中国农业大学学报　2024,29(4):164-172
Journal of China Agricultural University　http://zgnydxxb.ijournals.cn

李雪,赵士文,包星星,武永军,杨振超.光周期对黄瓜幼苗形态、光合特性及碳水化合物含量的影响[J].中国农业大学学报,2024,29(04):164-172.
LI Xue, ZHAO Shiwen, BAO Xingxing, WU Yongjun, Yang Zhenchao. Effects of photoperiods on morphology, photosynthetic characters and carbohydrate of cucumber seedlings[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(04): 164-172.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.04.14

光周期对黄瓜幼苗形态、光合特性及碳水化合物含量的影响

李　雪[1]　赵士文[1]　包星星[1]　武永军[2]　杨振超[1*]
(1.西北农林科技大学 园艺学院,陕西 杨凌 712100;
2.西北农林科技大学 生命科学学院,陕西 杨凌 712100)

摘　要　为探究光周期对黄瓜幼苗形态、光合特性及碳水化合物含量的影响,在光强为250 μmol/(m^2·s)的白光下,设置光周期为8 h/16 h、12 h/12 h、16 h/8 h和20 h/4 h共4个处理,比较各处理对黄瓜幼苗的影响。结果表明:不同光周期处理后的黄瓜幼苗形态差异较大,其株高、茎粗、鲜重、干重与叶面积均发生显著性差异,12 h/12 h处理下株高、茎粗和总叶面积均显著优于其余处理;随着光周期的增加,叶片各组织厚度增加,Rubisco酶活性呈现下降趋势,8 h/16 h处理较16 h/8 h与20 h/4 h处理显著增加66.23%和82.86%;黄瓜幼苗总氮含量随着光周期的增加呈现显著下降趋势;12 h/12 h处理下总碳含量显著高于8 h/16 h和20 h/4 h;12 h/12 h和16 h/8 h处理的淀粉含量显著高于其余处理。综上,12 h/12 h处理为黄瓜幼苗生长的最适宜光照周期。该研究结果可为植物工厂化育苗及设施内补光提供依据和参考。

关键词　黄瓜;光周期;光合;碳水化合物含量
中图分类号　S642.2　　**文章编号**　1007-4333(2024)04-0164-09　　**文献标志码**　A

Effects of photoperiods on morphology, photosynthetic characters and carbohydrate of cucumber seedlings

LI Xue[1], ZHAO Shiwen[1], BAO Xingxing[1], WU Yongjun[2], YANG Zhenchao[1*]
(1. College of Horticulture, Northwest A & F University, Yangling 712100, China;
2. College of Life Science, Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

Abstract　The study was to investigate the effect of photoperiod on morphology, photosynthetic characteristics and carbohydrate content of cucumber seedlings. Under a light intensity of 250 μmol/(m^2·s), four treatments of photoperiods of 8 h/16 h, 12 h/12 h, 16 h/8 h and 20 h/4 h were set to compare the effects of each treatment on cucumber seedlings. The results showed that: The morphological differences of cucumber seedlings after different photoperiod treatments were significant. Their plant height, stem thickness, fresh weight, dry weight and leaf area were all significantly different, and the plant height, stem thickness, and total leaf area under the 12 h/12 h treatment were significantly better than the other treatments. As the photoperiod increases, the thickness of various tissues in the leaves increased, and the activity of Rubisco showed a decreasing trend. The 8 h/16 h treatment significantly increased by 66.23% and 82.86% compared to the 20 h/4 h treatments. The total nitrogen content of cucumber seedlings showed a significant decreasing trend with the increase of photoperiod. The total carbon content under 12 h/

收稿日期:2023-06-25
基金项目:陕西省技术创新引导专项(2021QFY08-02);西藏高原设施蔬菜关键技术创新与集成项目(XZ202202YD0002C);设施蔬菜瓜果名优品种引进与标准化示范基地建设项目(QYXTZX-AL2023-07);2021年陕西省千亿级设施农业专项(K3030821094)
第一作者:李雪(ORCID:0009-0003-4096-4605),硕士研究生,E-mail:lixue5891@foxmail.com
通讯作者:杨振超(ORCID:0000-0002-0017-4348),副教授,主要从事设施农业环境工程的研究,E-mail:yangzhenchao@mail.nwsuaf.edu.cn

12 h treatment was significantly higher than that under 8 h/16 h and 20 h/4 h treatments. The starch content in 12 h/12 h and 16 h/8 h treatments was significantly higher than the other treatments. Taken together, the 12 h/12 h treatment was the optimum photoperiod for cucumber seedling growth. The study can provide a basis and reference for plant factory nursery and supplemental light in facilities.

