

植物工厂的发展策略

杨其长

中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所,农业部设施农业节能与废弃物处理重点实验室,北京 100081

摘要 植物工厂作为技术高度密集、资源高效利用的省力型生产方式,近年来在一些国家(如中国、日本、韩国、荷兰等)得到快速发展。分析了植物工厂快速发展的背景,阐述了发展植物工厂的重要意义,介绍了植物工厂的发展现状及人工光源、节能环控、蔬菜品质调控、基于网络的智能化管控等关键技术的研究进展。针对植物工厂面临的问题,提出了进一步发展的相应对策。

关键词 植物工厂;人工光源;品质调控

中图分类号 S626.9

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.10.002

Developmental Strategy of Plant Factory

YANG Qichang

Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences; Key Laboratory of Energy Conservation and Waste Management of Agricultural Structures, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China

Abstract Plant factory, as a kind of technology-intensive, resource-efficient agricultural production pattern, has developed rapidly in several countries, i.e., China, Japan, Korea and Netherlands in the past decade. In this paper, the developmental background, significance, current status, and some key techniques of plant factory are summarized and analyzed. Moreover, current problems and future developmental strategy of plant factory are put forward.

Keywords plant factory; artificial light source; quality control

植物工厂是一种通过设施内高精度环境控制,实现作物周年连续生产的高效农业系统,是由计算机对作物生育过程的温度、湿度、光照、CO₂浓度、营养液等环境要素进行自动控制,不受或很少受自然条件制约的省力型生产方式^[1]。由于植物工厂充分运用了现代装备工程、生物技术、营养液栽培与信息技术等手段,技术高度密集,多年来一直被国际上公认为设施农业的最高级发展阶段,是衡量一个国家农业高技术水平的重要标志之一。

近年来,随着世界人口、资源、环境问题的日益突出,植物工厂更是受到了前所未有的关注,主要原因有:1)人口的持续增长,耕地资源的不断减少。据联合国预测,到2050年全球人口将达95亿人,食物需求将比现在增加70%以上,而人均耕地面积在近30年从0.33 hm²下降至0.22 hm²以下,降幅至少达33.3%。到2050年,中国人口将达16.4亿人,耕地面积将由现在的1.22亿hm²下降至9647万hm²以下。如何利用有限的资源满足人们日益增长的食物需求,已经成为世

界各国尤其是资源紧缺的国家必须面对的严峻问题,资源高效利用型植物工厂被认为是解决这一问题的重要途径之一^[2];2)药残事件频繁发生,食品安全越来越受到大众关注。目前,杀虫剂和农药的使用仍非常普遍,药残超标的现象时有发生。随着人们生活水平的不断提高,对安全食品的需求也越来越迫切。植物工厂由于不使用或少用农药,所生产的蔬菜洁净无污染,正在受到社会的广泛追捧;3)农业从业人口老龄化,年轻人不愿务农的现象日趋严重。据统计,日本2006年从事农业的劳力中60岁以上的人口占68.9%,而40岁以下仅占5%。预计到2016年,农业劳力60岁以上的人口将占82.8%,40岁以下的人口下降至4.7%^[3]。目前中国从事农业生产的劳动力中60岁以上老人已经占60%以上,吸引年轻人务农将是很多国家面临的社会难题。植物工厂以其舒适的工作环境和工厂化方式进行农事的生产与操作,将是吸引年轻人参与农业生产的重要手段。

多年实践表明,植物工厂具有其他生产方式无法比拟的

收稿日期:2014-01-10;修回日期:2014-03-03

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2013AA103001)

作者简介:杨其长,研究员,研究方向为设施园艺与温室工程,电子信箱:yangqichang@caas.cn

引用格式:杨其长.植物工厂的发展策略[J].科技导报,2014,32(10):20-24.

