

DOI:10.11937/bfyy.201622049

LED 光调控技术在生菜设施化生产中的应用

林 魁¹, 徐 永²

(1. 福建农林大学 园艺学院, 福建 福州 350002; 2. 福建农林大学 光电子农业工程与技术研究中心, 福建 福州 350002)

摘 要:近年来,生菜逐渐成为设施无土栽培中的主要蔬菜种类。利用光环境调控技术对植物生长发育过程进行调控具有高效节能、环保无害等优势。现综述了目前我国生菜生产的现状,阐述了发光二极管 LED 在生菜生产中应用的研究现状,讨论了其在应用中应注意的问题及其应用前景。

关键词:生菜;LED;光调控;光环境

中图分类号:S 636.226 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2016)22-0198-06

光是植物生长发育最重要的环境因素之一^[1-2]。植物在它的整个生长发育周期中始终处于一个不断变化的光环境中。在长期的进化过程中,植物不仅能感知外界光环境的变化,而且还能调节自身去适应周围的光环境^[3-4]。植物的生长发育和形态建成都会受到光的强烈影响^[5],例如,蓝光能够调节植物气孔开放、展叶、可溶性蛋白质的积累、向光性、光形态和光合作用过程^[2,6-8];绿光能够诱导叶片生长,减少生物量^[1];红光能够诱导拟南芥幼苗的下胚轴伸长及其子叶的扩张。特定的光强、光质和光周期对于调节花期、株高、叶面积、茎的伸长和营养品质的积累具有重要作用^[9-11]。

随着科学技术的快速发展,植物对光的有效利用已经突破单纯依靠太阳光的限制,如今用人工光源代替补充自然光源的不足,已逐渐成为对植物生长发育进行控制的有效手段^[12]。传统的人工光源主要包括白炽灯、荧光灯、钠灯等,但这些光源都存在着发光效率低、能耗大、光谱不匹配等弊端^[13]。1990 年,发光二极管(light-emitting diode, LED)第一次被用于植物的生长试验研究中,并取得了很好的效果。随后的 20 多年,有关新型节能的 LED 在设施农业生产中的运用越来越多,并取得了许多可喜的成果^[1,5,7,14-17]。

生菜(*Lactuca sativa* L.)属菊科莴苣属,又名叶用莴苣,是世界公认的有机绿叶蔬菜。生菜不仅富含人体所需的维生素、矿物质、蛋白质等营养成分,而且具有预防

心脏疾病、抗衰老、防癌等保健功能^[18-19],近年来逐渐成为设施无土栽培中的主要蔬菜种类^[20-21]。在传统生菜的生产实践中,一些厂商为追求短期内的经济效益,滥用农药、化肥、激素等化学药品,不仅造成土地的破坏和环境的污染,农产品的安全性也受到挑战。此外,种植人员经常忽视生菜生长环境的卫生规范等问题,甚至有可能危及人类的健康。研究表明,对植物生长的光环境进行适当的调控对于作物生长发育是十分重要的^[22]。现对国内外在该方面的研究进行阐述,重点论述我国生菜研究的现状,并提出将 LED 应用于生菜生长过程中可能出现的问题及今后的研究思路和研究方向。

1 设施农业及 LED 在植物照明中的应用

设施农业,又称为可控农业(controlled agriculture lighting)、城市农业(如垂直农业,vertical farming)等^[12],是一个高投入、高产出以及高能耗的行业。以设施蔬菜为主体的中国设施农业在扭转蔬菜长期供应不足,实现自给自足,并在世界蔬菜第一出口大国中发挥了关键作用^[23]。

光源是照明设备中重要的发光部分。发光二极管(light-emitting diode, LED)是一种能够直接将电能转化为光能直接使用的新型照明光源。由于兼具光、电、热等多种特性(如结构简单、质量轻、安全性高)及光电优势(低功耗、高光效、低发热等),使之逐步取代传统光源的地位,具有广泛的应用前景^[12,24-25]。近年来,随着 LED 技术的不断成熟及制造成本的日益降低,LED 逐渐被广泛应用于各领域,如背光、通信、装饰、城市夜景布控等^[24-37]。更为重要的是,在非视觉照明的领域(如医疗、植物照明等)LED 的运用范围也不断扩大,其优越性也得到更为充分的体现。

