

紫外光在植物工厂中的分布特征及应用前景

刘文科, 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 紫外(UV)光在植物光形态建成、次生代谢和叶色形成方面具有重要光生物学和光化学作用, 在调控设施园艺优质高产方面具有潜在应用价值。综述了人工光植物工厂和太阳光植物工厂中UV光的分布规律, 特征波长UV光的植物效应及其人工调控的必要性和调控策略。提出了植物工厂中UV-LED利用的前景、目标和方法。

关键词 紫外光; 生物效应; 植物工厂; 光环境调控

中图分类号 S626.9

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.10.004

Distribution Characteristics and Regulation of Ultraviolet Light in Plant Factory Production

LIU Wenke, 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 Ultraviolet light (UV), as an important part of continuous sunlight, refers to the wavelength ranging from 100 nm to 380 nm. Ultraviolet light functions crucially in photomorphological formation, leafy coloration and secondary metabolism of plants via photobiology and photochemistry mechanisms, and has potential application value in high-quality vegetable production. Protected horticulture is a kind of modern production pattern for vegetables and mushroom, even fruits in greenhouse, plastic-covered tunnel and plant factory. In this paper, the distribution characteristics of UV light in plant factories with artificial light and sunlight, plant effects of UV-A, UV-B and UV-C and the necessity of artificial regulation are summarized. Moreover, the utilization prospects, targets and methods of UV-LED in plant factory are highlighted.

Keywords ultraviolet light; biological effect; plant factory; light environment regulation

在农业生产中,光照条件的好坏直接关系着露地农业生产的效率和效益。因此,认识、利用和调控太阳光谱成分一直是农业研究的重要内容。尤其在现代农业生产中,设施农业发展成为支柱产业,人工光环境调控的技术客观需求变得现实且迫切,调控目标得到了拓展,以人工照明为手段的光环境调控已经成为设施农业发展的必然选择。

太阳光是连续光谱,其波长范围从100 nm的X射线到100 m的无线电波。太阳辐射中99%的能量集中在280~500 nm波段范围内。太阳光中不同光谱对植物光合作用贡献大小不一,仅400~700 nm范围的光为植物光合有效辐射,参与了植物的碳水化合物合成的光反应过程。而根据人眼的感知能力,通常把太阳光谱分为可见光和不可见光,不可见光

包括红外光和紫外光,其中波长小于380 nm的波段称为紫外光。根据紫外线的物理和生物学特性,将其分为3个波段:即波长为320~380 nm长波紫外线(UV-A),波长280~320 nm的中波紫外线(UV-B)和波长100~280 nm的短波紫外线(UV-C)^[1]。在全部太阳辐射中可见光约占50%,红外线约占48%~49%,其余紫外光约占1%~2%。研究表明,在太阳光谱中光合有效辐射、UV和远红光对植物生长发育具有调控功能,对农业生产具有应用价值。

1 露地农业系统中UV辐射特征

太阳辐射通过大气层后,光强和光谱均发生了变化。表现为X射线和一些超短波辐射减少,主要是被电离层氧、氮

收稿日期:2014-01-10;修回日期:2014-02-17

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:刘文科,研究员,研究方向为设施园艺营养与光生物学,电子邮箱:liuwke@163.com

引用格式:刘文科,杨其长.紫外光在植物工厂中的分布特征及应用前景[J].科技导报,2014,32(10):29-31.

及其他大气成分强烈吸收过滤了。对紫外线而言,大气平流层中的臭氧几乎能吸收全部 UV-C,而 UV-A 和 UV-B 能够达到地面,到达地面的 UV 中 95% 为 UV-A,5% 为 UV-B^[1]。波长大于 2500 nm 的射线由于大气层 CO₂ 和水蒸气的强烈吸收,到达地面的能量微乎其微。太阳辐射中只有可见光部分较为完整地到达地面,在大气层中损失较小。因此,在到达地面的太阳光谱中,UV-A 和可见光丰富,UV-B 及其他波长的光质较少,这决定了露地植物所能接收到的太阳能量及光信号的种类。就辐射能量而言,太阳光经过大气层到达海平面处或地球表面,再到植物叶片表面辐射能量逐渐降低,最终植物光合作用固定的太阳能仅占照到植物叶片表面太阳辐射的 5%^[2]。