突出优势,表现为作物生产计划性强,可不受外界环境的影响^[4];单位面积产量高,可达到露地栽培的30~40倍^[5];机械化、自动化程度高,劳动强度低;不施用农药,产品安全无污染;多层式、立体栽培,资源(土地、水等)的利用效率高^[6];适宜在非可耕地上生产,不受或很少受耕地的限制;可建立在城市周边或市区,就近生产、就近销售,大大减少物流成本和碳排放^[7,8]。因此,植物工厂被认为是未来解决资源紧缺、新生代劳动力不足、食物需求不断上升等问题的重要途径,也是未来航天工程、月球和其他星球探索过程中实现食物自给的重要手段,受到世界各国的广泛重视^[9]。

1 植物工厂的发展现状

植物工厂的发展始于20世纪50年代欧美等一些发达国家。经过半个多世纪的发展,目前已经成为现代农业高技术产业的重要组成部分。植物工厂的基础主要来自于2项技术的突破:1) 营养液栽培技术。20世纪40年代以来以“矿质营养学说”为理论基础的营养液栽培技术的发展,为植物工厂提供了重要的技术支撑;2) 人工模拟环境与控制技术。以传感器与控制器为核心的环境控制技术的突破,使人工环境调控成为可能。植物工厂正是以这2项技术为基础,实现了植物的周年连续生产。

世界上第一座植物工厂出现于1957年的丹麦约克里斯顿农场,面积为1000 m²,属太阳光利用型(带人工补光),栽培作物为水芹,从播种到收获均采用全自动传送带流水作业;第一个人工光植物工厂于1960年由美国通用电气公司开发成功,随后奥地利卢斯那公司于1963年又建造一座高30 m的塔式人工光植物工厂,利用上下传送带旋转式的立体栽培方式种植生菜。20世纪70年代,美国通用食品公司、赛纳拉鲁米勒斯公司以及依法德法姆公司等多家企业也相继开发出人工光利用型植物工厂。日本植物工厂起步较晚,但发展迅速。1974年日立中央研究所高辻正基等开始进行人工光植物工厂的研究,并于1983年在静冈县三浦农场正式推出第一套商业化植物工厂,采用高压钠灯与三角板气雾栽培生产生菜;1985年千叶县大荣购物中心建成66 m²的人工光植物工厂,日产100棵新鲜无农药莴苣。20世纪90年代以来,植物工厂逐渐在日本普及。目前,国际上植物工厂逐渐形成两种典型模式,一种被称之为人工光利用型植物工厂(狭义),是在完全密闭可控的环境下采用人工光源与营养液栽培技术进行植物工厂化生产的方式。由于系统密闭,受外界气候环境的影响较小,但建设与运行成本较大;另一种被称之为太阳光利用型植物工厂(广义),是在封闭或半封闭的温室环境下,采用自然光(或人工补光)与营养液栽培进行植物工厂化生产的方式。由于系统未完全封闭,受外界气候环境影响较大,有时生产不太稳定,但建设与运行成本相对较低。据统计,目前日本拥有人工光利用型植物工厂约10 hm²、太阳光利用型植物工厂约1000 hm²,韩国分别约为0.5 hm²和300 hm²。由于欧美的统计口径不同,现在尚未获得确切数据。

近年来,随着植物工厂的优势逐渐被人们所认识,世界各国纷纷投入巨资进行植物工厂的研发与推广应用。日本政府从2008年开始启动植物工厂发展计划,由农林水产省出资1000亿日元、经济贸易工业省出资500亿日元补助科研单位、企业和农户,5年间新增了100多座植物工厂。韩国自2009年以来,开始进行植物工厂的示范推广,目前已推出10多个型号的植物工厂产品;美国一方面通过植物工厂的研究希望为空间站和星球探索提供食物保障,另一方面还提出了“摩天大楼农业”的构想,希望利用植物工厂技术解决人类未来的食物供给难题;欧洲各国也在从节能和降低运行成本的角度进行植物工厂的研发,尤其是利用计算机系统实现植物工厂的智能化监控,使运行成本大为降低。

