

温室多层立体栽培联合补光对生菜产量及品质的影响

方慧^{1,2} 程瑞锋^{1,2} 伍纲^{1,2*} 仝宇欣^{1,2} 刘庆鑫^{1,2}

(1. 中国农业科学院 农业环境与可持续发展研究所,北京 100081;

2. 农业农村部设施农业节能与废弃物处理重点实验室,北京 100081)

摘要 针对温室单层栽培模式空间利用率低,资源浪费的问题,以阿奎诺生菜为研究对象,探究温室多层立体栽培结合人工补光模式对生菜产量、品质及电能利用率的影响。试验结果表明:栽培架中层和下层补光处理能显著提高生菜总干物质质量。中、下层补光处理下,每增加1%日光照累积量(Daily light integral, DLI),单位面积产量分别增加0.6%和0.8%。栽培架中层补光处理、下层补光处理和对照上层不补光处理叶片比叶面积(Specific leaf area, SLA)比中层和下层不补光处理更小,即叶片更厚。高光强下生长的叶片在光合能力及光化学成分的形成有明显的促进作用,补光处理下叶片中的可溶性糖含量和叶绿素含量均高于不补光处理。在补光处理下虽然耗电量增加了,但生菜产量也明显提高了,补光处理下的投入/产出值与栽培架最上层不补光处理差异不显著为0.08~0.09 kW·h/g,但均明显高于中、下层不补光处理的0.2~0.3 kW·h/g,而且温室中采用3层栽培模式后,空间利用率提高了2倍。

关键词 温室; 补光; 太阳能; 生菜品质; 耗电量

中图分类号 S625.4

文章编号 1007-4333(2021)07-0147-08

文献标志码 A

Effects of multi-layer three-dimensional cultivation combined with artificial lighting on lettuce yield and quality in Greenhouse

FANG Hui^{1,2}, CHENG Ruifeng^{1,2}, WU Gang^{1,2*}, TONG Yuxin^{1,2}, LIU Qinxing^{1,2}

(1. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agriculture Sciences, Beijing 100081, China;

2. Key Laboratory of Energy Conservation and Waste Management of Agricultural Structures of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100081, China)

Abstract To improve space utilization efficiency and save resource in greenhouse with single-layer cultivation system, taking Aquino lettuce as the research object, the effects of greenhouse combined with three-layer cultivation and artificial light supplement on lettuce yield, quality and power utilization rate were studied. The results showed that the total dry matter quality of lettuce could be significantly improved by increasing lighting on the middle-layer and down-layer. Under the treatment of middle-layer and down-layer with artificial light, the yield per unit area respectively increased by 0.6% and 0.8% with the increase of 1% DLI (Daily light integral). The specific leaf areas (SLAs) of both middle-layer of down-layer with artificial light and up-layer without artificial light were all smaller than that of middle-layer and down-layer without artificial light, that is, their leaves were thicker. The photosynthetic capacity and the formation of photochemical components of leaves grown under high light intensity were significantly promoted. The total sugar content and chlorophyll content in leaves under supplemental light treatment were higher than those without light supplement treatments. Although the power consumption was increased, the lettuce yield was also significantly increased. The input/output value of light supplement treatments were 0.08 – 0.09 kW·h/g. It was significantly

收稿日期: 2020-10-15

基金项目: 国家重点研发项目(SQ2020YFE020022);国家自然科学基金项目(51806244)

第一作者: 方慧,副研究员,主要从事设施园艺环境工程研究,E-mail:fanghui@caas.cn

通讯作者: 伍纲,助理研究员,主要从事太阳能利用研究,E-mail:wugang@caas.cn

higher than that of 0.2–0.3 kW·h/g in the middle and lower layers without artificial light, and the space utilization tripled after adopting three-layer cultivation system in greenhouse.