Keywords　cucumber; photoperiod; photosynthesis; carbohydrate content

发光二极管（LED）由于对植物光合作用影响效率显著[1]，且可优化光质以满足作物特定光照要求等多项优点，广泛用于植物生产中。光合作用是植物积累生物量的主要过程，植物生长发育与光合密不可分[2]。植物的形态和生理变化显示出对光环境的适应，其中光质、光强及光周期均为重要的环境影响因子。

植物对于不同波长的光质有着不同的形态及生理反应，多种植物对于红光和蓝光的反应比其余波长的光更加敏感[3-4]，主要因为其特异的光感受器光敏色素（*PHYA* 和 *PHYB*）和隐色素（*CRY1*、*CRY2* 和 *CRY3*）介导[5]。光敏色素对红光敏感，而隐色素对蓝光敏感。有研究表明适当添加红蓝光可提高黄瓜和生菜叶的叶绿素含量、净光合速率、气孔导度及光合能力[3,5]。适宜的红蓝光处理能显著提高电子转移速率、光化学效率系数（ΦPSII）、光化学猝灭（QP）和捕获能量效率（Fv′/Fm′）并促进光系统II（PSII）反应中心的开放[6]。

光照强度影响植物光合反应中心的结构与系统活性[7]。在一定程度内增加光强可以增加植物碳水化合物积累并促进光合作用[8]，使得植物比叶面积[9]及叶片厚度增加[10]。而弱光下将会降低卡尔文循环相关酶活性[11]，使得作物光合速率降低。

光周期是调节植物生长发育的重要因素之一，植物的形态和生理发育可通过改变光周期进行调整[12-14]。故而当植物光照时间较短时，人为延长补光时间可增加植物生物量、提高营养品质并促进其生长发育。Soffe 等[15]证明适当延长光周期可以增加生菜、芹菜和菠菜的植株干重。Ali 等[16]发现，5种蔬菜的叶绿素、抗氧化物质和总多酚等多种营养物质均在 12 h/12 h 光周期下达到最高，在 24 h/0 h 下最低。且有研究表明，延长光周期可以扩大西葫芦幼苗子叶面积[17]。李世栋[18]研究发现在光周期为 16 h/8 h 的条件下，甜瓜幼苗的叶面积、干质量和鲜质量达到最大值。在对厚皮甜瓜[18]、生菜[19]和茄子幼苗[20]的研究中均发现延长光周期可以提高幼苗的色素含量。因此可通过改变植物光周期以影响其生长发育。

黄瓜（*Cucumis sativus* L.）对于光环境敏感程度高于其他温室作物，其生长发育受到光周期变化的显著影响，且目前光周期对植物光合特性的影响研究较少，故本研究以黄瓜为试验材料，探究不同光周期对黄瓜幼苗形态、光合性状及碳水化合物含量的影响，以期为植物工厂化育苗提供参考。

1　材料与方法

1.1　试验材料

本试验于 2022 年 10—12 月在西北农林科技大学园艺学院设施农业生物与环境工程实验室进行。供试材料为黄瓜‘新津优 1 号’，种子购置于山东泰安华益种业有限责任公司。光源采用西安因变光电科技有限公司生产的 LED 灯板和 LED 控制系统 V1.0，可调节 LED 光质配比及光照强度。

将黄瓜种子催芽后播于 10 cm×10 cm 营养钵中，在人工气候箱内生长，设置光强 150 μmol/(m^2·s)，昼夜温度 28 ℃/25 ℃，光周期 12 h/12 h，相对湿度 60%，适量浇灌水分；在生长至约 3 d 子叶完全展开时，移植到装有 LED 光源的栽培架中，浇灌 1/4 Hoagland 黄瓜营养液（pH 为 6.5±0.1，EC 值为 2.2～2.5 ms/cm），其中昼夜温度 28 ℃/25 ℃，相对湿度 40%～50%，长至 25 d 约 4 叶 1 心时测定相关指标。

1.2　试验设计

控制试验光合有效辐射强度（400～700 nm）为 250 μmol/(m^2·s)，光周期设置为 8 h/16 h、12 h/12 h、16 h/8 h 和 20 h/4 h，各处理光谱图如图 1 所示。

1.3　项目测定

1.3.1　形态指标

在黄瓜幼苗生长至 4 叶 1 心时随机选取 6 株，使用刻度尺测定其地上部高度；使用游标卡尺测定茎粗；使用叶面积仪（AM350 便携式叶面积仪，英国）测定各叶片面积；用电子天平测定其地上部鲜重；放置烘箱短暂杀青，60 ℃烘至恒重后测其干重。