中国植物工厂起步较晚,分别于1998年、1999年从加拿大引进2套太阳光利用型植物工厂,一套放置在深圳,面积为1.33 hm²;一套放置在北京顺义,面积为1.5 hm²,均采用深池水培方式进行生菜的生产。中国对植物工厂的研究起步于2002年,主要进行植物工厂水耕栽培及其相关系统的试验研究;国内第一个人工光植物工厂试验系统于2006年在中国农业科学院建成,2009年在此基础上扩大为100 m²,光源全部采用发光二级管(LED);国内第一例商业化人工光利用型植物工厂于2009年9月在吉林长春建成,面积为200 m²,由160 m²蔬菜工厂和40 m²植物苗工厂两部分组成,蔬菜工厂采用荧光灯,植物苗工厂采用LED光源。2010年5月,全球首款“低碳·智能·家庭植物工厂”由中国科学家研制成功并在上海世博会展出。随后,北京通州、山东寿光、辽宁沈阳、广东珠海、江苏南京等地相继建成了20多座人工光和太阳光利用型植物工厂。中国植物工厂的快速发展和技术突破,标志着中国已经在该领域逐渐进入世界先进行列。

2 植物工厂的关键技术

近年来,国际上植物工厂技术研发极为活跃,一方面不断引入和应用高新技术成果,朝着更加智能化精准控制的方向发展;另一方面朝着更加节能和低运行成本的实用化方向发展,以实现技术的普及化。

2.1 人工节能光源技术

就人工光植物工厂而言,人工光源的电能消耗约占植物工厂总体能耗的80%^[10-12]。因此,节能光源技术一直是植物工厂研究的重点。早期植物工厂使用的人工光源主要有高压钠灯、荧光灯等,近年来,随着节能光源的开发,冷阴极管荧光灯、混合电极荧光灯以及LED等开始得到应用^[13]。

由于荧光灯明显优于高压钠灯,最近十几年来已经成为人工光植物工厂的主要光源。同时针对荧光灯黄光成分较多、红光不足的问题,开发出了增加红光成分的植物工厂专用荧光灯。近年来,在荧光灯基础上还研制出了几种新型荧光灯,如冷阴极管荧光灯(CCFL)、混合电极荧光灯(HEFL)等,寿命长达数万小时,光谱性能好,可比普通荧光灯节能30%以上,而且构造极其简单,成本较低,备受植物工厂用户关注。

近年来,发展最快的人工光源是LED。LED具有单色可组合、发热少、寿命长、无污染等诸多优点。随着LED价格的不断下降,越来越多的植物工厂正在选用LED作为人工光源^[3]。LED在植物工厂的应用起步于1994年,日本东海大学高辻正基、大阪大学中山正宣使用波长为660 nm的红色LD加上5%的蓝色LED的组合光源进行生菜和水稻栽培,获得成功。1997年渡边博之采用水冷模板LED光源在植物工厂内种植生菜和芹菜等蔬菜,定植2周后即可收获。2009年2月,日本Fairy Angel公司与LED照明厂商CCS联手,开发出专用于植物工厂的LED光源。近年来,荷兰瓦赫宁根大学与飞利浦公司合作进行LED植物人工补光研究,并推出了多个型号的LED光源。

中国LED应用于植物工厂的研究起步于2006年,中国农业科学院建立了一座20 m²的小型人工光植物工厂,采用LED光源进行人工光叶菜栽培、育苗以及药用植物培植的试验研究,2009年试验系统扩建为100 m²。目前,山东寿光、北京、广东珠海、江苏南京等地10多座植物工厂采用LED作为人工光源,LED在植物工厂的应用越来越普及。

2.2 节能环境调控技术

人工光植物工厂的能耗主要包括人工光源(80%)、空调(16%)及营养液循环系统(4%)等^[12]。为减少系统的运行费用,在人工光源节能技术基础上,研究人员正在研究如何减少植物工厂空调的能耗,主要包括热泵调温技术、光温耦合节能调温技术等。

热泵调温节能技术由于热性能系数(COP)较高,甚至达到7.0以上,节能效果明显,近年逐渐在植物工厂得到应用^[14,15]。与其他温度调控方式相比,热泵的优势有:1)节能。据Tong等^[16]研究表明,用空气源热泵进行温室冬季夜晚加温比用燃油机节能20~60%;2)减少温室气体(如CO₂)排放;3)具有湿度调控作用;4)增加室内空气循环。在人工光植物工厂中,由于围护结构保温性能较好,主要选用热泵进行降温;在太阳光植物工厂中,热泵主要用于夏季夜晚降温,冬季加温。由于室内制冷、制热负荷受太阳辐射、室内外温度差影响较大,选用热泵夏季降温和冬季加温时,有时还需结合其他辅助设施,如夏季结合喷雾降温,冬季结合加温装置等,进行联合调控。

