

董俊岑,高溯楠,陈健初. 发光二极管光照食品保鲜技术的应用进展及展望 [J]. 食品工业科技, 2021, 42(16): 374-380. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2020080116

DONG Juncen, GAO Sunan, CHEN Jianchu. Application Progress and Prospect of Light-emitting Diode Light Technology in Food Preservation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(16): 374-380. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2020080116

· 专题综述 ·

发光二极管光照食品保鲜技术的应用进展及展望

董俊岑,高溯楠,陈健初*

(浙江大学生物系统工程与食品科学学院,浙江杭州 310058)

摘要: 发光二极管 (light-emitting diode, LED) 作为一种节能环保型的照明设备,具有无毒、眩光小、触摸安全等特点。随着 LED 性能的提升以及使用成本的降低,近年来有不少科学家将其与食品保鲜领域相结合进行应用探究,研究表明 LED 在许多方面有益于食品的储藏及保鲜。本文综述了 LED 技术特征及研究进展、在食品保鲜中的保鲜机理、运用于食品保鲜领域存在的问题,并最后提出了 LED 食品保鲜技术在未来的应用展望,为相关研究人员提供参考。

关键词: 发光二极管,食品,光照,保鲜

中图分类号:TS206

文献标识码:A

文章编号:1002-0306(2021)16-0374-07

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2020080116

Application Progress and Prospect of Light-emitting Diode Light Technology in Food Preservation

DONG Juncen, GAO Sunan, CHEN Jianchu*

(College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: As a kind of energy-saving and environmentally friendly lighting equipment, light-emitting diodes (LED) have the characteristics of non-toxic materials, low glare, and safe touch. With the improvement of LED performance and the reduction of using cost, in recent years, scientists have begun to apply it in the field of food preservation. Research shows that LED is beneficial to food storage and preservation in many aspects. This article summarizes the characteristics and research progress of LED technology, the preservation mechanism of LED in food preservation, the problems existing in the application of this technology, and finally puts forward the application prospect of LED food preservation technology in the future to provide references for relevant researchers.

Key words: light-emitting diodes; food; light; preservation

光照是影响食品储藏过程中生理、品质变化的重要因素之一。不同于穿透性差的 UV 光^[1]、成本高昂的脉冲光^[2] 以及有重金属污染风险的低压汞灯^[3] 等,可见光范围内的 LED 光可以低安全隐患、高效地发挥作用。适当的 LED 光照有助于果蔬品质的维持,使其具有更好的耐储性和商品性^[4]。已有相关实验证实 LED 光照射可以有效杀死煮熟鸡肉表面^[5]、

哈密瓜表皮^[6]、牛奶^[7]、鲜切菠萝^[8] 等冰箱储存食品中存在的细菌;可以通过减缓乙烯产生速率,提高食品营养价值以及维持食品感官品质等途径来调节食物储藏过程中的品质变化,从而延长对应食品的储藏期。但目前国内对于 LED 光照保鲜的研究还处于探索阶段,相关创新性的研究、文献综述都鲜有报道^[9-10]。本文论述了 LED 技术特征及在食品保鲜中

收稿日期: 2020-08-13

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFD0400704)。

作者简介: 董俊岑 (1999-),女,本科,研究方向:食品营养与安全,E-mail: 3170100090@zju.edu.cn。

* 通信作者: 陈健初 (1964-),男,博士,教授,研究方向:食品安全与质量控制,E-mail: jc@zju.edu.cn。

的相关机理,LED 运用在食品保鲜领域中存在的问题,并最后提出了 LED 保鲜技术在食品中应用的未来展望,为相关研究者提供参考。

1 LED 技术概述

LED 是一种可以直接将电转化成光的固态半导体元件,能够发出多种颜色的单色光^[11],同时具有电压低、体积小、寿命长、操作简单、成本低廉、无毒害及残留物等优点,满足消费者对于食品消费中安全、环保的需求^[3-4]。此外,LED 光质纯净,波长类型丰富,可以根据需要组合成复合光,使特定波长的光均匀照射农作物。这也正是常规照明设备不具有的功能^[5-6]。因此 LED 光照技术近年来受到食品保鲜领域的重视^[7]。

LED 的发光效率很高,但是在 LED 发光时,在其 p-n 结处会产生大量热量,从而降低其发光效率^[3]。因此,对使用中的 LED 设备等进行及时冷却十分关键。LED 工作时自身的能量损失较低,且红外辐射形式的辐射热低,可减少热量对食物或植物质量的不良影响,进而可以在较低温度下有较高的工作效率并保障食品的原有质量^[12-13],这些特征均表明,LED 在冷链运输和低温储存过程中具有广阔的应用前景和实际价值,同时在节约能源和降低成本方面具有较大的潜力,现在应该考虑如何进一步开发该技术以满足食品工业的需求。