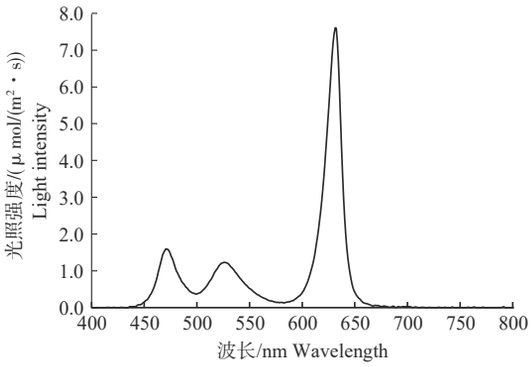


图1 不同光周期处理光谱图

Fig.1 Different photoperiods treatment spectra

1.3.2 气孔特征

每个处理随机选取3株黄瓜幼苗，取第3片叶的相同叶位制作临时装片。将所取叶片放置于透明胶带上，轻压使之结合紧密后用刀片轻刮去叶肉组织；将装片粘贴至载玻片，切片于显微镜下（奥林巴斯BX63，日本）观察，于20×观察测定气孔密度，于40×下观察测定气孔大小。每个装片选取10个视野，每个视野选取20个气孔，通过ImageJ软件测量气孔长、气孔宽、孔隙长及孔隙宽。孔隙面积＝π×孔隙长/2×孔隙宽/2，每叶气孔面积＝孔隙面积×气孔密度[21]。

1.3.3 叶片结构参数测定

选取各处理中的3株黄瓜幼苗的第3片真叶，在避开主叶脉的相同叶位取10 mm×10 mm的叶片，放入甲醛-乙酸-乙醇（FAA）固定液中，再经乙醇脱水、二甲苯透明、番红-固绿染色和石蜡包埋切片等步骤，最终制成石蜡切片，置于显微镜下（奥林巴斯BX63，日本）观察。每个装片选取10个视野，通过ImageJ软件测量叶片厚度、上下表皮厚度、栅栏组织厚度和海绵组织厚度。

1.3.4 光合色素及光合特性测定

选取各处理中的3株黄瓜幼苗的第1片真叶，使用植物光合测定仪6800（LI-6800，美国）测定光响应曲线。设置叶室温度为24 ℃，CO_2水平为400 μmol/mol，相对湿度为60%，测定光源为R90B10，光强为1 500、1 000、800、600、400、200、150、100、50和0 μmol/(m²·s)，测定其净光合速率、胞间CO_2浓度及气孔导度。

1.3.5 Rubisco活性测定

使用植物1,5-二磷酸核酮糖羧化酶ELISA检测试剂盒（江苏酶免实业有限公司）测定各处理植株中的Rubisco活性。

1.3.6 叶绿素荧光测定

使用双通道调制叶绿素荧光仪（DUAL-PAM-100，德国）测定叶绿素荧光相关参数。每个处理随机选3株黄瓜幼苗，选取第3片真叶测定。测量前植株叶片需暗适应30 min，然后打开测量光，记录暗适应后的最小荧光Fo；紧接着打开1个持续时间0.3 s的饱和脉冲光，测量并记录暗适应后的最大荧光Fm；饱和脉冲光关闭后荧光迅速回到Fo附近，然后打开光化光，记录叶绿素荧光从黑暗转到光照的响应过程，待荧光曲线达到稳态后关闭光化光，结束整个测量过程，记录并保存荧光数据。

1.3.7 总碳、总氮含量测定

将烘干后的植株整株打碎研磨，过0.15 mm筛后，称取0.2 g置于全自动碳氮分析仪（Primacs SNC100-IC-E，荷兰）测定总碳和总氮含量。

1.3.8 碳水化合物含量测定

选取各处理中的3株黄瓜幼苗的第2片真叶，取样后充分研磨进行测定。可溶性糖含量的测定采用蒽酮比色法[22]，淀粉含量的测定采用淀粉含量检测试剂盒（北京索莱宝生物科技有限公司）。

2 结果与分析

2.1 不同光周期对黄瓜幼苗形态指标的影响

不同光周期下黄瓜幼苗的株高、鲜重、干重及总叶面积测定数据如表1所示。12 h/12 h处理下株高、茎粗、鲜重及总叶面积均优于其余3个处理，16 h/8 h处理下干重较8 h/16 h及12 h/12 h处理显著增加239.77%和40.31%。

2.2 不同光周期对黄瓜幼苗气孔特征的影响

观察各处理下气孔结构并测定数据（表2），16 h/8 h处理下孔隙宽及气孔宽显著高于其他处理；12 h/12 h处理下孔隙长、气孔长及孔隙面积显著高于其余处理，孔隙面积分别高于8 h/16 h、16 h/8 h及20 h/4 h处理27.52%、18.63%和27.21%。

2.3 不同光周期对黄瓜幼苗叶片结构的影响

对不同处理叶片石蜡切片进行观察发现，不同光周期处理后的黄瓜幼苗叶片结构差异较大（表3）。8 h/16 h处理上表皮厚度较12 h/12 h、16 h/8 h和20 h/4 h处理显著下降18.50%、28.48%和19.48%；8 h/16 h处理栅栏组织厚度较12 h/12 h和16 h/8 h处理显著上升11.06%和10.92%；16 h/8 h处理海绵组

