$),维持可溶性固形物 (TSS) 及可滴定酸 (TA) 的含量;蓝光能更有效地抑制 V_c 的氧化降解,而红光则能更好地促进番茄红素的合成,提高其贮藏品质。Seo 等^[53]研究了 LED 红光、蓝光、白光和红光 + 蓝光对苦苣芽菜酚类物质含量的影响,结果表明,LED 蓝光可较好地维持其酚类化合物的含量,增强了苦苣芽菜中酚类物质合成所对应的基因表达。

3 LED 光照在蔬菜保鲜应用中存在的问题及展望

3.1 存在问题 LED 光具有安全、节能、简便等特点,对采后贮运中的蔬菜具有较好的保鲜效果,在蔬菜采后流通保鲜中有潜在的应用价值。目前多数研究集中在 LED 白光、红光、蓝光、绿光、橙光对蔬菜采后品质的影响,而 LED 紫光、青光、黄光对蔬菜的保鲜效果研究较少。另外,不同的蔬菜品种对光质、光强需求不同,而其需求的规律是不明确的,进而不能准确地使用 LED 灯,包括 LED 灯的安装方式、安装密度、调节方法等。因而进一步推进 LED 光处理蔬菜保鲜的基础研究,有助于 LED 在保鲜领域的推广和发展。

3.2 展望 LED 光处理贮运中的蔬菜能有效杀菌、使其进行光合作用,让蔬菜持续保持新鲜。除此之外,LED 光照对蔬菜中一些主要营养成分也有较大的影响,如 V_c 、叶绿素和胡萝卜素等,因此需研究 LED 光照是否会改变蔬菜的品质^[54]。LED 光处理是一种有效的蔬菜储存保鲜技术,能帮助减少采后蔬菜行业中的损耗和浪费。第一,未来将利用单色性比较好、光谱分布比较广的 LED 灯,模拟植物生长最需要的 400~500 nm 波长的蓝光、600~700 nm 波长的红光等,通过可编程控制器实现对 LED 光的调节,模拟太阳光环境,使得贮运中的果蔬依然保持活性。第二,开发适合贮运设施的 LED 装置,如将可调的 LED 灯置入零售终端货架、冰箱、冷库中,进而形成一个简便、有效的蔬菜保鲜方式。第三,可