2 保鲜机理及应用

2.1 抑制食品表面微生物生长

Ghate 等^[8]研究表明 LED 照射可以通过光催化灭活以及光动力学灭活途径对于食源性致病菌进行抑制。当特定波长的光照射细菌细胞时,细胞产生的内源性卟啉有助于形成导致细胞死亡的活性氧(ROS)^[14],如超氧阴离子、脂质过氧化物、羟基自由基和单态氧等。ROS 可能攻击细胞组件,如 DNA、脂质和蛋白质,从而导致细菌死亡^[15]。故通过该机理,LED 可用于抑制食品表面的细菌生长。

目前研究人员主要通过 405、460 nm 蓝光和 520 nm 绿光波段的 LED 光照射处理食物表面,针对蜡样芽胞杆菌、沙门氏菌、李斯特杆菌、金黄色葡萄球菌、副溶血性弧菌等食源性致病菌的抑制能力进行相关研究,并证实了这些波长光的抑菌作用^[16-17]。同时,基于多项 LED 蓝光的抑菌实验,Wang 等^[18]总结证明指出,在病原微生物中存在内源性的光敏发色团,而 400~470 nm 的蓝光能针对这类微生物发挥明显的灭活功效。

LED 抑制微生物生长的作用机制首先被运用到鲜切水果保鲜中。Kim 等^[19]为解决鲜切水果易受温度波动而引起微生物生长的问题,针对鲜切木瓜容易感染沙门氏菌的现象展开研究。研究人员发现,处于冷藏条件的鲜切木瓜经过 405 nm 波长的 LED 光照射 36~48 h(1.3~1.7 kJ/cm²)后,木瓜表面的沙门氏菌含量出现明显下降,相比无 LED 光照射以及其他温

度条件减少 0.3~1.3 lg CFU/cm²($P < 0.05$),且不改变木瓜其他感官品质,有助于降低沙门氏菌的致病风险。该团队进一步研究证实在低温条件下 405 nm 波长的 LED 光对于鲜切芒果表面的 O157:H7 大肠杆菌、单增李斯特菌和沙门氏菌,有着相似的灭活效果^[20]。此外,460 nm 的 LED 也被证实可以运用到鲜切菠萝的保鲜中,但对于菠萝的颜色会有一定的影响^[8]。

光照抑菌的效果同样在一些肉制品和乳制品的保鲜研究中被证实。Li 等^[21]发现,在三文鱼储存和加工环境中使用 405 nm 波长的 LED 光照射可以最大限度地减少单增李斯特菌从食物接触面到食品的交叉污染。而 Kim 等^[5]证明用 405 nm 波长的 LED 光照射能有效地减少低温下鸡胸肉表面的肠杆菌菌落数。Srimagal 等^[7]证明在 13.8 °C 恒温培养条件下,用 405 nm 波长的 LED 光照射处理牛奶 37.8 min 可以获得最佳灭菌效果和感官品质,同时显著延长了牛奶的货架寿命,经 LED 光照射处理后牛奶的货架寿命为 9 d,约为未处理对照样品的两倍。类似的,Hyun 等^[22]也发现 450~470 nm 的 LED 可通过破坏细胞膜来抑制切片奶酪包装上的病原体。

基于以上研究发现,针对较多种类的食品 LED 都具有较好的灭菌效果。但也有研究表明,LED 照射对于食品本身色泽会有所影响^[8],对食品中营养物质也可能存在破坏作用^[23-24]。因此,在应用 LED 照射技术来抑制食物表面微生物生长时应在考虑食品表面细菌生长情况外,充分考虑食品中主要营养成分以及食品色泽的变化情况,探究是否能外源添加相关成分来进一步增强抑菌效果。

2.2 减缓果蔬产品乙烯产生及呼吸速率

张娜等^[25]研究发现,625 nm 波长的 LED 光照射可以有效减缓果蔬采后储存中的呼吸强度,同时降低乙烯的生成速率。与对照组相比,实验组的西兰花呼吸强度及乙烯生成速率高峰都从第 10 d 推迟到了第 15 d,有效减缓了果蔬营养消耗,增强了耐储性。与此同时,经 LED 照射的西兰花呼吸强度高相比与未经光照的对照组减少了 20.63 CO₂ mg·kg⁻¹·h⁻¹,乙烯生成速率高峰减少了 0.18 μL·kg⁻¹·h⁻¹。625 nm 波长的 LED 光照射有效减少了果蔬对于营养物质的消耗,增强了耐储性。Olarte 等^[26]发现该效应与 LED 照射调控植物光合作用有关,LED 光照会对含叶绿素果蔬产生明显的呼吸抑制作用,这可能是由于含叶绿素果蔬在储藏过程中同时进行着光合作用吸收 CO₂ 而释放 O₂ 使其呼吸作用表征速率减慢。Ma 等^[27]研究发现西兰花(*Brassica oleracea* L. var. *italica*)经红光照射后有更好的色泽和更低的呼吸速率。