表 1　不同光周期对黄瓜幼苗形态指标的影响

Table 1　Effects of different photoperiod on morphological indices of cucumber seedlings

光周期 Photoperiod	株高/cm Plant height	茎粗/mm Tem diameter	鲜重/g Fresh weight	干重/g Dry weight	总叶面积/cm^2 Total leaf area
8 h/16 h	15.803±0.699 c	5.237±0.361 c	10.670±0.920 b	0.797±0.092 c	327.620±17.425 c
12 h/12 h	28.313±2.442 a	7.117±0.197 a	27.274±2.522 a	1.930±0.518 b	727.790±34.366 a
16 h/8 h	23.560±1.140 b	6.555±0.175 b	21.737±1.055 a	2.708±0.266 a	509.415±30.485 b
20 h/4 h	14.575±0.075 c	5.695±0.225 c	19.484±0.579 a	2.229±0.093 ab	432.435±30.615 bc

注：同列数据不同字母表示差异显著（$P \leqslant 0.05$）。8 h/16 h代表光照8 h，黑暗16 h，以此类推。下同。

Note: Data in the same column with different letters indicate significant differences（$P \leqslant 0.05$）. 8 h/16 h represents 8 h of photoperiod and 16 h of darkness, and so on. The same below.

表 2　不同光周期对黄瓜幼苗气孔特性的影响

Table 2　Effects of different photoperiod on stomatal characteristics of cucumber seedlings

光周期 Photoperiod	孔隙宽/μm Pore width	孔隙长/μm Pore length	气孔宽/μm Stomatal width	气孔长/μm Stomatal length	气孔密度/（N/mm^2） Stomatal density	孔隙面积/μm^2 Pore area
8 h/16 h	3.635±0.686 b	7.877±1.418 c	15.541±1.504 b	18.272±1.859 c	156.808±27.454 a	22.860±5.463 c
12 h/12 h	3.694±0.685 b	9.933±1.859 a	15.800±1.309 b	21.089±2.416 a	133.964±18.087 bc	29.151±8.959 a
16 h/8 h	3.860±0.630 a	8.015±1.289 c	15.870±1.106 a	18.633±1.709 c	139.749±15.741 b	24.573±6.919 b
20 h/4 h	3.466±0.525 c	8.343±1.266 b	15.193±1.093 c	19.027±1.716 b	122.835±15.237 c	22.916±6.013 c

表 3　不同光周期对黄瓜幼苗叶片结构的影响

Table 3　Effects of different photoperiod on structural parameters of cucumber seedling leaves

光周期 Photoperiod	上表皮厚度/μm Upper epidermis thickness	栅栏组织厚度/μm Palisade tissue thickness	海绵组织厚度/μm Spongy tissue thickness	下表皮厚度/μm Inferior epidermis thickness
8 h/16 h	11.727±3.193 b	58.765±5.211 a	96.741±19.193 a	7.143±2.179 b
12 h/12 h	13.897±2.181 a	52.915±3.819 b	88.148±16.98 ab	7.946±1.959 ab
16 h/8 h	15.067±3.086 a	52.978±6.659 b	101.00±14.462 a	8.044±2.553 ab
20 h/4 h	14.011±1.710 a	54.929±3.819 ab	85.441±9.803 b	9.511±2.093 a