采用其他保鲜技术与LED光照处理联合应用于采后蔬菜的保鲜,如UV-C或B与LED联合使用,1-MCP与LED白光联合使用等,使其得到更佳的保鲜效果。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 2012 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2013.
- [2] 葛毅强, 陈颖, 张振华, 等. 我国果蔬加工业发展之管见[J]. 食品科学, 2005, 26(7): 270-274.
- [3] 王颖荣, 谢晶. 采后蔬菜保鲜技术研究进展[J]. 广东农业科学, 2014, 41(19): 107-111.
- [4] BÜCHERT A M, GÓMEZ LOBATO M E, VILLARREAL N M, et al. Effect of visible light treatments on postharvest senescence of broccoli (*Brassica oleracea* L.) [J]. Journal of the science of food and agriculture, 2011, 91(2): 355-361.
- [5] NOICHINDA S, BODHIPADMA K, MAHAMONTRI C, et al. Light during storage prevents loss of ascorbic acid, and increases glucose and fructose levels in Chinese kale (*Brassica oleracea* var. *alboglabra*) [J]. Postharvest biology and technology, 2007, 44(3): 312-315.
- [6] LARA M, BARBARA Q, ANDREA D. Polyphenoloxidase inactivation by light exposure in model systems and apple derivatives [J]. Innovative food science & emerging technologies, 2009, 10(4): 506-511.
- [7] 石建新, 安秀章, 张立新, 等. 采后照光处理对富士苹果增色及贮藏的影响[J]. 果树科学, 2000, 17(3): 170-174.
- [8] MARTÍNEZ-SÁNCHEZ A, TUDELA J A, LUNA C, et al. Low oxygen levels and light exposure affect quality of fresh-cut Romaine lettuce [J]. Postharvest biology and technology, 2011, 59(1): 34-42.
- [9] SANZ S, OLARTE C, AYALA F, et al. The response to lighting of minimally processed chard: Influence on its shelf life [J]. Journal of the science of food and agriculture, 2008, 88(9): 1622-1631.
- [10] BRANAS C, AZCONDO F J, ALONSO J M. Solid-state lighting: A system review [J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2013, 7(4): 6-14.
- [11] BOURGET C M. An introduction to light-emitting diodes [J]. Hort Science, 2008, 43(7): 1944-1946.
- [12] YEH N, CHUNG J P. High-brightness LEDs-Energy efficient lighting sources and their potential in indoor plant cultivation [J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2009, 13(8): 2175-2180.
- [13] CHANG M H, DAS D, VARDE P V, et al. Light emitting diodes reliability review [J]. Microelectronics reliability, 2012, 52(5): 762-782.
- [14] MORROW R C. LED lighting in horticulture [J]. HortScience, 2008, 43(7): 1947-1950.
- [15] YEH N, YEH P, SHIH N, et al. Applications of light-emitting diodes in researches conducted in aquatic environment [J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2014, 32: 611-618.
- [16] MITCHELL C A, BOTH A J, BOURGET C M, et al. LEDs: The future of greenhouse lighting [J]. Chronica horticulturae, 2012, 52(1): 6-12.
- [17] HOLONYAK N, BEVACQUA S F. Coherent (visible) light emission from Ga (As) xPx junctions [J]. Applied physics letters, 1962, 1(4): 82-83.
- [18] CRAFT M G. LEDs challenge the incandescents [J]. IEEE Circuits and Devices Magazine, 1992, 8(5): 24-29.
- [19] MUKAI T, YAMADA M, NAKAMURA S. Characteristics of InGaN-based UV/blue/green/amber/red light-emitting diodes [J]. Japanese journal of applied physics, 1999, 38(7R): 3976-3981.
- [20] XIE W, GRILLO D C, GUNSHOR R L, et al. Room temperature blue light emitting p-n diodes from Zn (S,Se)-based multiple quantum well structures [J]. Applied physics letters, 1992, 60(16): 1999-2001.
- [21] FÜ M J, YANG L Q, ZHANG J H. Study of light emitting diodes for the application of plant growth in green house [C]//Electronic Packaging Technology and High Density Packaging (ICEPT-HDP), 2011 12th International Conference on. [s. l.]: IEEE, 2011: 1-5.
- [22] OKAMOTO K, YANAGI T, TAKITA S, et al. Development of plant growth apparatus using blue and red LED as artificial light source [J]. Acta horticulturae, 1997, 440: 111-116.
- [23] POUDEL P R, KATAOKA I, MOCHIOKA R. Effect of red-and blue-light-emitting diodes on growth and morphogenesis of grapes [J]. Plant cell tissue and organ culture, 2008, 92(2): 147-153.
- [24] 杨荣超, 丁小明, 齐飞. LED 灯在植物研究上的现状和展望 [J]. 安徽农业科学, 2015, 43(26): 17-20.
- [25] DENBAARS S P, FEEZELL D, KELCHNER K, et al. Development of gallium-nitride-based light-emitting diodes (LEDs) and laser diodes for energy-efficient lighting and displays [J]. Acta materialia, 2013, 61(3): 945-951.
- [26] U. S. Dept. of Energy. Energy efficiency of LEDs. Building Technologies Program/Solid-state lighting technology fact sheet [EB/OL]. [2015-02-13]. http://www.hi-led.eu/wp-content/themes/hiled/pdf/led_energy_efficiency.pdf.
- [27] NELSON J A, BUGBEE B. Economic analysis of greenhouse lighting: Light emitting diodes vs. high intensity discharge fixtures [J]. PloS One, 2014, 9(6): 99010.
- [28] GUPTA S D, JATOTHU B. Fundamentals and applications of light-emitting diodes (LEDs) in vitro plant growth and morphogenesis [J]. Plant biotechnology reports, 2013, 7(3): 211-220.
- [29] 范林林, 左进华, 史群颜, 等. LED 白光照射对黄瓜贮藏过程中品质的影响 [J]. 北方园艺, 2016(19): 156-159.
- [30] 范林林, 左进华, 夏春雨, 等. LED 白光处理对番茄贮藏品质的影响 [J]. 北方园艺, 2016(17): 134-137.
- [31] BRAIDOT E, PETRUSSA E, PERESSON C, et al. Low-intensity light cycles improve the quality of lamb's lettuce (*Valerianella olitoria* [L.] Pollich) during storage at low temperature [J]. Postharvest biology and technology, 2014, 90: 15-23.
- [32] MA G, ZHANG L C, SETIAWAN C K, et al. Effect of red and blue LED light irradiation on ascorbate content and expression of genes related to ascorbate metabolism in postharvest broccoli [J]. Postharvest biology and technology, 2014, 94(7): 97-103.
- [33] DHAKAL R, BAEK K H. Short period irradiation of single blue wavelength light extends the storage period of mature green tomatoes [J]. Postharvest biology and technology, 2014, 90: 73-77.
- [34] LEE Y J, HA J Y, OH J E, et al. The effect of LED irradiation on the quality of cabbage stored at a low temperature [J]. Food science and biotechnology, 2014, 23(4): 1087-1093.
- [35] 蒲高斌, 刘世琦, 杜洪涛, 等. 光质对番茄果实转色期品质变化的影响 [J]. 中国农学通报, 2005, 21(4): 176-178.
- [36] 谢晶, 蔡楠, 韩志. 弱光照射对果蔬冷藏品质的影响 [J]. 食品科学, 2008, 29(3): 471-474.
- [37] 刘然然, 寇莉萍, 阎瑞香. 发光二极管绿光照射对精品蔬菜货架期品质的影响 [J]. 北方园艺, 2013(8): 5-9.
- [38] 李宁, 阎瑞香, 张娜. LED 复合光处理对西兰花低温保鲜效果的影响 [J]. 华北农学报, 2015, 30(1): 188-193.
- [39] ALBA R, CORDONNIER-PRATT M M, PRATT L H. Fruit-localized phytochromes regulate lycopene accumulation independently of ethylene production in tomato [J]. Plant physiology, 2000, 123(1): 363-370.
- [40] LESTER G E, MAKUS D J, HODGES D M. Relationship between fresh-packaged spinach leaves exposed to continuous light or dark and bioactive contents: Effects of cultivar, leaf size, and storage duration [J]. Journal of agricultural and food chemistry, 2010, 58(5): 2980-2987.
- [41] LIU L H, ZABARAS D, BENNETT L E, et al. Effects of UV-C, red light and sun light on the carotenoid content and physical qualities of tomatoes during post-harvest storage [J]. Food Chemistry, 2009, 115(2): 495-500.
- [42] 阎瑞香, 思希军, 刘然然. 低温条件下不同 LED 光源对芦笋颜色变化的影响 [C]//第六届中国冷冻冷藏新技术、新设备研讨会论文集. 北京: 中国制冷空调工业协会, 2013.
- [43] 张娜, 阎瑞香, 关文强, 等. LED 单色红光对西兰花采后黄化抑制效果的影响 [J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(4): 955-959.
- [44] 张东生. 橙色 LED 保鲜蔬菜创奇迹 [J]. 国际化工信息, 2005(1): 32.
- [45] 谢晶, 蔡楠, 韩志. 弱光照射对果蔬冷藏品质的影响 [J]. 食品科学, 2008, 29(3): 471-474.
- [46] 李逸尘, 陈存坤, 贾凝, 等. 光照对采后蔬菜呼吸强度变化的影响 [J]. 安徽农业科学, 2011, 39(4): 1915-1916.
- [47] TAMALAITIS G, DUCHOVSKIS P, BLIZNIKAS Z, et al. High-power light-emitting diode based facility for plant cultivation [J]. Journal of physics D: Applied physics, 2005, 38(17): 3182-3187.
- [48] FUJIWARA K, ISOBE S, IIMOTO M. Effects of controlled atmosphere and low light irradiation using red light emitting diodes during low temperature storage on the visual quality of grafted tomato plug seedlings [J]. Environment control in biology (Japan), 1999, 37(3): 185-190.
- [49] 刘晓英, 徐志刚, 焦学磊, 等. 可调 LED 光源系统设计及其对菠菜生长的影响 [J]. 农业工程学报, 2012, 28(1): 208-212.
- [50] 伍新龄, 张娜, 张晓洁, 等. LED 红蓝光复合光间歇照射对西兰花贮藏品质的影响 [J]. 保鲜与加工, 2015, 15(5): 6-10.