另一方面,果蔬采后保鲜过程中,呼吸速率和乙烯释放速率直接影响了果蔬的成熟情况。尤其对于长距离运输的食物,成熟度是储藏品质的重要一环。在 Dhakal 等^[28-29]的研究中表明,蓝色 LED 光(440~450 nm)照射西红柿,可以在延长其储藏时间的同时

增加其硬度。而与此相对的是,蓝色LED光(470 nm)照射会增加草莓呼吸速率和乙烯释放量,促进果皮脱绿和果肉软化^[30],和此类似的是,Huang等^[31]也证实了蓝色、红色及绿色LED光对于香蕉有促进成熟的效应,其中蓝色效果最为明显。

由此可见,LED光照技术可以作为一种果蔬长距离运输中的保鲜技术,有利于产品营养成分损失减少、维持适宜的成熟度。同种类型的LED光对于不同的果蔬乙烯产生以及呼吸速率的作用效果有所差异,而不同成熟度的同种产品所需要的储藏条件也会有所不同。需要进一步探究不同的产品适宜的LED照射条件,包括储存温度、处理时间和强度,以最大程度地减少各种果蔬产品的营养损失。

2.3 提高食品营养价值

光可以促进植物中各种次生代谢产物以及抗氧化物质的积累,从而有利于提高食品储藏过程中的营养价值。其中抗氧化物质的积累对于防御因光胁迫而产生的氧化物质(ROS)具有积极作用^[32],且这些化合物的抗氧化能力通常被认为可以直接降低氧化应激或间接调节抗氧化酶的生物活性而潜在地有益于人类健康^[33]。总的来说,不同波长的LED光照射有助于调节不同种类的果蔬积累有益的植物化学素,从而在储藏中提升果蔬的营养价值^[3]。

在较早期的研究中发现,将柑橘(*Citrus unshiu* Marc)用红色LED光照射可以增加其类胡萝卜素的含量^[34]。Kanazawa等^[30]的研究指出将草莓用绿色LED光(500~600 nm)照射可以增加其花青素的积累,其中绿色LED光照组在每天照射 $98 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ LED光5 min,6 d后,其花葵素糖苷含量是对照组的3.5倍。Kim等^[35]研究发现,用525和630 nm波长的LED光照射未成熟的草莓3~4 d,可显著增加草莓的花色苷含量,光照4 d比未经光照的对照高21%,比刚收获的草莓的花色苷含量提高45%。

而在近期的研究中发现,LED照射可能是减少西兰花(*Brassica oleracea* L. var. *italic*)采后植物化学素下降的有效物理方法。研究发现,绿色LED光照射可以增加西兰花的叶绿素含量,而红色LED光和黄色LED光照射有助于增加西兰花的酚类化合物含量。同时,绿色、红色、黄色LED光对于西兰花的抗坏血酸等有益抗氧化剂化合物的合成都有好处^[36]。除此之外,Routray等^[37]在对蓝莓的研究中发现,蓝光可以在较短的时间内提高蓝莓中的酚类化合物含量以及单体花色苷的含量,从而具有提高其抗氧化活性的作用。Kokalj等^[38]也发现蓝光照射可能有助于樱桃采后花青素的合成,从而提高樱桃的品质。

此外,相对于LED灯单一波长的照射,多种波长按比例的混合光也对特定植物化学素的生产积累和维持表现出更好的效果。一项研究表明,与在完全红色LED灯照射下生长的香菜相比,红光(638 nm)

与蓝光(447 nm)呈5:1的光照条件可以让香菜表现出更高的抗氧化活性^[39]。一项类似的研究发现,红色LED照射有利于大白菜和羽衣甘蓝的栽培,其中全红光照射有利于显著提高这两种植物中芥子油苷的含量,而红蓝光两种光的组合照射有利于产生黄酮和多酚类物质^[40]。对此,Oday等^[41]提出,补充的蓝光可能是通过调节苯丙氨酸解氨酶(phenylalanine ammonia-lyase)来促进抗氧化酚类物质与类黄酮的生物合成。

部分食品在LED照射后可能出现天然成分分解等质量下降问题。Mana等^[23]发现食品中广泛存在的天然多酚化合物在LED照射下会出现分解,如儿茶素、没食子酸等。Liang等^[24]也发现牛奶等食品中含有的天然成分核黄素会在蓝光照射下出现被细菌吸收的情况。