光温耦合节能调温技术的核心思想是利用室外的气候资源用于植物工厂的温度调节,以达到减少能耗的目的。人工光植物工厂内部的热量平衡主要有4部分组成,即人工光源产热、空调调温、围护结构传热、通风换气热交换等,由于光源数量一定,故光期阶段,光源的散热量相对不变;围护结构的传热与材料性能、室内外温差相关,一般植物工厂选择绝热程度较高的材料,该值相对较小;因此,空调调温的能耗与通风换气热交换密切相关。根据室外温度一年四季及日变化情况,结合光源产生的热量,引进室外冷源进行植物工厂的温度调控,可大大节约能耗。通过在北京的试验表明^[17],室外空气温度在-4~12℃变化时,应用光温耦合技术进行植

物工厂的温度调控,明暗期节省的降温耗电量分别为24.6%~63.0%和2.3%~33.6%。

2.3 蔬菜品质调控技术

蔬菜是人体摄入硝酸盐的主要来源,其贡献率达到80%以上,但硝酸盐进入人体后,可转化形成亚硝酸盐,导致高血红蛋白血症的发生;或者与二级胺结合形成强致癌物亚硝胺,诱发人体消化系统的癌变,对人类健康构成潜在的危害^[18]。研究表明,硝酸盐对婴幼儿的身体危害会更为严重。为此,世界各国制定了蔬菜硝酸盐限制标准,以保障蔬菜品质安全和人类健康。国际上的蔬菜硝酸盐含量标准考虑了季节要素,并区分设施栽培与露地栽培两类种植类型。1973年世界卫生组织(WHO)和联合国粮农组织(FAO)制订的食品硝酸盐限量标准规定的ADI值(每日容许摄入量)为3.65 mg/kg(体质量)。此外,蔬菜是人类摄取维生素C的主要来源,研究表明,人类膳食中90%以上的维生素C来自蔬菜和水果。中国居民有偏食蔬菜的饮食习惯,尤其对叶菜类蔬菜消费更大,因此,蔬菜中维生素C含量的高低影响中国居民的维生素C摄入量。中国营养学会推荐的成人维生素C的每日最低摄入量为100 mg。而且,已颁布的行业标准(NY/T743)对绿色食品中绿叶类蔬菜中的维生素C含量做了限定(生菜≥100 mg/kg,菠菜≥300 mg/kg)。因此,富含维生素C的蔬菜产品对保证公众维生素C的充足摄取具有重要意义。因此,植物工厂叶菜生产过程中,采用调控措施降低叶菜中硝酸盐含量,提高维生素C含量是提高其产品营养品质的重要内容。

目前,降低植物工厂蔬菜硝酸盐含量、提高品质的方法主要有采收前断氮处理技术、采收前连续光照处理技术2种。断氮调控是指在叶菜收获前期,将营养液替换成无氮营养液、清水或含有一定量渗透离子(如Ca²⁺)的水溶液,通过几天处理后达到降低叶菜硝酸盐含量,提高营养品质的目的。断氮处理大致有3种方式:1)供应无氮营养液;2)供应清水;3)供应含渗透物质、钼酸铵的水溶液。研究表明,采收前3种断氮方式都能有效降低水培生菜的确态氮含量、提高维生素C和可溶性糖含量^[19-21]。采收前连续光照处理技术指采收前进行2~5 d的连续光照处理,可显著降低硝酸盐含量,提升维生素C和可溶性糖含量。Samuoliene等^[22]发现,与白光相比,红光LED连续光照3 d,显著降低了基质培和水培菠菜中维生素C含量,红光连续光照对维生素C累积起抑制作用。中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所率先提出了利用LED短期连续光照调控植物工厂蔬菜品质的方法,即通过蓝光、红蓝光短期连续光照(光周期为24 h/d)可显著提升叶菜的营养品质。选用LED为光源,通过对光强、光质、连续光照时间的调控,进行采收前短期连续光照对蔬菜硝酸盐含量、可溶性糖及维生素C含量影响的试验研究,结果表明,当LED的红蓝光比值(R/B)为4:1时,连续光照48 h后生菜中的硝酸盐含量最低,与初始值相比,其叶片和叶柄中的硝酸盐浓度显著降低;同时可溶性糖含量最高,与初始值相比,叶片和叶柄中的可溶性糖含量分别提高了数倍^[23-25]。