目前,LED 在设施农业领域的应用研究已经引起全

第一作者简介:林魁(1989-),男,博士研究生,研究方向为设施农业环境与工程。E-mail:798708439@qq.com。

责任作者:徐永(1959-),男,博士,教授,现主要从事植物光环境与智能温室及植物工厂等研究工作。E-mail:y.xu@fafu.edu.cn。

基金项目:福建省科技重大专项资助项目(2014NZ0002-2)。

收稿日期:2016-08-04

世界的广泛关注,具有广阔的应用前景。在蔬菜设施育苗方面,LED研发为人工光型植物工厂的发展提供了契机。国内外有关单一或组合的LED光质对不同蔬菜品种进行调控主要作物包括菠菜^[38-39]、甜菜^[40]、紫苏^[41]等,并取得了喜人的成就。在植物组织培养领域,采用LED提供照明,调控组培植物生长的光环境,不仅有利于植物的生长发育和形态建成,同时能够大大降低耗损,节约成本^[42]。由此可以看出,利用LED并将其推广于蔬菜栽培的潜力巨大。然而光环境对生菜生长发育及品质产量的影响并未得到重视。

2 我国生菜设施栽培研究现状

目前,我国在生菜生产方面虽然逐渐形成一套相对完善的管理模式,如采用多层立体栽培方式替代平面苗床技术,运用管道化喷雾栽培理念对传统喷雾器的手工作业进行创新设计等^[43],并取得了喜人的成果。然而也发现,实际生产中,在对生菜进行有效管理体系方面还值得进一步深入探讨和创新,尤其在影响生菜生长的5个主要因子,即光、温、水、气、肥方面应该做到更为标准化和规范化的管理。以光因子为例,目前,已有一定数量有关光质对生菜生长和品质方面的研究,但发表的研究成果数量不多,质量也不高,是一个亟待加强研究的领域。同时,课题组发现纵然有相关文献提及光对生菜生长发育及品质影响的研究,然而不同学者的研究结论有所不同。如SOWBIYA等^[44]研究了绿光、红光和蓝光LED对生菜多蛋白复合物和特性的影响,结果表明生菜的生物量和光合参数随3种LED色光强度的增加而增加。因此,在设施园艺作物生长发育中光质调控的作用具有一定的复杂性,生物效应庞大,需要进行系统研究和逐一解析,仔细区分有益作用和负效应,提高栽培技术^[12]。

3 生菜生长过程中存在的问题

从世界范围来看,早在20世纪20年代,发达国家就开始发展绿色蔬菜^[45]。随后近100年的发展过程中,现代农业获得了突破性的进展。随着石油农业时代的到来,化肥、农药的大量施用,导致西方国家出现了农产品过剩^[46]。与此同时,农业生态环境也遭到了严重的破坏,农产品污染问题日渐突出^[45]。在长期的消费过程中,随着人们对生菜品质和口味等要求的提高,希望下胚轴能够更为甜脆、粗壮^[43]。但由于传统生菜的栽培与生产方式很难满足广大消费市场的需求,生产商们转而使用如植物生长调节剂和微量元素等化学方式,以求能够在短期内促进生菜的生长发育及体内功能性化学物质的快速积累。然而大量施用化肥和农药的结果,虽然在短期内可以使生菜的产量有所增加,但从长远来看,在连续栽培条件下,土壤中原有的营养素浓度及营养元

素的比例因化肥的施用和生菜的选择性吸收而逐渐偏离正常值,并随着栽培时间的增加而进一步加剧,导致土壤肥力严重下降,生菜栽培效益逐年递减。更为严重的是,在多茬种植后土壤中积累了大量的生菜根系分泌物,这些分泌物经过一系列化学反应转化成对土壤和生菜有害的自毒物质,从而造成了生菜的连作障碍。

此外,生菜属喜阴作物,种子发芽的最低温度约为4~8℃,发芽的最适温度为15~20℃。高纬度地区以及其他大多数地区(如我国南方地区)冬春季节多雨雪、阴天气候,且空气污染指数近几年由于大规模引入化工及其它重污染型企业而连续攀升,使得太阳的光照条件(光照强度、光质、光照时间)欠缺现象严重,制约着生菜的生长发育及其品质的提高和优质高效的生产。因此,研究和开发安全环保、经济有效的生产技术将成为当今生菜生产的一个重要课题^[31]。植物的光环境调控技术是对植物的生长和发育过程进行相应光环境调控的一种物理手段,符合绿色农业的要求,在蔬菜生产中具有广阔的应用前景^[47]。