基于以上研究发现,LED照射对于不同食品的作用效果有所不同,在促进某些食品营养物质积累的同时可能不利于其他种类食品的储存。因此,将LED光照作为促进食品营养物质积累的手段仍然存在一定风险。由于目前对于LED光照促进营养物质合成的分子机理研究较为缺乏,从而无法有针对性地调控LED波长,进而控制特定的营养成分合成而避免其余营养物质的损失。未来的研究需要侧重LED照射对营养物质合成分子层面上的影响,从而为LED光照保鲜提供更多的可能性。

2.4 维持食品感官品质

食品保鲜过程中,如何维持感官品质也是决定储藏时间的重要一环,而一些科学家发现合理的LED光照射恰能实现这个目标。一项研究发现,通过LED照射可以显著提高火鸡肉、牛肉等零售肉的颜色保持时间以及维持更适宜的内外温度^[42]。Yan等^[43]发现低强度LED白色光照射采后小白菜可以上调与光合作用相关基因的表达,激活光合作用,诱导芥子油苷和叶绿素等植物化学素的生物合成,进而延缓衰老过程。照射过程中,维持小白菜叶绿素水平可以延迟采后保鲜过程中小白菜在感官质量层面的下降,而合成的芥子油苷可以带给小白菜额外的微生物与昆虫抗性。Lee等^[44]发现红色LED灯照射处理可以使白菜维持更高的水分含量,进而维持口感;Muneeer等^[45]也发现类似的结果,其通过对不同波长照射下叶片水压的变化发现,蓝光LED灯照射可能具有加强蒸腾作用的效果,进而导致保鲜期间水分的流失。因此,在选择适宜波长的LED灯来指导生产实践时,应当同时考虑对应波长是否会影响到食品的感官品质等因素,以保障食品保鲜后仍能加工出符合预期的产品。

综合以上研究,LED光照可以对食品从抑制微生物生长、调节乙烯释放和呼吸速率、营养成分的积累以及感官品质的维持方面进行保鲜。常见食品LED光照保鲜作用机理参见表1。

表 1 LED 光照食品保鲜对象及作用机理
Table 1 Objects and mechanism of LED illumination food preservation

保鲜对象	波长	分类	作用效果	发布时间	参考文献
鲜切木瓜	405 nm	2.1	抑制沙门氏菌繁殖	2017	[19]
鲜切芒果	405 nm	2.1	灭活大肠杆菌、单增李斯特菌和沙门氏菌	2017	[20]
鲜切菠萝	460 nm	2.1	抑制沙门氏菌繁殖	2017	[8]
三文鱼	405 nm	2.1	减少单增李斯特菌从食物接触面到食品的交叉污染	2017	[21]
鸡胸肉	405 nm	2.1	减少低温下鸡胸肉表面的肠杆菌菌落数	2017	[5]
牛奶	405.856 nm	2.1	一定灭菌效果,感官品质影响小	2016	[7]
西兰花	625 nm	2.2	减缓果蔬采后储存中的呼吸强度和乙烯生成速率	2016	[25]
西红柿	440~450 nm	2.2	减缓成熟以及增加硬度	2014	[28~29]
草莓	蓝光	2.3	增强采后花色苷的生物合成	2014	[46~47]
香蕉	蓝光	2.3	有助于存储过程中的果皮脱绿以及果肉软化	2018	[31]
柑橘	红光	2.3	增加胡萝卜素含量	2012	[34]
草莓	500~600 nm	2.3	增加花青素(花色素糖)积累量	2012	[30]
草莓	525、630 nm	2.3	增加草莓花色苷含量	2011	[35]
苦荞麦芽	660 nm	2.3	酚类化合物和花色苷积累增加	2014	[48]
西兰花	绿光	2.3	减缓植物化学素下降速率	2019	[36]
蓝莓	蓝光	2.3	提高蓝莓中的酚类化合物以及单体花色苷的含量	2018	[37]
樱桃	蓝光	2.3	可能有助于樱桃采后花青素的合成	2019	[38]
香菜	638、447 nm(5:1)	2.3	香菜表现出更高的抗氧化活性	2016	[39]
大白菜、甘蓝	红光	2.3	提高这两种植物中芥子油苷的含量	2016	[40]
大白菜、甘蓝	红蓝光混合	2.3	有利于产生黄酮和多酚类物质		
小白菜	低强度LED白光	2.4	上调与光合作用相关基因的表达,激活光合作用,诱导芥子油苷和叶绿素等植物化学素的生物合成	2020	[43]
白菜	红光	2.4	提高白菜中水分含量	2014	[44]
莴苣	蓝光	2.4	调节叶片的蒸腾作用	2014	[45]