Keywords greenhouse; artificial lighting; solar energy; lettuce quality; power consumption

植物工厂是在完全密闭或半密闭条件下采用高精度环境控制,实现作物在垂直立体空间周年计划性生产的高效农业系统,是衡量一个国家农业高技术水平的重要标志之一,受到世界各国的高度重视^[1]。植物工厂根据采用的光源类型,可分为人工光利用型植物工厂和太阳光利用型植物工厂^[2]。人工光植物工厂的光源与空调能耗较大,Kozai等^[2-3]研究表明,荧光灯补光型植物工厂中补光耗电量占总耗电量的80%左右,空调制冷能耗等其他设备耗电量占总电能消耗的15%左右,其他的营养液循环等设备的耗电量占总耗电量的3%左右。由于人工光植物工厂运行费用高,大范围的推广应用受到一定限制^[4]。温室是指在半密闭的设施环境下,利用太阳光(或辅助人工补光)以及营养液栽培技术,进行植物周年连续生产的一种农作方式,因作物光环境主要来源于太阳光,所以运行成本较低^[5]。但温室光环境受到外界太阳光照的限制和建筑结构遮光的制约,导致周年生产不稳定,其产量远低于以多层立体栽培形式进行高密度栽培的人工光型植物工厂。提高温室空间利用效率已成为近年来的研究热点^[6-9]。

立体栽培技术也被称为垂直栽培技术,是一种采用栽培架或栽培管道,在空间上进行垂直梯度的分层栽培方式。立体栽培模式能最大限度的利用设施内部空间,提高土地的利用率和单位面积的产量^[10]。在人工光植物工厂中由于不受外界光环境和建筑结构对光遮挡的影响,多以立体栽培为主。在温室中多为单层栽培模式,多层立体栽培研究较少。刘伟等^[11]测试了立柱栽培模式下每一层光分布,发现光照强度随着栽培面的下降而减弱,每下降一层,光照强度平均减少约15%。Si等^[12]对比中草药铁皮石斛在多层栽培和田间栽培模式下的产量和品质,发现多层立体栽培下各层铁皮石斛生长正常,且品质和产量均高于田间栽培模式,多层栽培模式显著提高了土地利用效率。Takeda^[13]采用多层立体栽培模式种植草莓发现,中、下层光强仅为顶层的10%,弱光环境导致草莓生长周期的延长。周静等^[7]研究了立体栽培条件下光环境对生菜生长和生理的影响,发现栽培架中层日平均光辐射强度仅相

当于上层的36.4%~45.6%,下层仅相当于上层的24.8%~37.3%,光照强度对生菜产量影响显著。综上,多层立体栽培在不补光条件下适用于喜阴植物的生长,但栽培架中、下层光照强度弱,不适宜常规蔬菜生长。

针对温室单层栽培空间利用率低,而多层立体栽培中、下层光照强度弱的问题,本研究拟将自然光与人工补光结合,分析在温室内多层立体栽培架上层、中层和下层自然光分布特点,以阿奎诺生菜(*Lactuca sativa* L. var. *ramosa* Hort.)为试验材料,研究自然光结合人工补光对生菜产量和品质的影响以及其经济性,以期为温室多层栽培结合人工补光种植模式提供参考。

1 材料与方法

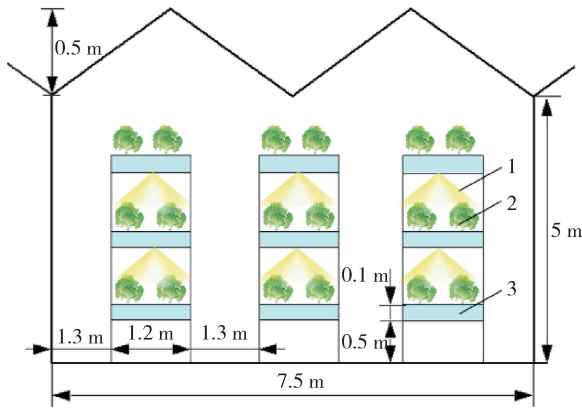
1.1 试验材料

1.1.1 试验材料与装置

选用阿奎诺生菜为试验植物。于2018-10-28将种子播种于育苗海绵上,并置于育苗盘中进行催芽,14天后幼苗长至四叶一心时移栽至温室栽培架中。

试验温室位于中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所楼顶(116°23' E, 39°54' N),温室东西两侧与其他生产型温室相连,北侧与过道相连,温室东西方向长7.5 m,南北方向长6.0 m;室内放置3组栽培架,每组栽培架设置3层栽培板,栽培板尺寸为:1.2 m×3.72 m,栽培密度22株/m²,每块栽培板可种植96棵生菜,栽培板层间距为0.5 m。试验温室结构见图1。