4 LED及其在生菜生产中的应用

光不仅能够调节植物的生长发育,而且还能影响其内部的各种次生代谢物的积累^[48]。

已有研究表明,光质能够影响生菜的生长及其体内功能性化学物质的积累。如JOHKKAN等^[14]运用蓝光、红光、蓝光和红光的混合光质的LED灯来照射红叶生菜植株。经过不同光质与光强的配比处理17d后发现,荧光灯培养下的生菜体内的多酚含量和总抗氧化能力显著低于在蓝色LED光照处理下的植株。该试验表明在蓝光下培育幼苗对于促进种植后的生菜植株多酚含量的积累是有效的。LI等^[49]用紫外线A、蓝光、绿光、红光和远红光LED照明灯管来培育幼叶生菜,试验结果表明,与那些在白色光控制下的植物相比,经补充的蓝光处理后,类胡萝卜素增加了12%,经补充的红光作用后,酚类浓度增加了6%。同时,补充蓝光能增加类胡萝卜素的浓度,补充红光能够增加酚类物质浓度。受控光质在使用合适的蓝光或红光作为白光的补充光源后,可能会提高植物功能性化学物质的浓度并增加植物的干质量。由此可见,利用LED光调控技术控制生菜生长及其营养品质的方法是可行的,且具有极大的市场潜力。

与金属卤化物光源、荧光灯或高压钠灯不同,LED所用的固态照明系统具有一些非常独特的优势。它们不仅质量轻、体积小、使用寿命长,而且具有波长和光谱组成可控、带宽窄、发光面的温度低、发热小、亮度高、辐射低、效率高等优点^[24-37]。LED的这些优势,尤其是其光谱的可调控性、技术的不断创新和成熟以及使用量的日益增加(因而价格的日益降低),使得它越来越成为植

物照明光源的首选。

先前的学者们大多将焦点集中于 LED 照明对植物形态学方面影响的研究,并取得了很好的成果^[2,14-15,33,50-56]。近几年,有关 LED 对于植物体内功能性化学物质积累影响的研究也呈现上升的趋势^[13,57-61]。有关将 LED 运用于生菜生产过程中的应用也取得了很大的进展。KOBAYASHI 等^[15]研究了不同光源对水培生菜中叶绿素合成的影响,将这些生菜放在 3 种不同的光质(蓝光 LED、红光 LED 和荧光灯)中培养,结果发现生菜叶中叶绿素的含量在蓝光和荧光灯照射下高于红光照射时的含量。GOTO 等^[62]研究了红叶生菜在相同光合有效量子辐射下,通过使用红色 LED 光和蓝色 LED 光来研究二者对红叶生菜花青素积累的作用,试验结果表明,花青素的浓度随着蓝光比重的增加而增加,说明蓝光照射能够有效促进红叶生菜功能性化学物质的合成。SHOJI 等^[63]研究了红光和蓝光对红叶生菜花青素的积累及花色素苷的合成基因表达的影响,结果表明混合的蓝光和紫外线 B 的照射都可以促进花色素苷的合成。当蓝色光的光强增加后,花色素苷的积累也会有所提高。

5 LED 光调控技术在生菜生产中应用展望

植物对环境的适应,包括对光环境的适应,是在长期演化过程中获得的,对植物在不同环境条件下的生长发育乃至生存具有重要意义。光是影响植物生长发育的重要因子之一^[43],对植物的生长、形态建成乃至植物体内的基因表达均具有重要的调控作用。通过对植物生长的光环境进行适当的调节,已经逐渐成为取代传统农业种植的一种新型智能农业趋势^[64]。生菜作为研究光对蔬菜类生长发育和营养品质指标的影响的重要对象之一,不仅生长周期短,而且经济实惠,营养价值高。

由于上述提到的 LED 的诸多优点,再加上其发光效率高,响应快^[12],且在实际生产中,LED 光源的光密度和光质配比组合还可以根据作物生长的需求进行更为精确的调节和配置,有利于生产出更为高产、高效的绿色环保的农作物。随着近几年科技的不断发展,其制造和使用成本越来越低,优越性也得到更为充分的体现^[33-34,61,65]。因此在植物组织培养、植物工厂化育苗、设施园艺栽培等领域得到了广泛的应用。但目前有关 LED 光调控技术在生菜生产中的应用尚缺乏更为全面和深入的理论基础研究和成熟的技术,国内有关 LED 对生菜生长发育和营养品质影响的报道也较为少见,是亟待加大研究力度的领域。