2.4 基于网络的智能化管控技术

基于网络的智能化管理是植物工厂近年来突破的重点。目前,人工光植物工厂已经能够根据植物在整个生育期的营养与环境需求,实现对植物生长的环境要素(温度、湿度、光照、CO₂浓度、气流等)和营养液要素(电导率、pH值、液温等)的在线实时检测和智能化管控;而且,太阳光利用型植物工厂也能实现对环境与营养要素的实时检测和调控。

通过各种环境与营养液传感器的应用,植物工厂可以实现将各种信息数据传输到计算机系统储存、显示,并经过控制软件进行分析判断后,通过执行机构发出指令完成对植物工厂各子系统的智能化控制。近年来,随着网络技术,尤其是物联网技术的快速发展,植物工厂正在实现通过网络平台进行远端访问、权限修改、程序更新和远程操作等功能,显著提升植物工厂的智能化管控水平和远程管理能力。

3 植物工厂的功能拓展

近年来,植物工厂在实现为人们提供新鲜、安全农产品的同时,也在不断拓展其功能,逐渐融入快速发展的城市生活。通过植物工厂的功能拓展,植物工厂将会延伸到现代城市生活的每一个角落,真正实现植物工厂的无所不在。继上海世博会“低碳·智能·家庭植物工厂”展出后,各种家庭型植物工厂逐渐推出,形成了众多系列的家庭式植物工厂产品,不仅为城市居民提供了绿色的自然空间和体验种植的乐趣,而且还可获得洁净安全的农产品。植物对人的身心都会产生重要影响,现在一些医院也在探索利用植物工厂构建绿色空间,为病人康复提供辅助治疗;一些绿色餐厅正在构建植物工厂,使顾客在就餐时可自己选择新鲜的蔬菜,大大提升了餐饮的趣味性;城市居民对蔬菜的新鲜度越来越关注,一些植物工厂直接建立在超市,顾客可亲自选取新鲜、洁净的蔬菜,不仅可体验采收的乐趣,而且也对蔬菜的安全性增强了信心;此外,植物工厂还可建立在商场、商务会客厅、学校等场所,可为城市居民提供轻松的自然环境,为中小學生提供科普教育的基地。植物工厂技术的应用正在不断地融入城市生活,为都市人的绿色需求提供可靠的保障。

4 问题及建议

4.1 面临的问题及对策

植物工厂虽然取得了快速发展,但也面临诸多问题,如初期建设成本过高、能耗较大、蔬菜品质保障及如何获得经济效益等。

1) 初期建设成本相对较高。植物工厂需要在封闭或半封闭环境下进行作物生产,需要构建包括外围护结构、空调系统、人工光源、多层栽培架、营养液循环、计算机控制系统在内的相关工程与配套装备,投资成本比露地、温室大棚等生产设施相对较高。因此,应着力研究降低初期建设成本的工程技术途径;

2) 能耗较大问题。能耗一直是影响植物工厂发展的主要“瓶颈”,选用节能光源,如LED等,以减少人工光的能耗;采用节能空调机组和优化控制方法,如选用热泵、采用光温耦合控制模式等,以减少空调能耗;同时,积极探索清洁能源,如太阳能、风能或生物质能源等,并在植物工厂中加以利用,已经成为植物工厂研究的热点;

3) 蔬菜品质保障问题。植物工厂主要采用水耕栽培,通过人工配制的营养液进行蔬菜生产,很多人不仅担心植物工厂生产的蔬菜在口感方面与土壤栽培有差距,而且还会担心硝态氮过剩的问题。目前,已经找到了一些提高植物工厂蔬菜的口感风味与营养品质的方法,如通过控制硝态氮的使用、采前短期连续光照以及增施一些微量元素等;

4) 经济效益问题。植物工厂的普及推广与经济效益密不可分,建设与经营单位必须获取显著的效益才愿意去投资。由于初期投入较大、运行成本较高等原因,植物工厂产出的蔬菜比普通农场种植的蔬菜成本要高出50%~200%。要想实现植物工厂的普及,一方面要尽可能降低成本,另一方面要提升植物工厂产品的附加值,实现品牌化销售。