生菜前期培养均采用营养液水培,营养液循环时间为每天的9:00—12:00。营养液组分如下:KNO₃, 5.94 mmol/L; MgSO₄, 1.42 mmol/L; NH₄H₂PO₄, 1.00 mmol/L; KH₂PO₄, 0.44 mmol/L; Ca(NO₃)₂, 2.12 mmol/L; EDTA-Fe, 4.29×10⁻² mmol/L; H₃BO₃, 4.839×10⁻² mmol/L; MnSO₄, 1.325×10⁻² mmol/L; ZnSO₄, 1.35×10⁻³ mmol/L; CuSO₄, 5×10⁻⁴ mmol/L; (NH₄)₆Mo₇O₂₄, 4×10⁻⁴ mmol/L。



1. 补光灯; 2. 生菜; 3. 栽培架

1. Artificial light; 2. Lettuce; 3. Cultivation frame

图1 试验温室多层栽培架结构及补光装置示意图

Fig.1 Schematic diagram showing a cross section of multi-layer cultivation frames and the layout of fluorescent lamps in the experimental greenhouse

1.1.2 试验处理

选取温室中2组栽培架作为对照组和试验组进行试验。对照组栽培架的上层(CK-U)、中层(CK-M)和下层(CK-D)为全自然光模式;试验栽培架采用中科光电股份有限公司生产的T8型荧光灯作为补光光源,单根灯管输入功率为18 W,波长范围为400~800 nm。利用LI-1500光合有效辐射传感器测试距离荧光灯40 cm处光合有效辐射为 $36 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。栽培架中间层补光灯设置3列,对应TL-M,下层补光灯设置3列,对应TL-D,补光时间为每日4:00—20:00。

1.2 观测指标

1.2.1 叶片光合速率测定

在补光处理20天后,使用美国LI-COR公司生产的配备有透明叶室的光合仪LI-6400测定补光与不补光处理下生菜叶片最大净光合速率。生菜选定完全展开的从上往下第2个成熟叶片测定,测定中光合仪进气口连接缓冲瓶以获得稳定 CO_2 浓度,光合仪中气流设定为 $500 \mu\text{mol}/\text{mol}$,叶室温度保持在 $(24 \pm 1)^\circ\text{C}$,相对湿度控制在50%~70%,叶室光合有效辐射值设置为 $1500 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,光源红蓝比为9。

1.2.2 叶片形态与产量测定

定植后第35天进行取样,对每个处理分别随机选取5棵生菜,用1/10 000天平测量叶、根的鲜重,用LI-3100叶面积仪测量叶片面积。用电热鼓风机

干燥机在 80°C 条件下对样品烘干2天,记录叶和根干重,计算干物质含量和比叶面积(Specific leaf area, SLA)。鼓风机为上海一恒科学仪器有限公司生产,型号为DHG-9620-A。

1.2.3 化学成分测量

叶片可溶性糖的测定采用苯酚法。每个处理选取3个样品,剪去叶脉,用液氮速冻,并用组织研磨器粉碎留样。测量时称取0.2 g的鲜样,加入10 mL蒸馏水封口,沸水浴中提取30 min,提取2次,提取液定容至25 mL容量瓶中,测量时吸取0.5 mL样品于试管中,加入1.5 mL蒸馏水,再依次加入9%的苯酚溶液1 mL、浓硫酸5 mL,充分反应后倒入1 mL比色杯中,用配备有示差折光检测器的超高相液相色谱仪,在波长485 nm下测定4种可溶性糖含量,液相色谱仪为美国Waters公司生产,型号为Aquirty H-class UPLC。

叶绿素含量测定,称取鲜样0.2 g,将叶片剪碎,用95%乙醇溶液10 mL黑暗中浸泡叶片2天,充分提取后将提取液导入1 mL比色杯中,以95%乙醇为空白对照,用UV-1800紫外分光光度计测定提取液在波长665、649和473 nm下测定吸光度。紫外分光光度计为日本岛津公司生产,型号为UV1800。

1.2.4 耗电量统计

温室内安装有浙江天扬电器科技有限公司生产的电表2台,电表型号为DTS2626。一台电表安装在TL-M处理和TL-D处理中记录补光耗电量,另一台电表安装在供水泵侧,用于测量营养液循环水泵耗电量。

试验期间为冬季,温室采用民用热水锅炉采暖,采暖热负荷计算参照玻璃温室,再根据栽培期消耗的总热负荷换算为电加热时消耗的电量。温室能量平衡关系式为^[14]:

$$\rho_a C_{P,a} V_a \frac{dT_a}{dt} = \Phi_{hw} + \Phi_a - \Phi_{ao,c} \quad (1)$$