近年来,由于氯氟烷烃(CFCs)和氮氧化合物等化学物质大量释放,致使大气平流层臭氧含量下降^[3]。大气臭氧层遭到破坏削弱了其对太阳 UV-B 辐射的吸收作用,导致到达植物叶片表面的 UV-B 辐射强度有增加趋势。臭氧层破坏对 UV-A 和 UV-C 辐射的空间变化无影响,研究表明即使臭氧层减少 90% 也不会有 UV-C 到达地面。到达地面的 UV-B 辐射增强,对暴露的地球植物而产生严重的生物学效应。据估计,大气臭氧每减少 1%,到达地表的辐射强度将增加 2%~3%,粮食将减产 2%^[4]。1978—1991 年大气层臭氧降低了 1%~5%,到 2060 年将减少 16%。UV-B 辐射增强、温室效应、酸雨并称为全球 3 大环境问题。

2 植物工厂中紫外光的分布特征

植物工厂作为设施园艺的一种生产形式,是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设施农业系统,不受或很少受自然条件制约的全新生产方式^[5]。植物工厂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。较传统设施园艺,植物工厂具有众多生产优势,生产效率高,可控性好,应用前景广阔。因此,植物工厂是设施园艺发展的必然趋势,对解决 21 世纪人口、资源、环境问题的具有重要意义,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^[6]。通常,植物工厂可分为太阳光植物工厂和人工光植物工厂两类,两类植物工厂 UV 辐射背景值、UV 光环境调控方面存在差异。人工光植物工厂需要人为利用电光源为植物提供光照,而太阳光植物工厂的光能主要来自太阳光,人工补光仅起辅助作用。

太阳光植物工厂通常是以半密闭式玻璃温室或日光温室为结构,以太阳光为光源,故此其内的 UV 辐射分布特征与玻璃、遮阳网和棚膜材质密切相关。温室和大棚由于覆盖材料(玻璃、塑膜和高质量防老化膜等)而对自然光有吸收、遮挡和过滤作用^[6]。一般,覆盖材料对可见光的透过率在 88% 左右,紫外线透过率仅在 15.9%~21.1%。与露地相比,网膜和玻璃能滤掉大部分 UV-A 和 UV-B,太阳光植物工厂中 UV-A 和 UV-B 显著降低,紫外辐射显著减少。露地晴天中

午 UV-B 辐照度约为 0.5 W·m⁻²,而玻璃温室内仅约 0.075 W·m⁻²^[7]。此外,太阳光植物工厂中 UV 辐射还受补光灯具的影响,因为高压钠灯(HPS)或紫外灯具含有 UV 辐射成分。人工光植物工厂通常以密闭式避光建筑作为维护结构,以人工光源为植物光照来源(如荧光灯和发光二极管(LED)灯),紫外辐射强度完全取决于人工光源光谱中紫外光成分的多寡。人工光植物工厂取决于灯具的 UV 辐射量,荧光灯中含 UV 辐射成分非常少,非 UV-LED 灯具中的 UV 辐射成分几乎为零。所以,人工光植物工厂中光照中 UV-A 和 UV-B 辐射非常缺乏,甚至完全缺失。

3 UV 对设施植物生长与品质的调控作用

植物工厂的一个重要特征是缺乏太阳光中的 UV-A 和 UV-B 辐射,UV 缺乏情况下设施园艺作物的生物效应尚不清楚;但伴随臭氧层破坏太阳辐射中的 UV-B 强度提高,设施内 UV 的变化及其生物效应目前更不清楚。一方面,植物工厂覆盖材料保护了设施植物免受 UV 辐射的危害,但是完全缺失 UV 辐射也带来了生产负效应。所以,调控植物工厂内 UV 的辐射水平是十分必要的,但这种调控必需以生产需求和植物耐受响应规律为依据。目前,设施蔬菜暴露在不同或剂量变化的紫外线辐射下的生物学效应已成为新的生态学和生物学问题,成为国际研究热点。