均显著,而发酵温度和发酵 pH 对产酸量影响不大。从 F 值得各因素对酸度影响程度依次为初始酒精度、醋酸菌接种量、醋酸发酵 pH、醋酸发酵温度。对感官评定值的方差分析得出, $F_A = 4.4542$, $P_A = 0.0452$; $F_B = 10.9246$, $P_B = 0.0039$; $F_C = 1.8917$, $P_C = 0.2062$; $F_D = 3.7250$, $P_D = 0.0663$ 。由此看出,初始酒精度对酸度的影响在 0.01 水平均显著,醋酸菌接种量对酸度的影响在 0.05 水平均显著,而发酵温度和发酵 pH 对酸度的影响不显著。从 F 值大小可见各因素对感官评分的影响顺序依次为初始酒精度、醋酸菌接种量、醋酸发酵 pH、醋酸发酵温度。由于感官评定受很多因素的影响,如时间、地点、温度、鉴评人员的身体状况等,所以结合酸度值和感官评定值的 R 值和方差分析结果综合考虑,得出以下结论:各因素对番茄醋发酵的影响程度由大到小依次为初始酒精度、醋酸菌接种量、醋酸发酵 pH、醋酸发酵温度;番茄醋发酵最佳条件为温度 32 ℃、醋酸菌接种量 8%、初始酒精度 7%、醋酸发酵 pH 3.5。