式中: ρ_a 为空气密度, kg/m^3 ; $C_{P,a}$ 为空气定压比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; V_a 为室内空气体积, m^3 ; T_a 为室内空气温度, K ; t 为时间, s ; $\frac{dT_a}{dt}$ 为在单位时刻内空气温度的变化; Φ_{hw} 为供暖提供的能量, W ; Φ_a 为温室覆盖层、骨架和地面吸收的太阳辐射再次释放到室内空气中的热量, W ; $\Phi_{ao,c}$ 为温室覆盖层散热损失的热量, W :

$$\Phi_{ao,c} = h_{ao,c} \cdot A_{co} \cdot (T_a - T_o) \quad (2)$$

式中: A_{co} 为温室覆盖层面积, m^2 ; $h_{ao,c}$ 为室内外空气通过覆盖层的换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; T_o 为室外空气温度, K 。

$$\Phi_a = \Lambda \cdot I_{UP} \cdot A_f \quad (3)$$

式中: I_{UP} 为室内栽培架上层太阳辐射, W/m^2 ,利用仪器测得; Λ 为矫正系数,取值0.65; A_f 为温室地面面积, m^2 。

生菜从移栽到收获共计35 d,则采暖所消耗的总能源 Q_{hw} 计算式为:

$$Q_{hw} = \sum_1^{35 d} \Phi_{hw} \quad (4)$$

温室内共6组栽培架,每组栽培架有3层栽培槽,每层栽培槽能种植48棵生菜,共能种植864棵生菜,每棵生菜的采暖耗电量 q_{hw} 为:

$$q_{hw} = \frac{Q_{hw}}{1\ 000 \times 3\ 600 \times 864} \quad (5)$$

1.3 统计与分析

数据均取每个处理下3次重复的平均值,采用SPSS软件对试验数据进行差异分析,并运用ANOVA检验法对显著性差异($P < 0.05$)进行比较。利用MATLAB软件对太阳辐射分布进行梯度绘制。

2 结果与分析

2.1 植物生长光环境分析

在试验阶段,温室内日光照累积量(Daily light integral,DLI)受室外环境的影响波动较大,在阴天时,DLI在上层、中层和下层分别只有1.0、0.2和

0.2 $mol/(m^2 \cdot d)$,而在晴天时上层、中层和下层分别能达到10.0、2.3和1.8 $mol/(m^2 \cdot d)$,在整个栽培期不补光条件下,上层、中层和下层35 d累计光合有效辐射分别能达到231.6、46.9和45.5 mol/m^2 (图2)。在多层栽培试验中,阳光直射上层栽培面,中、下层栽培面的直射光照分别受到上、中层不同程度的遮挡,导致栽培架上层、中层和下层光合有效辐射存在差异。上层日光照累积量以直射光为主,平均DLI为6.4 $mol/(m^2 \cdot d)$;中层和下层光照以散射光为主,平均DLI分别为1.30和1.26 $mol/(m^2 \cdot d)$ 。为满足生菜生长对光合有效辐射的需求^[15],因此,中层和下层设置3列补光灯,距离作物冠层平均光合有效辐射为100 $\mu mol/(m^2 \cdot s)$,DLI为5.8 $mol/(m^2 \cdot d)$ 。

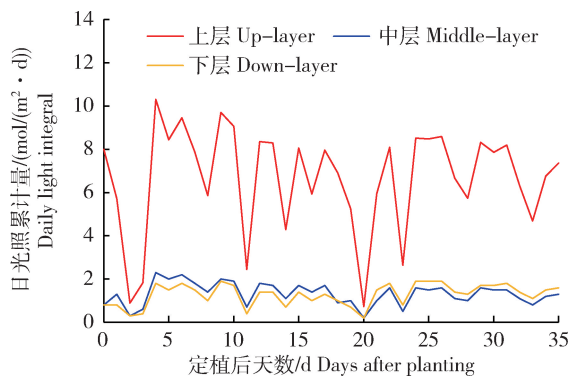


图2 试验期间温室内栽培架上、中和下层日光照累积量变化

Fig. 2 Daily light integral on up-layer, middle-layer and lower layer of the cultivation rack during the experiment