织厚度较20 h/4 h处理显著上升18.21%；随着光周期的增加，下表皮厚度呈现上升趋势。

2.4　不同光周期对黄瓜幼苗光合特性的影响

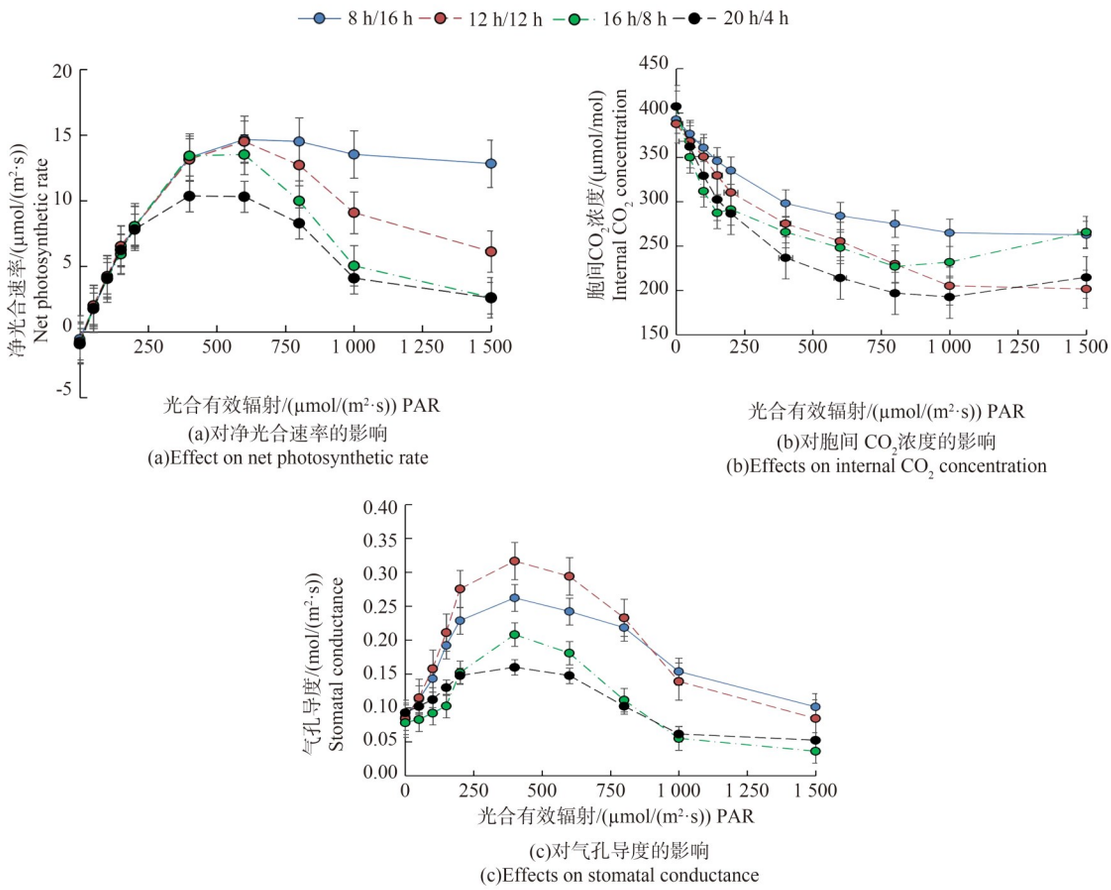
对不同光周期下幼苗光合相关指标进行测定，结果如图2所示。随着光周期的增加，各处理下的黄瓜幼苗在高光强下（光强＞600 μmol/（m^2·s））的光合能力随之下降（图2（a））；胞间CO_2浓度无显著差异，但光周期较短的处理胞间CO_2浓度高于长光周期处理（图2（b））；12 h/12 h处理的气孔导度在200～800 μmol/（m^2·s）光合有效辐射下优于其余处理（图2（c））。

2.5　不同光周期对黄瓜幼苗Rubisco活性的影响

对于各处理下黄瓜幼苗Rubisco酶活性进行测定（图3），随着光周期的增加，Rubisco活性呈现下降趋势，8 h/16 h处理较16 h/8 h和20 h/4 h显著增加66.23%和82.86%，12 h/12 h处理较其余2个处理Rubisco酶活性显著增加。

2.6　不同光周期对黄瓜幼苗叶绿素荧光参数的影响

对于各处理下黄瓜幼苗叶绿素荧光参数进行



8 h/16 h表示光照8 h,黑暗16 h,以此类推。下同。

8 h/16 h represents 8 h of photoperiod and 16 h of darkness. The same below.

图2 不同光周期对黄瓜幼苗光合特性的影响

Fig. 2 Effects of different photoperiod on photosynthetic characteristics of cucumber seedlings

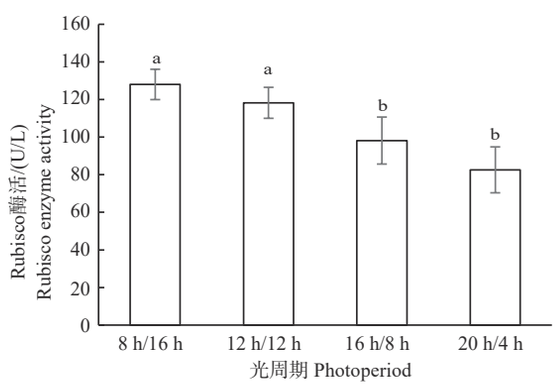


图3 不同光周期对黄瓜幼苗Rubisco活性的影响

Fig.3 Effects of different photoperiod on the activity of Rubisco enzyme in cucumber seedlings

测定(表4)。随着光周期的增加,Fv/Fm、ΦNO及ΦNPQ均呈下降趋势。8 h/16 h处理下ΦNO较12 h/12 h、16 h/8 h及20 h/4 h处理显著上升48.71%、60.56%和76.75%。