运用人工光进行栽培的技术是通过类似光催化反应进行的,是通过对外部条件的控制,同时利用不同光质组合和光照模式来促进植物的光合作用、生长发育和有效物质的合成,最终达到增产增质的目的。相比传统仅通过化肥或激素等方法来增加植物内部营养结构的

方式而言,光照方式不仅环保、副作用小,而且不必过多顾虑有关食品安全和生态环境方面的问题。纵然如此,在实现 LED 光环境调控在诸如生菜等作物的生产运用过程中,仍然存在不少值得进一步解决的问题,这些问题的研究和解决将有助于在今后的研究中能够给出更有说服力和可重复性的结果。

首先,对光源描述的准确性还有待于提高。以光质为例,光质与光谱的能量分布或光谱的组成有关,它是指光环境中影响植物光合与形态建成的波长成分的组成状况^[12]。早期许多学者在进行有关光质对植物生长及形态建成的影响方面的研究中,大多采用彩色荧光灯、彩色玻璃纸、滤光片等来获得光质,不仅无法精确和定量地对光谱能量分布进行调制,由此得到的各种光照的光质纯度的效果也并不相同^[66],纵使研究对象是在完全相同环境下生长的同种植物的同一个时期,不同的光质纯度所产生的效果仍然不一样。对于光质不纯的现象,通常不能用肉眼进行判断,这就给相同光质研究结果的互相比较带来了一定的困难^[48,66]。更为重要的是,在设施园艺的各个领域中,不同种类植物、植物的不同生长发育的年龄和状态阶段,以及不同组织或者器官对同一光质的反应也不相同,表现出光生物学的复杂性^[66]。而且,植物光环境调控的组成因子除了光质外,还有光照模式、光强等因素,继而增加了光质调控的复杂性。在应用研究的领域,虽然以经济效益为目标而不必对光质进行非常严格的控制和界定,但至少应该说明光质的组成或是如何得到对应的光质,否则后人就很难重复他们的试验。

其次,许多有关光源在生菜生产中应用的研究只是单纯地通过控制其它变量来进行研究单一变量对植物生长发育的影响。且不考虑所控制变量方法的可靠性,单从现有的文献和数据来看,有关光环境参数的生物学响应机制尚处于模糊的层面,更加缺乏针对某个具体园艺作物之特定生物学指标的光环境参数体系,因此建立更为完善的光环境管控策略迫在眉睫。迄今为止,我国有关植物光调控技术的机理研究和推广运用还处于基础阶段,需要进一步加强与国际有关方面的优势国家进行合作,通过深入探索和挖掘相关的基础理论来更好地将其运用于适合我国实际国情的光配方和光环境管理策略。

再者,有关植物光调控技术及其配套的调控系统设施仍有待进一步完善。比如,现有的许多有关植物生长发育的植物培养箱基本上都存在光照不均匀的现象,在实际的基础研究中便无法用来做更为精确和定量的研究。福建农林大学光电子农业工程与技术研究中心通过自主研发的基于植物生长特性的均光植物培养架用来对多种植物进行生长和营养品质方面的研究,取得了很好的效果^[67]。同时,所设计的有色薄膜自适应跟踪与

更换系统和彩色漫射玻璃温室在很大程度上解决了当前温室系统中只能调控光强不能调控光质的现状^[68-69],而基于植物生长特性和规律的流水线式植物工厂的实现方法则有效地解决了植物生产过程中的指导跟踪和光利用率优化等问题^[70]。可以看出,经过国内学者的不懈努力,在这方面的研发过程中取得了一些突破性成效。

总之,迄今为止学者们虽然在植物光调控技术方面的研究取得了很好的结果,但在研究过程中还有一些问题需要进一步的精确化和精细化。现设想对每一种植物的生长过程,能通过试验较为精确地确定在各个生长时期的最佳光照条件,并对结果给出适当的理论解释,从而在生产上可以实现类似流水线的跟踪生长方式,以便实现对整个生产过程的优化管理。一旦找到这种最优化的生产条件,就可以将这些结果进行的推广,实现大面积的种植,从而产生更大的社会和经济效益。