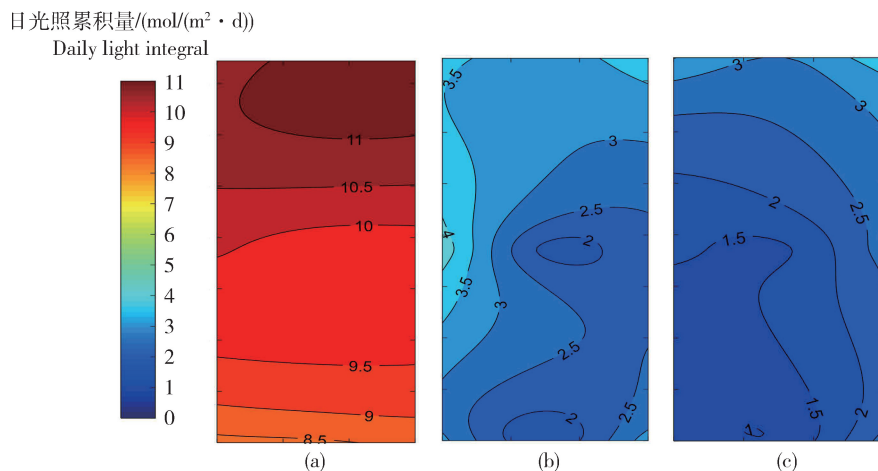


图3 冬至日栽培架上层(a)、中层(b)和下层(c)自然光强累积量分布

Fig. 3 Distribution of daily natural light integral on up-layer (a), middle-layer (b) and down-layer (c) during winter solstice

2.2 植物生物量分析

TL-M 与 TL-D 处理单棵植株叶片鲜重分别较对照 CK-M 和 CK-D 处理提高了 2.7 和 3.5 倍 (表 1), 单棵植株叶片干重分别较对照 CK-M 和 CK-D 处理提高了 2.7 和 3.7 倍。2 个补光处理的单棵植株叶片干、鲜重明显高于 CK-U 处理。

表 1 补光对生菜干鲜重的影响

Table 1 Effects of supplementary lighting on plant fresh weight and dry weight

处理 Treatment	单株鲜重/g Fresh weight	单株干重/g Dry weight
CK-U	67.4±3.7 b	4.1±0.1 b
CK-M	25.4±2.3 c	1.4±0.1 c
CK-D	18.3±3.8 c	1.0±0.3 c
TL-M	93.2±8.2 a	5.2±0.5 a
TL-D	83.2±10.1 a	4.7±0.7 ab

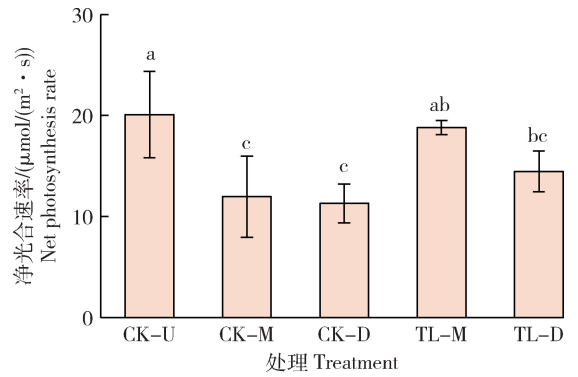
注: 同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。CK-U、CK-M 和 CK-D 分别为对照不补光处理的上层、中层和下层。TL-M 和 TL-D 分别为补光处理的中层和下层。下同。

Note: Different lowercase letters represent significant differences among treatments ($P < 0.05$). CK-U, CK-M and CK-D are the treatments without artificial light on the top-layer, middle-layer and down-layer, respectively. TL-M and TL-D are the treatments with artificial light on the middle-layer and down-layer, respectively. The same below.