3 问题及发展

3.1 存在问题

3.1.1 增加植物营养物质积累机制有待进一步深入研究 LED 光虽然已经被证实对果蔬的营养物质维持或积累有明显的促进作用,且不同食物的不同营养物质分别有对应的最适波长,但该现象在分子遗传层面等作用机理的相关研究仍相对欠缺。Thwe 等^[48]发现豆芽中的 *FtPAL* 和 *FtF3'H* 基因在芽苗暴露于 LED 灯照射 2 d 后,观察到最高的转录水平;Liu 等^[49]研究发现不同光处理下,类黄酮含量与基因表达之间存在显著相关性,LED 光照可能参与调节编码这些酶的基因,这有助于通过 LED 灯开发出富含抗氧化等代谢产物的新型蔬菜。基于此,更多的分子生物学、生物信息学等手段,如基因组学、蛋白质组学、代谢组学也应当被用于探究多种植物营养物质的积累机制,来进一步扩展研究和生产。

3.1.2 对于真菌的作用机理研究缺乏 现有 LED 光杀菌效果的研究对象多是常见食源性致病细菌,但对另一大食品污染源——真菌的研究较少,事实上,在食品保存过程中,如何采取合理、有效、针对性强的方法来延缓食品变质以及病原体的侵害一直是农业与食品科学家面临的重大挑战。Liao 等^[50]通过对柑橘、甜橙体外真菌研究后发现,蓝光照射可有效抑制这类水果表面三种真菌的菌丝体生长,进而可能有助于抑制果实腐烂,机理可能是蓝光照射刺激加强宿主

防御反应。

但是,目前针对真菌抑制作用的研究^[51]仍局限于水果,且对于食品、光波长照射以及病原体之间相互作用的机理也仅限于假设推论。因此,加强对于其他种类食物的真菌污染抑制作用机理的研究将使 LED 光在杀菌方面的功能更加完善,同时也更具有现实意义。

3.1.3 研究对象局限性 目前,大部分 LED 光照食品保鲜相关研究都围绕果蔬储藏展开,但是对于其他种类食物储藏过程中的作用研究非常局限。而要将 LED 光照保鲜技术运用到日常生活中,非果蔬类食品的保鲜研究是不可或缺的一环。同时,在探究 LED 灯对次生代谢产物光合作用调节的相关实验指出,除去 LED 灯的波长外,植物化学物质种类、光的强度、光的周期等因素也会对植物的生长产生较大的影响^[39]。而目前在 LED 等食品保鲜储藏的研究中对因素的控制和选择上仍比较局限,可以进一步探究非波长因素的作用情况,更系统地优化食品保鲜过程。

3.1.4 缺乏消费者对 LED 光照食品接受度研究 已经有较多研究证实 LED 对食品品质有提高或保持作用,有部分研究涉及到了 LED 光照过程中对食品的色泽和营养成分损失的影响^[8,23~24]。但总体而言,缺乏严格评估经 LED 光照后消费者对食品的接受度的相关研究^[3]。这需要全面地对食品在使用 LED

光照保鲜后的感官品质进行评估,从食品的风味、色泽、口感、气味等多方面进行考量。由于食品保鲜的最终目的在于提供营养丰富、安全且消费者接受度高的产品,对于LED光照后的食品感官评定就显得尤为重要。未来可以通过对生活中常见的冷藏保鲜食品、果蔬产品等进行LED光照后的感官评定研究来弥补这一空缺,同时进行营养成分含量测定、有害微生物量检测,从多方面去评估LED光照保鲜的综合效果。

3.2 应用展望

3.2.1 建立食物保鲜光谱 考虑到LED光在食品保鲜中的明显优势,LED光照保鲜将是未来食品保鲜中非常重要的技术。随着研究的深入和覆盖面的增加,LED光保鲜波长数据库可以被逐步建立,方便保鲜设计过程中根据不同生产需求来获得目标食品的特定波长。如Alrifai等^[41]就以不同LED波长对多种蔬菜次生代谢产物作用的相关研究为基础,绘制了与生成抗氧化活性化学物质相关的电磁光谱图。食品保鲜LED光谱图的建立将大大提高该技术运用到生产中的可操作性,从而在未来提高目标保鲜食品的营养品质。

3.2.2 在家庭冷藏室和冷链运输中的应用 由于LED光在低温环境中的工作效率较高,且LED光对于部分食品的保鲜效果也在温度较低时最好^[8],较低光强的LED光因此具有广泛的商业用途。比如安装在冰箱里,不仅可以起到照明作用,还可以同时提升储藏食物的品质。同时由于LED光具有可调光的优势,所以可以在设计冰箱和冷藏车时利用该功能,针对不同的食品提供不同的针对性光照保鲜。