2.3 产品质量和标准

2.3.1 感官指标。试验制得的番茄醋色泽为澄清浅黄色,口味酸甜醇厚,具有番茄果香及番茄酸甜的口感,组织无悬浮物、无沉淀。

2.3.2 理化指标。该试验制得的番茄醋总酸(以醋酸计) 56.80 g/L;总糖(可溶性固形物含量)为 31.50 g/L。

2.3.3 微生物指标。该试验制得的番茄醋菌落总数 ≤ 100 CFU/mL;大肠杆菌 ≤ 3 MPN/dL;致病菌不得检出。

3 结论

通过对酒精发酵和醋酸发酵的单因素试验和正交试验得出,番茄醋酒精发酵的最佳工艺条件为初始糖浓度 15%,酵母菌接种量 0.03%,发酵温度 30 ℃,初始 pH 4.0,酒精度

为 8.2%;番茄醋醋酸发酵的最佳工艺条件为温度 32 ℃、醋酸菌接种量 8%、初始酒精度为 7%、醋酸发酵 pH 3.5,酸度为 59.36 g/L。在此条件下,生产的番茄醋呈浅黄色,口味酸甜醇厚,既具有番茄特殊的果香,又融合果醋的醋酸味,可为番茄的开发利用和丰富果醋市场提供参考。

参考文献

- [1] 蒋丽,周俊良,张兴无. 果醋的研究现状及发展前景[J]. 中国调味品, 2012,37(4):1-4.
- [2] 金同铭. 番茄的营养价值与保健作用[J]. 蔬菜,1998(3):32.
- [3] 王雁,谢晶,金晨钟,等. 番茄果醋酿制工艺研究[J]. 现代农业科技, 2015(11):302-303.
- [4] 姚佳,蒲彪. 番茄红素提取工艺及检测方法的研究进展[J]. 食品与发酵科技,2010,46(3):18-21.
- [5] 中华人民共和国卫生部,中国国家标准化管理委员会. 食醋卫生标准: GB 2719-2003[S]. 北京:中国标准出版社,2003.
- [6] 崔彩云,陈国刚,王兴应,等. 哈密瓜果醋发酵工艺的研究[J]. 中国农学通报,2010,26(20):86-89.
- [7] 张庆华,孔令保,朱向东,等. 苹果醋发酵条件的优化研究[J]. 安徽农业科学,2009,37(32):15974-15976,15983.
- [8] 袁美,麻成金,黄群,等. 玉米醋酿造工艺研究[J]. 粮食科技与经济, 2009(5):44-46.
- [9] 毛丽衡,毛永民,王颀,等. 酸枣果醋酒精发酵过程工艺的研究[J]. 食品工业科技,2013,34(16):200-202.
- [10] 唐卿雁,林奇,李永平. 野生番石榴果醋加工工艺条件的优化[J]. 食品工业科技,2012,33(7):211-215.
- [11] 牛广财,严宝冬,朱丹,等. 响应面法优化黑加仑果醋的发酵条件[J]. 食品科学,2012,33(1):157-161.
- [12] 侯爱香. 果醋酿造用优良菌种的选育及果醋饮料的研制[D]. 长沙:湖南农业大学,2007.
- [13] 薛永恒,刘邻涓. 猕猴桃果醋及其果醋饮料的研究[J]. 山西食品工业,2001(4):23-26.
- [14] 郑宝东,曾绍校,王登飞. 柑桔果醋过滤除菌工艺的研究及橙醋饮料的研制[J]. 食品与机械,2003(4):9-10.
- [15] 王丽丽,仪宏,沙惠琴,等. 醋酸菌生长的营养需求及产酸的促进作用研究[J]. 中国调味品,2004(6):3-6.
- [16] BRANDT M A, SKINNER E Z, COLEMAN J A. Texture profile method [J]. Journal of food science,1963,28(4):404-409.

(上接第 92 页)

- [51] 王超,刘斌,张娜,等. LED 红蓝光照射对采后西芹保鲜效果的影响[J]. 保鲜与加工,2016,16(1):31-34.
- [52] 雷静,张娜,阎瑞香,等. LED 红蓝光照射保持樱桃番茄冷库贮藏品质[J]. 农业工程学报,2016,32(9):248-254.
- [53] SEO J M, ARASU M V, KIM Y B, et al. Phenylalanine and LED lights en-

hance phenolic compound production in Tartary buckwheat sprouts[J]. Food chemistry,2015,177:204-213.

- [54] MA G, ZHANG L C, KATO M, et al. Effect of the combination of ethylene and red LED light irradiation on carotenoid accumulation and carotenogenic gene expression in the flavedo of citrus fruit[J]. Postharvest biology and technology,2015,99:99-104.