2.3 生菜最大净光合速率比较

测试当天为晴天, 中午时刻栽培架上层、中层和下层光合有效辐射最高达到 416.0、68.2 和 43.9 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 中、下层补光条件下光合有效辐射最高值为 168.2 和 143.9 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 5 种处理下叶片最大净光合速率见图 4。补光处理 TL-M 和 TL-D 叶片最大净光合速率均高于对照不补光处理 CK-M 和 CK-D, 其生物量也均高于对照处理, 补光能显著提高生菜光合能力, 进而提高生物量。TL-M 和 TL-D 补光处理叶片最大净光合速率均小于 CK-U 处理, 但 TL-M 和 TL-D 处理的生物量均高于 CK-U 处理, 其主要原因是, 虽然 CK-U 处理生菜光合能力强, 但由于 CK-U 处理光照时间短, 尤其在阴天条件下, 光照强度和光照时间均小于补

光处理, 计算生菜整个生长期累计光量, 发现 CK-U 处理为 231.6 mol/m^2 , 而 TL-M 和 TL-D 达到 249.9 和 248.5 mol/m^2 。



不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同。

Different lowercase letters represent significant difference among treatments ($P < 0.05$). The same below.

图 4 补光处理对生菜最大净光合速率的影响

Fig. 4 Maximum net photosynthesis rate under control and top lighting

2.4 叶片形态和化学成分比较

补光处理 TL-M 和 TL-D 的叶片比叶面积显著低于对照不补光处理 CK-M 和 CK-D, 说明补光处理下显著增加叶片厚度 (图 5), 补光处理 TL-M 和 TL-D 与栽培架上层 CK-U 处理下叶片厚度无显著差异。补光处理 TL-M 和 TL-D 对生菜叶片可溶性糖含量也有明显提高作用。对于补光处理 TL-M 和 TL-D 与不补光处理 CK-M 和 CK-D 的生菜叶绿素含量差异不显著, 但均高于上层自然光处理 CK-U (表 2)。

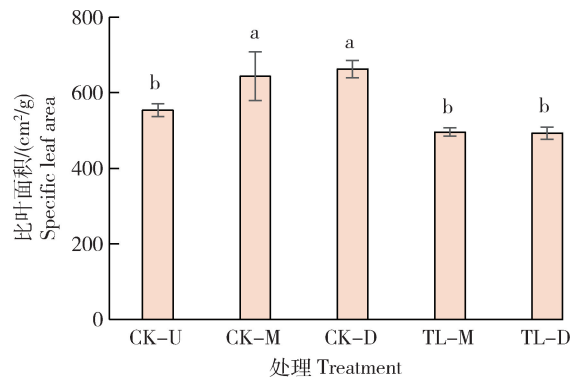


图 5 补光处理对叶片比叶面积的影响

Fig. 5 Effects of supplementary artificial light on specific leaf area

表2 补光对生菜中可溶性糖和叶绿素质量分数的影响

Table 2 Effects of supplementary lighting on total soluble sugar and chlorophyll content in lettuce leaves

处理 Treatment	$w(\text{可溶性糖})/(\mu\text{g/g})$ Total soluble sugar	$w(\text{叶绿素})/(\text{mg/g})$ Chlorophyll content
CK-U	0.82±0.04 b	0.30±0.01 c
CK-M	0.68±0.05 c	0.34±0.01 ab
CK-D	0.60±0.01 c	0.35±0.04 ab
TL-M	1.01±0.10 a	0.39±0.06 a
TL-D	0.88±0.05 b	0.37±0.01 ab

2.5 生菜光能利用效率和电能利用效率比较

生菜苗于2018年11月11日移栽至温室,12月16日全部采收,生长周期为35 d。试验期间每组栽培架配置1个营养液循环水泵,每组栽培架种植144棵生菜,每个循环水泵总耗电量为78.75 kW·h。植物工厂35 d栽培期供暖总负荷为4 196 kW·h,

整个栽培期间所有处理每棵生菜耗电量见表3。补光处理TL-M和TL-D耗电量比不补光处理耗电量每棵生菜高了1.9 kW·h,但补光处理明显增加了生菜的鲜重,计算每克生菜鲜重的耗电量发现TL-M处理和TL-D处理与CK-U处理没有显著差异,但都明显高于CK-M和CK-D处理。

表3 不同处理单株生菜的耗电量和单位质量耗电量

Table 3 Electricity consumption per plant and per lettuce gram under supplementary artificial light

处理 Treatment	耗电量/(kW·h/棵) Electricity consumption				单位生菜质量耗电量/ (kW·h/g) Electricity consumption per unit lettuce mass
	水泵 Water pump	补光灯 Lighting	供暖 Heating	合计 Total	
CK-U	0.54	—	5.0	5.54	0.08 a
CK-M	0.54	—	5.0	5.54	0.20 b
CK-D	0.54	—	5.0	5.54	0.30 b
TL-M	0.54	1.9	5.0	7.44	0.08 a
TL-D	0.54	1.9	5.0	7.44	0.09 a