4.2 建议

植物工厂具有显著提升资源利用效率,大幅度提高作物产量,保证食品安全,以及吸引大批有知识年轻人参与、实现农业可持续发展的现代农业特征,是当前或今后一段时期中国设施农业发展的重点研究领域。因此,应该采取积极措施,加大植物工厂研究和开发力度,切实解决植物工厂存在的现实问题,为实现植物工厂的快速发展做出积极贡献。

首先,国家应从战略的高度,加大植物工厂的研究与开发力度。植物工厂是现代农业的重要标志,它的发展在一定程度上反映了一个国家和地区农业高技术发展的水平,同时也是未来国际农业高技术竞争的重要方向。因此,建议国家从战略的高度出发,加大科技研发力度,进行多学科的协同攻关,降低成本,提升效益,尽快实现植物工厂的产业化。

其次,国家应从长远发展考虑,加大对植物工厂的政策和资金扶持力度。植物工厂是一项高投入、高技术、高产出的生产方式,在发展初期,离不开国家政策的扶持。日本发展的经验充分证明了这一点,多年来,日本政府采取补贴50%的手段,推进植物工厂的发展。因此,建议国家从长远的战略高度出发,将植物工厂列入政府重点扶持的产业之中,大力扶持、积极推进、稳步发展。

第三,国家应依照循序渐进的原则,通过试验示范,稳步推进植物工厂的发展。植物工厂的发展离不开所在地区的社会经济环境,区域发展的不平衡以及地区内部的经济差距也影响到植物工厂的发展。因此,在发展战略上,建议国家有关部门制定出长期的发展规划;在建设区域上,可先从经济发达地区和城市开始,在北京、上海、深圳、天津等消费水平高的大都市城郊建设若干个植物工厂示范基地,进而向全国普及推广。

参考文献 (References)