3.1 UV 辐射的生物效应

适宜的 UV 辐射对设施蔬菜的优质高效生产十分重要。UV 辐射缺乏会对设施蔬菜生长发育造成负效应。例如,低 UV-B 辐射通常造成设施蔬菜的植株徒长,营养品质低、色泽晦暗,味道不鲜等问题,还会阻碍植物色素的合成,不利于茄果类蔬菜生产。合理的 UV-B 辐射剂量能矮化植株^[8],促进次生代谢产物如类胡萝卜素的积累等作用^[9],改善番茄果实品质^[10]。但是,UV-B 高剂量暴露也会引发植物光合作用的一些响应,如 CO₂ 吸收、光合电子传递链、暗呼吸、气孔行为、色素含量和植物内源激素含量,抑制植物的生长发育^[11]。UV-A 也影响植物的生长和发育,但生物学效应较小。

为了解决蔬菜设施栽培中存在的这些问题,利用人工控制 UV-B 光源在设施内补充 UV-B 辐射对于改善这些蔬菜的品质,能取得良好的效果。另外,人工光栽培蔬菜以荧光灯和 LED 为主要光源,品质调控问题必须依赖于补充 UV-A 和 UV-B。目前,设施人工光栽培以荧光灯和 LED 红蓝光组合光源为主要光源,很明显缺乏紫外光谱组成。设施内紫外光的缺失导致严重的生长和品质问题,补光优化光谱组成十分迫切。LED 已作为节能光源应用于人工光设施蔬菜栽培。LED 具有其他电光源无法比拟的优势:节能环保、冷光源、使用寿命长、体积小、光质纯、光效高、波长类型丰富、光谱能量易复合、调制便捷等突出优势,可近距离照射植物,可采用多层立体栽培系统,提高空间利用率。因此,UV-LED 将在植物工厂中具有应用优势,在提高植物工厂生产效能,增加生产过程可控性方面发挥作用。

3.2 UV辐射在植物工厂中的应用

设施园艺作物品质是衡量其产品商品价值的重要指标,国际上关于园艺产品营养学研究方兴未艾。植物工厂中紫外光的利用与调节对保障优质高产非常重要。应用人工控制UV光源在设施内补充UV辐射技术,能减少化学方法导致的蔬菜徒长和改善蔬菜品质,是生产绿色有机食品的重要保证。可是,迄今关于中长波紫外光补光对设施蔬菜营养品质,尤其是抗氧化物质的调控机制研究的报道较少,缺乏紫外光有效的管理调控技术与装备。

Li等^[12]发现,荧光灯下不同LED光质明期补光对生菜营养品质有影响,增加UV-A能够提高花青素含量11%。Caldwell等^[13]研究了补充UV-A和UV-A+UV-B处理对8种绿叶和红叶生菜种类胡萝卜素和叶绿素影响,证明补充UV-B增加了绿叶生菜类胡萝卜素和叶绿素的含量,但降低了红叶生菜中类胡萝卜素和叶绿素含量。不同叶色生菜响应UV-A和UV-B辐射的差异可能是由于植物酚醛水平的光依赖性变化造成的。红叶生菜中UV诱导出相对于绿叶生菜显著高的酚醛物质,可能降低了叶绿体中类胡萝卜素的光保护需求^[14]。大棚番茄补充照射UV-B的结果表明,高剂量UV-B可降低番茄红素和维生素C的含量,低剂量UV-B可提高番茄红素和维生素C(Vc)含量^[10]。Tsormpatsidis等^[15]研究了不同UV辐射透过膜下生菜生长和花青素、类黄酮和酚类物质的产生情况,包括UV完全透过膜,可以透过320、350、370、380 nm的膜,以及完全不透过UV辐射的膜。发现利用完全不透UV的膜,生菜生物量干重为UV完全透过膜生菜的2.2倍;相反,完全透UV膜下生菜的花青素含量大约是UV完全不透膜下的8倍。