3 讨论与结论

传统的温室栽培模式大都是单层栽培,该栽培模式下,作物可以充分的接收自然光,且光照环境相对均匀;但是单层栽培模式的空间利用率低,为提升温室空间利用效率、提高产量,本研究效仿人工光利用型植物工厂内的多层立体栽培模式,在温室内采用3层式立体栽培的方式,达到空间的高效利用,提高单位土地面积的产量。

光照是影响植物生长发育最重要的因素^[16]。

当植株生长处于源限制时,补充光照能有效促进植株生长及干物质的积累。本试验中生菜对日光照累积量的需求为3~6 mol/(m²·d)^[15],测试发现温室栽培架上层、中层和下层平均DLI分别为6.40、1.30和1.26 mol/(m²·d),中层和下层DLI远低于满足生菜正常生长需要的光合有效辐射日累积量。当植株生长处于源限制时,补充光照能有效促进植株生长及干物质的积累。本试验结果显示中层和下层补光处理能显著提高生菜总干物质量。计算发现,补光处理TL-M和TL-D,每增加1%DLI,单

位面积产量分别增加0.6%和0.8%,这与 Marcelis 等^[17]得出的光照每增加1%,产量增加0.8%的结论一致。

植物形态建成与生长环境有密切的关系^[18],试验中栽培架上层不补光处理、中层补光处理和下层补光处理下叶片比叶面积(Specific leaf area, SLA)比中层和下层的不补光处理更小,即叶片更厚,这是植物叶片对光强适应的典型表现^[18-19]。高光强下生长的叶片在光合能力及光化学成分的形成有明显的促进作用,补光处理下叶片中的总糖含量,叶绿素含量均高于不补光处理,这与 Li 等^[20]和 Trouwborst G 等^[21]的研究结论一致。

补光处理以增加光合有效辐射、延长光照时间,促进光合速率能显著提高单棵生菜鲜重和干重。但补光处理对温室多层立体生菜栽培经济效益的贡献还取决于补光设备的投入和运行费用。本试验结果显示,在补光处理下虽然耗电量增加了,但生菜产量也明显提高了,补光处理下投入/产出与栽培架上层不补光处理差异不显著,但明显高于中下层不补光处理。

综上,温室中、下层补光能够有效提高中层和下层生菜的日光照累积量,显著促进植物生长,提高生菜品质。虽然补光增加了耗电量,但生菜鲜重也显著增加;中层和下层补光后的经济效益与栽培架上层不补光处理无显著差异;在温室中采用3层栽培模式后,空间利用率提高了2倍。

参考文献 References

[1] 赵立军, 陈亚, 孔阳阳, 刘冰, 颜姗姗, 何堤, 许春林. 太阳光利用型植物工厂的设计与试验研究[J]. 农机化研究, 2018, 40(1): 114-119
Zhao L J, Chen Y, Kong Y Y, Liu B, Yan S S, He D, Xu C L. Design and experimental research of the type of utilizing sunlight plant factory [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2018, 40(1): 114-119 (in Chinese)

[2] Kozai T, Niu G, Takagaki, M. *Plant Factory: An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production*[M]. London: Academic Press, 2015: 7-33

[3] 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, Series B, Physical and Biological Sciences*, 2013, 89(10): 447-461

[4] 杨其长. 植物工厂[M]. 北京:清华大学出版社, 2019
Yang Q C. *Plant Factory*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2019 (in Chinese)

[5] 闫文凯, 张雅婷, 张玉琪, 杨其长, 李涛. LED 株间补光对日光温室番茄产量及光合作用的影响[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2018, 46(7): 132-138, 146
Yan W K, Zhang Y T, Zhang Y Q, Yang Q C, Li T. Effects of LED interlighting on yield and photosynthesis of tomato in solar greenhouse[J]. *Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition*, 2018, 46(7): 132-138, 146 (in Chinese)

[6] 纪开燕, 郭成宝, 童晓利, 陈月红, 唐泉. 设施草莓立体无土栽培的主要模式与发展对策[J]. 江苏农业科学, 2013, 41(6): 136-138
Ji K Y, Guo C B, Tong X L, Chen Y H, Tang Q. Main models and development strategies of three dimensional soilless cultivation of strawberry in greenhouse [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2013, 41(6): 136-138 (in Chinese)