参考文献

- [1] JOHKKAN M, SHOJI K, GOTO F, et al. Effect of green light wavelength and intensity on photomorphogenesis and photosynthesis in *Lactuca sativa*[J]. Environmental and Experimental Botany, 2012, 75: 128-133.
- [2] SUNG W J, SEMIN P, JONG S J, et al. Influences of four different light-emitting diode lights on flowering and polyphenol variations in the leaves of chrysanthemum(*Chrysanthemum morifolium*)[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(39): 9793-9800.
- [3] 张欢. 光环境调控对植物生长发育的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2010.
- [4] 高荣孚, 张鸿明. 植物光调控的研究进展[J]. 北京林业大学学报, 2004, 24(5): 235-243.
- [5] MCNELLIS T W, DENG X W. Light control of seedling morphogenetic pattern[J]. Plant Cell, 1995, 7(11): 1749-1761.
- [6] BRIGGS W R, CHRISTIE J M. Phototropins 1 and 2: Versatile plant blue-light receptors[J]. Trends in Plant Science, 2002, 7(5): 204-210.
- [7] GRUSZECKI W I, LUCHOWSKI R, ZUBIK M, et al. Blue-light-controlled photoprotection in plants at the level of the photosynthetic antenna complex LHClI[J]. Journal of Plant Physiology, 2010, 167(1): 69-73.
- [8] WHITELAM G C, HALLIDAY K J. Light and plant development[M]. UK: Blackwell Publishing Ltd, 2007.
- [9] MORTENSEN L M, STRØMME E. Effects of light quality on some greenhouse crops[J]. Scientia Horticulturae, 1987, 33(87): 27-36.
- [10] ESKINS K. Light-quality effects on *Arabidopsis* development. Red, blue and far-red regulation of flowering and morphology[J]. Physiologia Plantarum, 1992, 86(3): 439-444.
- [11] ESKINS K, WARNER K, FELKER F C. Light quality during early seedling development influences the morphology and bitter taste intensity of mature lettuce (*Lactuca sativa*) leaves[J]. Journal of Plant Physiology, 1996, 147(6): 709-713.
- [12] 刘文科. LED光源及其设施园艺应用[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2012.
- [13] TUAN P A, THWE A A, KIM Y B, et al. Effects of white, blue, and red light-emitting diodes on carotenoid biosynthetic gene expression levels and carotenoid accumulation in sprouts of tartary buckwheat (*Fagopyrum tataricum* Gaertn.)[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2013, 61(50): 12356-12361.
- [14] JOHKKAN M, SHOJI K, GOTO F, et al. Blue light-emitting diode light irradiation of seedlings improves seedling quality and growth after transplanting in red leaf lettuce[J]. Hortscience a Publication of the American Society for Horticultural Science, 2010, 45(12): 1809-1814.
- [15] KOBAYASHI K. Light-emitting diodes (LEDs) for miniature hydroponic lettuce[J]. Optics and Photonics Journal, 2013, 3(1): 74-77.
- [16] ALOKAM S, CHINNAPPA C C, REID D M. Red/far-red light mediated stem elongation and anthocyanin accumulation in *Stellaria longipes*: Differential response of alpine and prairie ecotypes[J]. Canadian Journal of Botany, 2011, 80(1): 72-81.
- [17] 杜建芳, 廖祥儒, 叶步青, 等. 光质对油菜幼苗生长及抗氧化酶活性的影响[J]. 植物学报, 2002, 19(6): 743-745.
- [18] 齐敏, 陈海丽, 唐晓伟, 等. 不同来源菠菜品种营养品质分析与评价[J]. 中国蔬菜, 2009(22): 20-27.
- [19] 刘如石, 邱义兰, 黎建文, 等. 生菜矿质养分特性的品种差异比较研究[J]. 生命科学研究, 2005(3): 258-262.
- [20] 严妍, 雷波, 汪力威, 等. 不同昼夜温度对水培生菜生长和品质的影响[J]. 长江蔬菜, 2011(24): 39-42.
- [21] 陈文昊, 徐志刚, 刘晓英, 等. LED光源对不同品种生菜生长和品质的影响[J]. 西北植物学报, 2011, 31(7): 1434-1440.
- [22] 林魁, 徐永. LED照明对植物体内功能性化学物质积累的影响[J]. 植物学报, 2015, 50(2): 263-271.
- [23] 李式军. 设施园艺学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002.
- [24] JANG D, PARK S J, YOON S J, et al. The orientation effect for cylindrical heat sinks with application to LED light bulbs[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 71(3): 496-502.
- [25] JANG D, YOON S J, LEE K S. Optimum design of a radial heat sink with a fin-height profile for high-power LED lighting applications[J]. Applied Energy, 2014, 116(3): 260-268.
- [26] NARENDHAN N, GU Y. Life of LED-based white light sources[J]. Journal of Display Technology, 2005, 1(1): 167-171.
- [27] STERANKA F M, BHAT J, COLLINS D, et al. High power LEDs-technology status and market applications[J]. Physica Status Solidi, 2002, 194(2): 380-388.
- [28] SPIAZZI G, BUSO S, MENEGHESSO G. Analysis of a high-power-factor electronic ballast for high brightness light emitting diodes[C]//Power Electronics Specialists Conference, 2005. PESC'05. IEEE 36th. IEEE, 2005: 1494-1499.
- [29] TAMULAITIS 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.
- [30] CHENG Y, XU G, ZHU D, et al. Thermal analysis for indirect liquid cooled multichip module using computational fluid dynamic simulation and response surface methodology[J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2006, 29(1): 39-46.
- [31] CHENG Y K, CHENG K W E. General Study for using LED to replace traditional lighting devices[C]//Power Electronics Systems and Applications, 2006. ICPESA'06. 2nd International Conference on. IEEE, 2006: 173-177.
- [32] BOURGET C M. An introduction to light-emitting diodes[J]. HortScience, 2008, 43(7): 1944-1946.
- [33] MASSA G D, KIM H H, WHEELER R M, et al. Plant productivity in response to LED lighting[J]. HortScience, 2008, 43(7): 1951-1956.
- [34] MORROW R C. LED lighting in horticulture[J]. HortScience, 2008, 43(7): 1947-1950.
- [35] JANG D, YU S H, LEE K S. Multidisciplinary optimization of a pin-fin