2.7 不同光周期对黄瓜幼苗总碳和总氮含量的影响

不同光周期对黄瓜幼苗总碳和总氮含量的影响如表5所示。12 h/12 h和16 h/8 h处理总碳含量显著高于其他处理;随着光周期的增加,总氮含量、碳氮比均呈下降趋势,8 h/16 h处理下总氮含量较12 h/12 h、16 h/8 h和20 h/4 h处理显著上升48.24%、134.95%和158.84%;8 h/16 h处理下碳氮比较12 h/12 h、16 h/8 h和20 h/4 h处理显著上升56.36%、145.71%和164.62%。

2.8 不同光周期对黄瓜幼苗碳水化合物含量的影响

不同处理对黄瓜幼苗碳水化合物含量的影响如表6所示。各处理间可溶性糖含量无显著性差异,12 h/12 h和16 h/8 h处理淀粉含量显著优于其余处理。

表 4　不同光周期对黄瓜叶绿素荧光参数的影响

Table 4　Effects of different photoperiod on chlorophyll fluorescence parameters of cucumber

光周期 Photoperiod	Fv/Fm	ΦPSII	ETR	ΦNO	ΦNPQ	qL	NPQ
8 h/16 h	0.859±0.012 a	0.314±0.037 a	114.200±14.100 a	0.403±0.003 a	0.478±0.003 a	0.222±0.001 a	2.093±0.117 a
12 h/12 h	0.858±0.001 a	0.294±0.006 a	110.800±2.300 a	0.271±0.031 b	0.454±0.031 a	0.199±0.008 a	1.830±0.159 ab
16 h/8 h	0.844±0.030 a	0.294±0.055 a	102.650±8.600 a	0.251±0.065 b	0.415±0.065 a	0.146±0.071 a	1.590±0.395 b
20 h/4 h	0.811±0.013 b	0.252±0.056 a	97.900±7.750 a	0.228±0.037 b	0.345±0.037 b	0.141±0.057 a	0.869±0.210 c

注：Fv/Fm 为 PSII最大光量子效率；ΦPSII为 PSII实际光化学量子产额；ETR 为 PSII光合电子传递速率；ΦNO 为 PSII非调节性能量耗散的量子产额；ΦNPQ 为 PSII调节性能量耗散的量子产额；NPQ 为非光化学淬灭；qL 为光化学淬灭。

Note: Fv/Fm is the maximum photometric quantum efficiency of PSII; ΦPSII is the actual photochemical quantum yield of PSII; ETR is the photosynthetic electron transfer rate of PSII; ΦNO is the quantum yield of unregulated energy dissipation of PSII; ΦNPQ is the quantum yield of regulated energy dissipation of PSII; NPQ is non-photochemical quenching; qL is photochemical quenching.

表 5　不同光周期对黄瓜幼苗总碳和总氮的影响

Table 5　Effects of different photoperiod on total carbon and nitrogen of cucumber seedlings

光周期 Photoperiod	总碳含量/% Total carbon content	总氮含量/% Total nitrogen content	碳氮比 C/N
8 h/16 h	35.695±0.209 c	12.274±0.158 a	0.344±0.006 a
12 h/12 h	37.570±0.217 a	8.280±0.318 b	0.220±0.007 b
16 h/8 h	37.280±0.061 a	5.224±0.175 c	0.140±0.004 c
20 h/4 h	36.396±0.209 b	4.742±0.108 d	0.130±0.004 c

表 6　不同光周期对黄瓜幼苗碳水化合物含量的影响

Table 6　Effects of different photoperiod on carbohydrate of cucumber seedlings

光周期 Photoperiod	可溶性糖质量分数/(mg/100 g) Soluble sugar mass fraction	淀粉质量分数/(mg/g) Starch mass fraction
8 h/16 h	7.048±0.116 a	3.094±0.882 c
12 h/12 h	7.055±0.887 a	9.431±2.344 a
16 h/8 h	7.306±0.587 a	10.601±2.385 a
20 h/4 h	7.601±0.431 a	8.898±1.311 b

3　讨　论

光是影响植物生长发育过程的重要因素。不同植物对光周期的反应不同，毛金柱等[23]研究显示，当光周期为 20 h/d 时，生菜的株高、地上部分干鲜重和根部鲜重最高；Soffe 等[15]证明适当延长光周期可以增加生菜、芹菜和菠菜的植株干重；何蔚[24]研究结果显示，红蓝光下光周期为 14 h/10 h 时，可以提高番茄苗的生长发育。因此，延长适宜的光照时间能促进植物生长。本试验中各光周期处理后对黄瓜幼苗形态影响显著，其中 12 h/12 h 处理下株高、茎粗和总叶面积显著优于其余 3 个处理，这与李海云等[17]的结果一致，过短及过长日照均不利于黄瓜幼苗生长。本试验结果表明 16 h/8 h 处理干重较 8 h/16 h、12 h/12 h 和 20 h/4 h 处理显著增加，这与李海云等[17]结果不一致。推测由于黄