3.2.3 建立多过程光控的保鲜工厂 目前,食品保鲜中调控LED灯波长等特质来优化食品保存已经取得成功,比如三文鱼^[21]、蓝莓^[24]等,具体涉及领域有延缓蔬菜衰老、增加采后食品营养等^[3]。但是,实际生产应用中,食品保存以及光线照射在空间、时间等维度上都对光控环节的精度、抗干扰性等提出了复杂要求,进而建设多过程可控可调的保鲜工厂成为了新的全球发展方向^[52],例如将LED集成到电子系统中;例如通过输入信号来调控不同LED光的组成比例和照射周期等^[53]。目前,飞利浦已经在美国尝试建设LED光源室内农场^[54],伦敦、英国等地也将多环节光控的植物工厂建设提上日程^[55]。

4 结论

总的来说,LED光照保鲜具有低成本、低能耗,安全高效的优势。现已发现在保鲜过程中,LED光照对于果蔬等营养物质的积累以及代谢调节具有明显作用。同时,特定波长的LED光对于食物表面病原微生物具有明显的灭活效果,但是对于其分子遗传层面作用机制以及对更多食品及结合最佳波长下的光强度、光周期缺乏进一步的研究,可以进一步加强

基因组学、蛋白质组学、代谢组学等新兴技术在该领域的运用以及更系统地分析LED灯非波长因素的作用效果。最后,建立LED光照保鲜光谱、普及LED于冷链运输和建立多过程光控的保鲜工厂可能是未来应用的重要方向。

参考文献

- [1] Maclean M, Macgregor S J, Anderson J G, et al. Inactivation of bacterial pathogens following exposure to light from a 405-nanometer light-emitting diode array[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2009, 75(7): 1932-7.
- [2] Bhavya M L, Umesh Hebbar H. Pulsed light processing of foods for microbial safety[J]. *Food Quality and Safety*, 2017, 1(3): 187-202.
- [3] D'souza C, Yuk H-G, Khoo G H, et al. Application of light-emitting diodes in food production, postharvest preservation, and microbiological food safety[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2015, 14(6): 719-40.
- [4] 王美霞, 刘斌, 关文强, 等. Led红蓝光照射强度对采后西兰花保鲜品质的影响[J]. *食品科技*, 2017, 42(6): 42-46.
- [5] Kim M J, Adeline Ng B X, Zwe Y H, et al. Photodynamic inactivation of *Salmonella enterica* enteritidis by 405±5 nm light-emitting diode and its application to control Salmonellosis on cooked chicken[J]. *Food Control*, 2017: 305-315.
- [6] Josewin S W, Kim M J, Yuk H G. Inactivation of *Listeria monocytogenes* and *Salmonella* spp. on cantaloupe rinds by blue light emitting diodes (LEDs)[J]. *Food Microbiology*, 2018, 76(DEC.): 219-25.
- [7] Srimagal A, Ramesh T, Sahu J K. Effect of light emitting diode treatment on inactivation of *Escherichia coli* in milk[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2016, 71: 378-85.
- [8] Ghate V, Kumar A, Kim M J, et al. Effect of 460 nm light emitting diode illumination on survival of *Salmonella* spp. on fresh-cut pineapples at different irradiances and temperatures[J]. *Journal of Food Engineering*, 2017, 196(Mar): 130-8.
- [9] 詹丽娟, 李颖. 光照技术在果蔬采后贮藏保鲜中的应用[J]. *食品与发酵工业*, 2016, 42(8): 268-72.
- [10] 范林林, 左进华, 高丽朴. Led应用于蔬菜保鲜领域的研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2017, 45(8): 89-92, 97.
- [11] 靖林丹. 钼钒酸盐荧光粉的合成及发光性能研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2016.
- [12] Robert C, Morrow. Led lighting in horticulture[J]. *Hort-Science: A Publication of the American Society for Horticultural Science*, 2008, 43(7): 1947-1950.
- [13] Tewolde F T, Lu N, Shiina K, et al. Nighttime supplemental led inter-lighting improves growth and yield of single-truss tomatoes by enhancing photosynthesis in both winter and summer[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2016, 7(113).
- [14] Wozniak A, Grinholc M. Combined antimicrobial activity of photodynamic inactivation and antimicrobials—state of the art[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2018, 9(930).
- [15] Luksiene Z, Zukauskas A. Prospects of photosensitization in control of pathogenic and harmful micro-organisms[J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2010, 107(5): 1415-1424.