- radial heat sink for LED lighting applications[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2012, 55(55): 515-521.
- [36] RODRÍGUEZ-VIDAL E, OTADUY D, ORTIZ D, et al. Optical performance of a versatile illumination system for high divergence LED sources[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2014, 125(5): 1657-1662.
- [37] WU S J, HSU H C, FU S L, et al. Numerical simulation of high power LED heat-dissipating system[J]. Electronic Materials Letters, 2014, 10(2): 497-502.
- [38] YANAGI T, OKAMOTO K. Utilization of super-bright light emitting diodes as an artificial light source for plant growth[J]. Acta Horticulturae, 1997, 418(418): 223-228.
- [39] YORIO N C, GOINS G D, KAGIE H R, et al. Improving spinach, radish, and lettuce growth under red light-emitting diodes (LEDs) with blue light supplementation[J]. Hortscience a Publication of the American Society for Horticultural Science, 2001, 36(2): 380-383.
- [40] SHIN K S, MURTHY H N, HEO J W, et al. Induction of betalain pigmentation in hairy roots of red beet under different radiation sources[J]. Biologia Plantarum, 2003, 47(1): 149-152.
- [41] CHOI Y W, AHN C K, KANG J S, et al. Growth, photomorphogenesis, and photosynthesis of perilla grown under red, blue light emitting diodes and light intensities[J]. Journal of the Korean Society for Horticultural Science, 2003, 44(3): 75.
- [42] JORDAN K A, NORIKANE J, TAKAKURA T. Control of led to achieve light quality and intensity in tissue culture and micro-propagation studies[J]. Acta Horticulturae, 2001, 562: 135-140.
- [43] 崔瑾, 张晓燕, 鲁燕舞. LED光调控技术在芽苗菜生产中的应用[J]. 科技导报, 2014(10): 32-35.
- [44] SOWBIYA M, EUN J K, JEONG S P, 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]. International Journal of Molecular Sciences, 2014, 15(3): 4657-4670.
- [45] 黄成彬. 潍坊市绿色蔬菜生产问题分析与发展对策探讨[D]. 泰安: 山东农业大学, 2006.
- [46] 李守仁. 山东省蔬菜安全生产管理问题研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2010.
- [47] 马超, 张欢, 郭银生, 等. LED在芽苗菜生产中的应用及前景[J]. 中国蔬菜, 2010(20): 9-13.
- [48] 李汉生, 徐永. 光照对叶绿素合成的影响[J]. 现代农业科技, 2014(21): 161-164.
- [49] LI Q, KUBOTA C, LI Q, et al. Effects of supplemental light quality on growth and phytochemicals of baby leaf lettuce[J]. Environmental and Experimental Botany, 2009, 67(1): 59-64.
- [50] COPE K R, BUGBEE B. Spectral effects of three types of white light-emitting diodes on plant growth and development: absolute versus relative amounts of blue light[J]. HortScience, 2013, 48(4): 504-509.
- [51] FOLTA K M, KOSS L L, MCMORROW R, et al. Design and fabrication of adjustable red-green-blue LED light arrays for plant research[J]. BMC Plant Biology, 2005, 5(2): 533-705.
- [52] 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.
- [53] ILIEVA I, IVANOVA T, NAYDENOV Y, et al. Plant experiments with light-emitting diode module in Svet space greenhouse[J]. Advances in Space Research, 2010, 46(7): 840-845.
- [54] WATANABE H. Light-controlled plant cultivation system in Japan-development of a vegetable factory using LEDs as a light source for plants[J]. Acta Horticulturae, 2011, 907(2): 37-44.