瓜幼苗品种及处理时光强不同，故而所得结果不一致。

随着光周期的改变，黄瓜幼苗叶片的孔隙面积和每叶孔隙面积均发生变化。薛欢等[25]研究表明，随着光照时间的缩短，金银花叶片气孔导度降低。可见光照周期将会影响植物叶片气孔开闭。早期研究表明，叶片结构受到环境因素的影响，较高的光强度主要会增加叶片厚度、栅栏组织厚度和海绵组织厚度[26]。本试验结果表明，不同光周期处理后黄瓜幼苗叶片结构差异较大，随着光照周期的增加，其下表皮厚度呈现显著上升趋势；适宜光周期会增大叶片上表皮、栅栏组织及海绵组织厚度，过长光周期将会导致其厚度下降，这与刘奇华等[27]对于烟叶、生菜及水稻的研究结果一致。

随着光周期的增加，黄瓜幼苗的光饱和点随之降低，光合能力也随之下降，故而推测过长光周期会降低黄瓜幼苗的光合能力。PSII最大光量子效率（Fv/Fm）可评价植物受到非生物胁迫的水平[28]，当Fv/Fm低于0.83时，表示植物受到胁迫而使得光合能力下降[29]。本研究表明，随着光照周期的增加，Fv/Fm呈下降趋势，且20 h/4 h处理下Fv/Fm值小于0.83，说明过高光周期对于黄瓜光合造成一定胁迫。随着光照周期的增加，ΦNO、ΦNPQ和NPQ呈现下降趋势，其中8 h/16 h处理下的各值均显著高于20 h/4 h处理，这与Matsuda等[30-31]研究结果一致，过长光照时间降低了叶片的光捕获和电子传输能力，故而过高光周期将会降低电子传递链效率。ΦNPQ表示通过调节性的光保护机制耗散为热的能量[32-33]，本试验结果表明随着光周期的增加，ΦNPQ和NPQ随之降低即能量耗散的效率随之降低。

随着光周期的增加，黄瓜幼苗叶片的Rubisco活性呈现下降趋势，8 h/16 h处理较16 h/8 h和20 h/4 h显著增加66.23%和82.86%。随着光周期的增加，各处理间可溶性糖含量呈现上升趋势但各组间无显著性差异。淀粉含量在16 h/8 h处理下达到最大后下降。这与张欢等[34]对油葵芽苗菜的研究结果一致。本试验结果显示，20 h/4 h处理下的淀粉含量显著低于8 h/16 h和16 h/8 h处理，这与Liu等[35]对于莴苣的研究结果一致，过长光周期将会导致昼夜节律紊乱从而致使叶片损伤，不利于碳水化合物的积累。

4 结 论

不同光周期处理后的黄瓜幼苗形态差异较大，12 h/12 h处理下植物的株高、茎粗、鲜重及叶面积均优于其余3个处理；随着光周期的增加叶片各组织厚度逐渐增厚；12 h/12 h处理下Rubisco酶活性显著高于16 h/8 h及20 h/4 h处理，与8 h/16 h处理无显著差异。适宜的光周期培养有利于气孔开放，在12 h/12 h处理下叶片孔隙面积显著高于其余处理。过长光周期对于黄瓜光合影响不利，故以12 h/12 h光照为佳。

参考文献 References

[1] van Iersel M W, Bugbee B. A multiple chamber, semicontinuous, crop carbon dioxide exchange system: Design, calibration, and data interpretation [J]. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 2000, 125(1): 86-92

[2] Zelitch I. The close relationship between net photosynthesis and crop yield[J]. *BioScience*, 1982, 32(10): 796-802

[3] Wang J, Lu W, Tong Y X, Yang Q C. Leaf morphology, photosynthetic performance, chlorophyll fluorescence, stomatal development of lettuce (*Lactuca sativa* L) exposed to different ratios of red light to blue light[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2016, 7: 250

[4] Yang Z C, He W, Mou S T, Wang X X, Chen D Y, Hu X T, Chen L H, Bai J Y. Plant growth and development of pepper seedlings under different photoperiods and photon flux ratios of red and blue LEDs[J]. *Editorial Office of Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(17): 173-180

[5] Hogewoning S W, Trouwborst G, Maljaars H, Poorter H, van Ieperen W, Harbinson J. Blue light dose-responses of leaf photosynthesis, morphology, and chemical composition of *Cucumis sativus* grown under different combinations of red and blue light[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2010, 61(11): 3107-3117

[6] Liu X Y. Regulation of the growth and photosynthesis of cherry tomato seedlings by different light irradiations of light emitting diodes (LED)[J]. *African Journal of Biotechnology*, 2012, 11(22): 217-221