- [1] 杨其长, 张成波. 植物工厂概论[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2005.
Yang Qichang, Zhang Chengbo. Introduction to plant factory[M]. Beijing: China Agricultural Sci-technology Press, 2005.
- [2] Kozai T. Plant factory with artificial light[M]. Tokyo: Ohmsha Ltd., 2012.
- [3] Kozai T. Solar assisted plant factory[M]. 1st ed. Tokyo: Ohmsha Ltd., 2009.
- [4] Fang H. Quantification of performance in plant factory[C]//Yang Qichang, Kozai T, Bot G P A, Technology advances in protected horticulture: Proceedings of 2013 the 3rd high-level international forum on protected horticulture (Shouguang, China). Beijing: China Agricultural Sci-technology Press, 2013.
- [5] Kozai T. Commercialized closed system with artificial lighting for high quality plant production at low cost[C]//Goto E. Collection of extent abstracts of 2004 CIGR international conference (Vol.2). Beijing: 2004 CIGR International Conference, 2004.
- [6] Kozai T. Resource use efficiency of closed plant production system with artificial light: Concept, estimation and application to plant factory[J]. Proceedings of the Japan Academy, Ser. B, Physical and Biological Sciences, 2013, 89(10): 447-461.
- [7] Kozai T. Plant factory in Japan—current situation and perspectives[J]. Chronica Horticulturae, 2013, 53(2): 8-11.
- [8] Kozai T. 2013. Innovation in agriculture: Plant factories with artificial light[J]. APO News, 2013, 43(1): 2-3.
- [9] 杨其长, 魏灵玲, 刘文科. 植物工厂系统与实践[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.
Yang Qichang, Wei Lingling, Liu Wenke. System and practice of plant factory[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2012.
- [10] Ohyama K, Kozai T, Yoshinaga K. Electric energy, water and carbon dioxide utilization efficiencies of a closed-type transplant production system[M]//Ohyama K, Kozai T, Yoshinaga K. Transplant Production in the 21st Century. Berlin: Springer Netherlands, 2000.
- [11] Nishimura M, Kozai T, Kubota C, et al. Analysis of electric energy consumption and its cost for a closed-type transplant production system[J]. Shokubutsu Kojo Gakkaishi, 2001, 13(3): 204-209.
- [12] Ohyama K, Fujiwara M, Kozai T, et al. Consumption of electric energy and water for eggplant plug transplant production in a closed-type transplant production system[J]. Shokubutsu Kojo Gakkaishi, 2001, 13(1): 1-6.
- [13] 杨其长, 徐志刚, 陈弘达, 等. LED光源在现代农业的应用原理与技术进展[J]. 中国农业科技导报, 2011, 13(5): 37-42.
Yang Qichang, Xu Zhigang, Chen Hongda, et al. Principle and technological advances in LED light source application in modern agriculture[J]. Journal of Review of Agricultural Science and Technology, 2011, 13(5): 37-42.
- [14] Tong Y, Kozai T, Nishioka N, et al. Reductions in energy consumption and CO₂ emissions for greenhouse heated with heat pumps[J]. Applied Engineering in Agriculture, ASABE, 2012, 28(3): 401-406.
- [15] Ohyama K, Kozai T, Kubota C, et al. Coefficient of performance for cooling of a home-use air conditioner installed in a closed-type transplant production system[J]. Shokubutsu Kojo Gakkaishi, 2002, 14(3): 141-146.
- [16] Tong Y, Kozai T, Ohyama K. Performance of household heat pumps for nighttime cooling of a tomato greenhouse during the summer[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2013, 29(3): 1-8.
- [17] 王君, 杨其长, 魏灵玲, 等. 人工光植物工厂风机和空调协同降温节能效果[J]. 农业工程学报, 2013, 29(3): 177-183.
Wang Jun, Yang Qichang, Wei Lingling, et al. Energy saving effect on cooperating cooling of conditioner and air exchanger in plant factory with artificial light[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(3): 177-183.
- [18] Eichholzer M, Gutzwiller F. Dietary nitrates, nitrites, and N-nitroso compounds and cancer risk: A review of the epidemiologic evidence [J]. Nutrition Review, 1998, 56(4): 95-105.
- [19] Liu W K, Yang Q C. Short-term treatment with hydroponic solutions containing osmotic ions and ammonium molybdate decreased nitrate concentration in lettuce[J]. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil & Plant Science, 2011, 61(6): 573-576.
- [20] Liu W K, Yang Q C. Spatiotemporal changes of nitrate and Vc contents in hydroponic lettuce treated with various nitrogen-free solutions [J]. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil & Plant Science, 2012, 62(3): 286-290.
- [21] Liu W K, Yang Q C, Du L F. Effects of short-term treatment with light intensities and hydroponic solutions before harvest on nitrate reduction in leaf and petiole of lettuce[J]. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil & Plant Science, 2012, 62(2): 109-113.
- [22] Samuolien G, Urbonaviit A. Decrease in nitrate concentration in leafy vegetables under a solid-state illuminator[J]. HortScience, 2009, 44(7): 1857-1860.
- [23] 周晚来, 刘文科, 闻婧, 等. 短期连续光照下设施生菜品质指标变化及其关联性分析[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(6): 1319-1323.
Zhou Wanlai, Liu Wenke, Wen Jing, et al. Changes in and correlation analysis of quality indices of hydroponic lettuce under short-term continuous light[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(6): 1319-1323.
- [24] Zhou W L, Liu W K, Yang Q C. Reducing nitrate concentration in lettuce by elongated lighting delivered by red and blue LEDs before harvest[J]. Journal of Plant Nutrition, 2013, 36(3): 481-490.
- [25] Zhou W L, Liu W K, Yang Q C. Quality changes of hydroponic lettuce under pre-harvest short-term continuous light with different intensity[J]. Journal of Horticultural Science & Biotechnology, 2012, 87(5): 429-434.

(责任编辑 吴晓丽)

《科技导报》“卷首语”栏目征稿

“卷首语”栏目每期邀请一位中国科学院院士和中国工程院院士就重大科技现象、事件,以及学科发展趋势、科学研究热点和前沿问题等,撰文发表个人的见解、意见和评论。本栏目欢迎院士投稿,每篇文章约2000字,同时请提供作者学术简历、工作照和签名电子文档。投稿邮箱:kjdbbjb@cast.org.cn。