- [55] BULA R J, MORROW R C, TIBBITTS T W, et al. Light-emitting diodes as a radiation source for plants[J]. Hortscience a Publication of the American Society for Horticultural Science, 1991, 26(2): 203-205.
- [56] GUPTA S D, JATOTHU B. Fundamentals and applications of light-emitting diodes (LEDs) in *in vitro* plant growth and morphogenesis[J]. Plant Biotechnology Reports, 2013, 7(3): 211-220.
- [57] LI J, HIKOSAKA S, GOTO E. Effects of light quality and photosynthetic photon flux on growth and carotenoid pigments in spinach (*Spinacia oleracea* L.) [C]//VI International Symposium on Light in Horticulture, 2009, 907: 105-110.
- [58] WU M C, HOU C Y, JIANG C M, et al. A novel approach of LED light radiation improves the antioxidant activity of pea seedlings[J]. Food Chemistry, 2007, 101(4): 1753-1758.
- [59] LEFSRUD M G, KOPSELL D A, SAMS C E. Irradiance from distinct wavelength light-emitting diodes affect secondary metabolites in kale[J]. Hortscience, 2008, 43(7): 2243-2244.
- [60] LEONARDO G, GAETANO P, PATRIZIA P, et al. Manipulation of the blue light photoreceptor cryptochrome 2 in tomato affects vegetative development, flowering time, and fruit antioxidant content[J]. Plant Physiology, 2005, 137(1): 199-208.
- [61] REN J, GUO S, XU C, et al. Effects of different carbon dioxide and LED lighting levels on the anti-oxidative capabilities of *Gynura bicolor* DC[J]. Advances in Space Research, 2014, 53(2): 353-361.
- [62] GOTO E. Plant production in a closed plant factory with artificial lighting[J]. VII International Symposium on Light in Horticultural Systems, 2012, 956(1): 37-49.
- [63] SHOJI K, GOTO E, HASHIDA S, et al. Effect of red light and blue light on the anthocyanin accumulation and expression of anthocyanin biosynthesis genes in red-leaf lettuce[J]. Shokubutsu Kankyo Kogaku, 2010, 22(2): 107-113.
- [64] 崔瑾, 徐志刚, 邸秀茹. LED在植物设施栽培中的应用和前景[J]. 农业工程学报, 2008, 24(8): 249-253.
- [65] VANNINEN I, PINTO D M, NISSINEN A I, et al. In the light of new greenhouse technologies: 1. Plant-mediated effects of artificial lighting on arthropods and tritrophic interactions[J]. Annals of Applied Biology, 2010, 157(3): 393-414.
- [66] 童哲. 光质纯度对幼苗光形态建成的影响[J]. 植物生理学通讯, 1989(2): 28-31.
- [67] 徐永, 阮凯斌, 陈美香, 等. 光电子农业工程与技术: 一门新兴的综合性交叉学科[J]. 农业工程, 2014(S1): 30-34.
- [68] 邹腾跃, 徐永, 王鑫. 基于植物生长特性的温室有色薄膜自适应跟踪与更换系统: 中国. 201410014909. 2[P/OL]. 2015-08-12[2015-12-09]. <http://www.pss-system.gov.cn/sipublicsearch/search/searchHome-searchIndex.shtml?params=991CFE73D4DF553253D44E119219BF31366856FF4B152226CAE4DB031259396A>.
- [69] 徐永, 陈美香. 一种基于植物生长特性的彩色漫射玻璃温室: 中国. 201410204879. 1[P/OL]. 2015-09-09[2015-12-09]. <http://www.pss-system.gov.cn/sipublicsearch/search/searchHome-searchIndex.shtml?params=991CFE73D4DF553253D44E119219BF31366856FF4B152226CAE4DB031259396A>.
- [70] 徐永, 吴义炳. 基于植物生长特性和规律的流水线式植物工厂的实现方法: 中国. 201310414613. 5[P/OL]. 2015-09-09[2015-12-09]. <http://www.pss-system.gov.cn/sipublicsearch/search/searchHome-searchIndex.shtml?params=991CFE73D4DF553253D44E119219BF31366856FF4B152226CAE4DB031259396A>.