- [16] Kumar A, Ghate V, Kim M-J, et al. Kinetics of bacterial inactivation by 405 nm and 520 nm light emitting diodes and the role of endogenous coproporphyrin on bacterial susceptibility[J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 2015, 149: 37-44.
- [17] Kumar A, Ghate V, Kim M J, et al. Antibacterial efficacy of 405, 460 and 520 nm light emitting diodes on *Lactobacillus plantarum*, *Staphylococcus aureus* and *Vibrio parahaemolyticus*[J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2016, 120(1): 49-56.
- [18] Wang Y, Wang Y, Wang Y, et al. Antimicrobial blue light inactivation of pathogenic microbes: State of the art[J]. *Drug Resistance Updates*, 2017, 33-35: 1-22.
- [19] Kim M-J, Bang W S, Yuk H-G. 405±5 nm light emitting diode illumination causes photodynamic inactivation of *Salmonella* spp. on fresh-cut papaya without deterioration[J]. *Food Microbiology*, 2017, 62: 124-132.
- [20] Kim M-J, Tang C H, Bang W S, et al. Antibacterial effect of 405±5 nm light emitting diode illumination against *Escherichia coli* O157: H7, *Listeria monocytogenes*, and *Salmonella* on the surface of fresh-cut mango and its influence on fruit quality[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2017, 244: 82-89.
- [21] Li X, Kim M-J, Bang W-S, et al. Anti-biofilm effect of 405 nm LEDs against *Listeria monocytogenes* in simulated ready-to-eat fresh salmon storage conditions[J]. *Food Control*, 2018, 84: 513-521.
- [22] Hyun J-E, Lee S-Y. Antibacterial effect and mechanisms of action of 460-470 nm light-emitting diode against *Listeria monocytogenes* and *Pseudomonas fluorescens* on the surface of packaged sliced cheese[J]. *Food Microbiology*, 2020, 86(Apr.): 33-43.
- [23] Mana T, Takuji N, Toshiaki K, et al. Prooxidative potential of photo-irradiated aqueous extracts of grape pomace, a recyclable resource from winemaking process[J]. *Plos One*, 2016, 11(6): e0158197.
- [24] Liang J Y, Yuann J M P, Cheng C W, et al. Blue light induced free radicals from riboflavin on *E. coli* DNA damage[J]. *Journal of Photochemistry & Photobiology B Biology*, 2013, 119: 60-64.
- [25] 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.
- [26] Olarte C, Sanz S, Federico Echávarri J, et al. Effect of plastic permeability and exposure to light during storage on the quality of minimally processed *Broccoli* and cauliflower[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2009, 42(1): 402-411.
- [27] Ma G, Zhang L, 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: 97-103.
- [28] Dhakal R, Baek K H. Metabolic alternation in the accumulation of free amino acids and γ -aminobutyric acid in postharvest mature green tomatoes following irradiation with blue light[J]. *Horticulture Environment & Biotechnology*, 2014, 55(1): 36-41.
- [29] Dhakal R, Baek K H. Short period irradiation of single blue wavelength light extends the storage period of mature green tomatoes[J]. *Postharvest Biology & Technology*, 2014, 90: 73-77.
- [30] Kanazawa K, Hashimoto T, Yoshida S, et al. Short photoirradiation induces flavonoid synthesis and increases its production in postharvest vegetables[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2012, 60(17): 4359-4368.
- [31] Huang J Y, Xu F, Zhou W. Effect of LED irradiation on the ripening and nutritional quality of postharvest banana fruit[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2018, 98(14): 5486-5493.
- [32] Darko E, Heydarizadeh P, Schoefs B, et al. Photosynthesis under artificial light: The shift in primary and secondary metabolism[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 2014, 369(1640): 20130243.
- [33] Lourenço S C, Moldão-Martins M, Alves V D. Antioxidants of natural plant origins: From sources to food industry applications[J]. *Molecules*, 2019, 24(22): 4132.
- [34] Ma G, Zhang L, Kato M, et al. Effect of blue and red led light irradiation on β -cryptoxanthin accumulation in the flavedo of citrus fruits[J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2012, 60(1): 197-201.
- [35] Kim B S, Lee H O, Kim J Y, et al. An effect of light emitting diode (LED) irradiation treatment on the amplification of functional components of immature strawberry[J]. *Horticulture Environment & Biotechnology*, 2011, 52(1): 35-39.
- [36] Loi M, Liuzzi V C, Fanelli F, et al. Effect of different light-emitting diode (LED) irradiation on the shelf life and phytonutrient content of broccoli (*Brassica oleracea* L. var. *italica*)[J]. *Food Chemistry*, 2019, 283(JUN.15): 206-214.
- [37] Routray W, Orsat V, Lefsrud M. Effect of postharvest led application on phenolic and antioxidant components of blueberry leaves[J]. *Chem Engineering*, 2018, 2(4): 56.
- [38] Kokalj D, Zlati E, Cigi B, et al. Postharvest light-emitting diode irradiation of sweet cherries (*Prunus avium* L.) promotes accumulation of anthocyanins[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2019, 148: 192-199.
- [39] Hao X, Naznin M T, Gravel V, et al. Different ratios of red and blue led light effects on coriander productivity and antioxidant properties[J]. *Acta Horticulturae*, 2016, 1134.
- [40] Lee M K, Arasu M V, Park S, et al. Led lights enhance metabolites and antioxidants in Chinese cabbage and kale[J]. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 2016: 59.
- [41] Alrifai Oday, Hao Xiuming, Marcone Massimo F, et al. Current review of the modulatory effects of LED lights on photosynthesis of secondary metabolites and future perspectives of microgreen vegetables[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2019, 67(22): 6075-6090.
- [42] Steele K S, Weber M J, Boyle E A E, et al. Shelf life of fresh meat products under led or fluorescent lighting[J]. *Meat Science*, 2016, 117: 75-84.
- [43] Yan Zhicheng, Zuo Jinhua, Zhou Fuhui, et al. Integrated analysis of transcriptomic and metabolomic data reveals the