4 植物工厂UV人工光调控应用及策略

植物工厂中UV人工光调控在实现设施园艺优质高产方面具有很好的应用价值,但应用时应针对作物种类、应用目标来选择应用剂量、照射时机以保证应用安全。在作物种类选择上,设施蔬菜、药用植物、花卉和果树都可应用;应用目标上主要控制植物的徒长和提高农产品品质,比如提高蔬菜中抗氧化物质的含量,增加药用植物中次生代谢物质的累积等,加快花卉叶片和花瓣中显色物质的合成与累积等。为了控制好紫外光调控效果,UV辐射的剂量必须控制好。可采用短期小剂量应用,间歇式反复照射、采前短期照射等方法减少使用剂量。灯具方面,目前市场销售的主要是UV灯管,但UV-LED光源可能是未来UV光调控的优选电光源,可精准定位照射。从安全角度而言,应基于设施园艺作物生理需求和品质调控目标,制定合理的智能化光环境管理措施,规避UV对人体的暴露,如采用夜晚补照白天停止的办法,使UV能够发挥其品质调控作用,提高设施园艺作物的商品价值和营养保健功能。

参考文献(References)

- [1] White A L, Jahnke S. Contrasting effects of UV-A and UV-B on photosynthesis and photoprotection of β -carotene in two *Dunaliella* spp[J]. *Plant and Cell Physiology*, 2002, 43(8): 877-884.
- [2] 王忠. 植物生理学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
Wang Zhong. *Plant physiology*[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000.
- [3] Caldwell M M. Solar UV radiation and the growth and development of higher plants[M]//Giese A G. *Phytophysiology*. New York: Academic Press, 1971: 131-177.
- [4] Lumsden P. *Plants and UV-B: Responses to environmental change*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- [5] 杨其长, 魏灵玲, 刘文科. 植物工厂系统与与实践[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.
- [6] Nitz G M, Grubmuller E, Schnitzler W H. Differential flavonoid response to PAR and UV-B light in chive (*Allium schoenoprasum* L.) [J]. *Acta Horticulturae*, 2004, 659(2): 825-830.
- [7] 陈岚, 吴震, 蒋芳玲, 等. 紫外线-B照射对小白菜生长、产量及品质的影响[J]. *植物资源与环境学报*, 2008, 17(1): 43-47.
Chen Lan, Wu Zhen, Jiang Fangling, et al. Effects of ultraviolet-B radiation on growth, yield and quality of pakchoi (*Brassica campestris* ssp. *chinensis*) [J]. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2008, 17(1): 43-47.
- [8] Teramura A H. Effect of ultraviolet-B irradiation on the growth and yield of crop plants[J]. *Physiol Plant*, 1983, 58(3): 415-420.
- [9] Ambasht N K, Agrawal M. Physiological responses of field grown Zea mays L. plants to enhanced UV-B radiation[J]. *Biotronics*, 1995, 24(2): 15-23.
- [10] 王英利, 王勋陵, 岳明. UV-B及红光对大棚番茄品质的影响[J]. *西北植物学报*, 2000, 20(4): 590-595.
Wang Yingli, Wang Xunling, Yue Ming. Effect of supplemental UV-B and red light on fruit quality of tomato in winter plastic greenhouse[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2000, 20(4): 590-595.
- [11] Jansen M A K. Ultraviolet-B radiation effects on plants induction of morphogenic responses[J]. *Physiologia Plantarum*, 2002, 116(3): 423-429.
- [12] Li Q, Kubota C. Effects of supplemental light quality on growth and phytochemicals of baby leaf lettuce[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2009, 67(1): 59-64.
- [13] Caldwell C R, Britz S J. Effect of supplemental ultraviolet radiation on the carotenoid and chlorophyll composition of green house-grown leaf lettuce (*Lactuca sativa* L.) cultivars[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2006, 19(6-7): 637-644.
- [14] Caldwell C R, Britz S J. Effect of supplemental ultraviolet radiation on the concentration of phytonutrients in green and red leaf lettuce (*Lactuca sativa*) cultivars[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2006, 19: 637-644.
- [15] Tsormpatsidis E, Henbest R G C, Davis F J, et al. UV irradiance as a major influence on growth, development and secondary products of commercial importance in Lollo Rosso lettuce "Revolution" grown under polyethylene films[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2008, 63(1-3): 232-239.

(责任编辑 吴晓丽)