技术性贸易壁垒对我国食用菌出口贸易影响的实证分析

李 平¹, 武雪凡¹, 王维薇²

(1. 湖北工业大学 经济与管理学院, 湖北 武汉 430068; 2. 湖北农村发展研究中心, 湖北 武汉 430070)

摘 要:在分析我国食用菌产业发展及贸易现状基础上,以中美食用菌贸易为例构建引力模型,论证了技术性贸易壁垒对中国食用菌贸易的影响。结果表明:近 10 年来,我国食用菌出口量和出口额总体上呈增长趋势,部分年份由于受贸易壁垒等因素影响有所减少;出口品种主要为罐头类食用菌和干品类食用菌;我国食用菌出口的市场结构与输出地居民生活习惯相关性较强;引力模型显示美国的 GNI、中美两国之间的汇率、我国设置的技术性贸易壁垒项数等因素未通过显著性检验,对食用菌出口影响较小;技术性贸易壁垒对我国食用菌出口影响显著为负,影响程度随着壁垒项数的增加而增强,另外我国的 GDP 与食用菌出口呈正相关关系,表明 GDP 增长可以带动我国食用菌产业的发展。

关键词:食用菌贸易;技术性贸易壁垒;出口;实证分析

中图分类号:S 646 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2016)22-0203-07

食用菌产业作为生态富民的朝阳产业,对于促进我国农业产业结构调整,发展绿色农业具有重要意义。多年来,我国食用菌生产量雄居世界首位,贸易总量在国际范围内也具有明显优势,然而自 2001 年我国加入

WTO 后,各成员国纷纷设置各种非关税壁垒,如日本《肯定列表制度》、比利时《BPA 禁令》、美国《含铝食品添加剂使用条件和标准》等政策直接影响我国食用菌出口。事实上技术性贸易壁垒是国际贸易中的普遍现象,但是针对同一类商品设置如此众多的贸易壁垒尚不多见,因此如何采取相应举措、规避上述贸易壁垒成为重要话题。国内学者在食用菌出口面临技术性贸易壁垒的研究上,杨叶^[1]的研究明确指出,技术性贸易壁垒已成为我国食用菌出口的主要障碍之一,并严重影响了我国食品出口企业的国际竞争力。门殿英等^[2]则从宏观经济角度,通过案例分析了我国食用菌出口现状,并就

第一作者简介:李平(1985-),男,湖北潜江人,博士,讲师,现主要从事资源技术经济与创新管理及区域可持续发展等研究工作。E-mail:dixiaheliping@163.com.

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(71503074);国家现代食用菌产业技术体系专项资助项目(CARS-024);湖北工业大学博士科研启动资助项目(BSQD14057)。

收稿日期:2016-08-04

Application of LED Light Control Technology in Lettuce Factory Cultivation

LIN Kui¹, XU Yong²

(1. College of Horticulture, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002; 2. Center of Excellence for Research in Optoelectronic Agriculture, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002)

Abstract: In recent years, lettuce is becoming one of the main vegetable species in the soilless facility cultivation. The use of light environment control technology to control the growth and development of plants has the advantages of high efficiency, energy saving, environmental protection, harmless and so on. This study summarized the current state in the cultivation of lettuce in China, expounded the present situation of the application of LED's in the cultivation of lettuce, and discussed the problems one has to pay attention to in the application of LED cultivation. Finally, it pointed out the possible prospect in such applications.

Keywords: lettuce; LED; light regulation; light environment