mechanism by which led light irradiation extends the postharvest quality of pak-choi (*Brassica campestris* L. ssp. *chinensis* (L.) Makino var. *communis* Tsen et Lee)[J]. *Biomolecules*, 2020, 10: 252.

[44] 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 and Biotechnology*, 2014, 23(4): 1087-1093.

[45] Muneer S, Kim E J, Park J S, et al. Influence of green, red and blue light emitting diodes on multiprotein complex proteins and photosynthetic activity under different light intensities in lettuce leaves (*Lactuca sativa* L.)[J]. *Int J Mol Sci*, 2014, 15(3): 4657-4670.

[46] Xu Feng, Cao Shifeng, Shi Liyu, et al. Blue light irradiation affects anthocyanin content and enzyme activities involved in postharvest strawberry fruit[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2014, 62(20): 4778-4783.

[47] Xu F, Shi L, Chen W, et al. Effect of blue light treatment on fruit quality, antioxidant enzymes and radical-scavenging activity in strawberry fruit[J]. *Scientia Horticulturae*, 2014, 175: 181-186.

[48] Thwe A A, Kim Y B, Li X, et al. Effects of Light-emitting diodes on expression of phenylpropanoid biosynthetic genes and accumulation of phenylpropanoids in *Fagopyrum tataricum* sprouts[J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2014,

62(21): 25.

[49] Yang L, Fang S, Yang W, et al. Light quality affects flavonoid production and related gene expression in *Cyclocarya paliurus*[J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology, B Biology: Official Journal of the European Society for Photobiology*, 2018, 179: 66-73.

[50] Liao H L, Alferez F, Burns J K. Assessment of blue light treatments on citrus postharvest diseases[J]. *Postharvest Biology & Technology*, 2013, 81: 81-88.

[51] Alferez F, Liao H L, Burns J K. Blue light alters infection by *penicillium digitatum* in tangerines[J]. *Postharvest Biology & Technology*, 2012, 63(1): 11-15.

[52] 贺冬仙. 高附加值植物生产的环境控制技术(三) 植物工厂发展前景及高效生产[J]. *中国蔬菜*, 2020(1): 14-16.

[53] Griffiths A D, Herrnsdorf J, Mckendry J J D, et al. Gallium nitride micro-light-emitting diode structured light sources for multimodal optical wireless communications systems[J]. *Philosophical Transactions of The Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 2020, 378(2169): 20190185.

[54] 华新. 飞利浦携手gsf优化农作物产量和质量[J]. *中国花卉园艺*, 2014(12): 23.

[55] 李思楚, 杜娟. 植物照明, 建造未来的“城市农场”[J]. *可持续发展经济导刊*, 2019(9): 104-106.

更正声明

《东北地区传统发酵食品中两株植物乳杆菌的安全性评价》,作者 Victoria Yosea Mliga, 杨柳, 马赫, 孙畅, Yohana James Mgale, 任大勇, 发表于 2021 年 42 卷 13 期 253~261 页, 现将作者单位信息变更为:

1. 吉林农业大学食品科学与工程学院, 吉林长春 130118;

2. 吉林农业大学经济管理学院, 吉林长春 130118

对应作者单位英文信息为:

1. College of Food Science and Engineering, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China;

2. College of Economics and Management, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China