[7] 周静, 李萍萍, 王纪章, 卢佳俊. 立体栽培条件下光温环境对生菜生长和生理特征影响[J]. 江苏大学学报:自然科学版, 2016, 37(5): 530-535
Zhou J, Li P P, Wang J Z, Lu J J. Effects of light and temperature on growth and development of lettuce in stereoscopic cultivation[J]. *Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition*, 2016, 37(5): 530-535 (in Chinese)

[8] Li Y P, Zhu H, Ma H Q, Q W. Study on soilless culture of facility strawberry[J]. *Agricultural Science & Technology*, 2014, 15(7): 1065-1068

[9] 杨斌. 适合拉萨高效日光温室的果菜立体栽培装置设计[J]. 中国果菜, 2017, 37(5): 76-81
Yang B. Design of stereo-cultivation for fruit and vegetables in solar greenhouse in Lhasa [J]. *China Fruit & Vegetable*, 2017, 37(5): 76-81 (in Chinese)

[10] 王春玲, 宋卫堂, 赵淑梅, 曲明山. 追日式草莓立体栽培架改善光温环境和提高草莓产量[J]. 农业工程学报, 2017, 33(11): 187-194
Wang C L, Song W T, Zhao S M, Qu M S. Sun-tracking multi-layer stereo-cultivation system improving light and temperature environment and increasing yield for strawberry [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(11): 187-194 (in Chinese)

[11] 刘伟, 刘增鑫, 陈殿奎. 高效益立柱式无土栽培技术[J]. 沈阳农业大学学报, 2000, 31(1): 137-139
Liu W, Liu Z X, Chen D K. High efficiency column soilless culture technique [J]. *Journal of Shenyang Agricultural*

- University, 2000, 31(1): 137-139 (in Chinese)
- [12] Si J P, Dong H X, Liao X Y, Zhu Y Q, Li H. Dendrobium officinale stereoscopic cultivation method[J]. *Zhongguo Zhong Yao Za Zhi*, 2014, 39(23): 4576-4579
- [13] Takeda F. Out-of-season greenhouse strawberry production in soilless substrate[J]. *Advances in Strawberry Research*, 2000 (18): 4-15
- [14] 方慧, 张义, 伍纳, 程瑞锋, 周波, 杨其长. 大跨度保温型温室的热环境模拟[J]. *中国农业气象*, 2019, 40(3): 149-158
Fang H, Zhang Y, Wu G, Cheng R F, Zhou B, Yang Q C. Modelling of thermal climate in a large-scale insulation solar greenhouse[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2019, 40(3): 149-158 (in Chinese)
- [15] Torres A P, Lopez R G. Commercial greenhouse production-Measuring daily light integral in a greenhouse[J]. *Purdue Extension*, 2010
- [16] Pinho P, Hytönen T, Rantanen M, Elomaa P, Halonen L. Dynamic control of supplemental lighting intensity in a greenhouse environment[J]. *Lighting Research & Technology*, 2013, 45(3): 295-304
- [17] Marcelis L F M, Brockhuijsen A G M, Meinen E, Nijssen E M F M, Raaphorst M G. Quantification of the growth response to light quantity of greenhouse grown crops [J]. *Acta Horticulturae*, 2006(711): 97-104
- [18] Poorter H, Niinemets Ü, Walter A, Fiorani F, Schurr U. A method to construct dose-response curves for a wide range of environmental factors and plant traits by means of a meta-analysis of phenotypic data [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2010, 61(8): 2043-2055
- [19] Poorter H, Niklas K J, Reich P E, Oleksyn J, Poot P, Mommer L. Biomass allocation to leaves, stems and roots: Meta-analyses of interspecific variation and environmental control[J]. *New Phytologist*, 2012, 193(1): 30-50
- [20] Li T, Heuvelink E, Dueck T A, Janse J, Gort G, Marcelis L F M. Enhancement of crop photosynthesis by diffuse light: Quantifying the contributing factors[J]. *Annals of Botany*, 2014, 114(1): 145-156
- [21] Trouwborst G, Hogewoning S W, Harbinson J, van Ieperen W. Photosynthetic acclimation in relation to nitrogen allocation in cucumber leaves in response to changes in irradiance [J]. *Physiologia Plantarum*, 2011, 142 (2): 157-169

责任编辑: 刘迎春