[7] Poorter H, Niinemets U, Ntagkas N, Siebenkäs A, Mäenpää M, Matsubara S, Pons T. A meta-analysis of plant responses to light intensity for 70 traits ranging from molecules to whole plant performance [J]. *New Phytologist*, 2019, 223(3): 1073-1105

[8] Roni M Z K, Islam M S, Shimasaki K. Response of *Eustoma* leaf phenotype and photosynthetic performance to LED light quality [J]. *Horticulturae*, 2017, 3(4): 50

[9] Fan X X, Xu Z G, Liu X Y, Tang C M, Wang L W, Han X L. Effects of light intensity on the growth and leaf development of young tomato plants grown under a combination of red and blue light [J]. *Scientia Horticulturae*, 2013, 153: 50-55

[10] Evans J R, Poorter H. Photosynthetic acclimation of plants to growth

irradiance: The relative importance of specific leaf area and nitrogen partitioning in maximizing carbon gain[J]. *Plant, Cell & Environment*, 2001, 24(8): 755-767

[11] Huang W, Zhang S B, Liu T. Moderate photoinhibition of photosystem II significantly affects linear electron flow in the shade-demanding plant *Panax notoginseng*[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 9: 637

[12] Valverde F, Mouradov A, Soppe W, Ravenscroft D, Samach A, Coupland G. Photoreceptor regulation of CONSTANS protein in photoperiodic flowering[J]. *Science*, 2004, 303(5660): 1003-1006

[13] Jackson S D. Plant responses to photoperiod [J]. *New Phytologist*, 2009, 181(3): 517-531

[14] Bourget C M. An introduction to light-emitting diodes[J]. *HortScience*, 2008, 43(7): 1944-1946

[15] Soffe R W, Lenton J R, Milford G F J. Effects of photoperiod on some vegetable species[J]. *Annals of Applied Biology*, 1977, 85(3): 411-415

[16] Ali M B, Khandaker L, Oba S, Comparative study on functional components, antioxidant activity and color parameters of selected colored leafy vegetables as affected by photoperiods [J]. *Journal of Food Agriculture and Environment*, 2009, 7(4): 392-398

[17] 李海云，李长新，张复君，齐辉. 不同光周期对西葫芦幼苗生长的影响[J]. 北方园艺，2009(5): 17-19

Li H Y, Li C X, Zhang F J, Qi H. The effect of different photoperiod on growth of summer squash seedling[J]. *Northern Horticulture*, 2009(5): 17-19(in Chinese)

[18] 李世栋. 不同光温条件对厚皮甜瓜幼苗生长及生理特性影响的研究[D]. 杨凌：西北农林科技大学，2007

Li S D. Effects of different light and temperature conditions on growth and physiological characteristics of muskmelon seedlings[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2007(in Chinese)

[19] 马丽媛，李艳，张冠智，李洋，武永军，杨振超. LED不同光周期和占空比组合对生菜生长、光合及叶绿素荧光参数的影响[J]. 中国农业大学学报，2023, 28(4): 91-100

Ma L Y, Li Y, Zhang G Z, Li Y, Wu Y J, Yang Z C. Effects of different LED light supply modes on the growth, photosynthesis and fluorescence of lettuce[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2023, 28(4): 91-100(in Chinese)

[20] 陈敏，李海云. 不同光周期对茄子幼苗生长的影响[J]. 北方园艺，2010(16): 53-55

Chen M, Li H Y. Effect of different photoperiod on the growth of eggplant seedling [J]. *Northern Horticulture*, 2010 (16): 53-55 (in Chinese)

[21] Seif M, Aliniaeifard S, Arab M, Mehrjerdi M Z, Shomali A, Fanourakis D, Li T, Woltering E. Monochromatic red light during plant growth decreases the size and improves the functionality of stomata in chrysanthemum[J]. *Functional Plant Biology*, 2021, 48(5): 515

[22] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京：高等教育出版社，2006

Gao J F. *Experimental Guidance for Plant Physiology*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006 (in Chinese)

[23] 毛金柱，邱权，张芳，李宁，胡跃高，薛绪掌. LED光源下不同光照时间对生菜生长的影响[J]. 农机化研究，2014, 36(3): 141-145

Mao J Z, Qiu Q, Zhang F, Li N, Hu Y G, Xue X Z. Effects of different light durations on the growth of lettuce(*Lactuca sativa* L) in LED light source[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2014, 36(3): 141-145 (in Chinese)

[24] 何蔚. 不同光周期和光质配比对番茄和辣椒苗生长的影响[D]. 杨凌：西北农林科技大学，2017

He W. Effects of different photoperiod and light quality ratio on the growth of tomato and pepper seedlings[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2017 (in Chinese)

[25] 薛欢，朱梅，房海灵，梁呈元. 光周期对金银花叶片光合特性和抗氧化酶活性的影响[J]. 江苏林业科技，2018, 45(4): 13-16

Xue H, Zhu M, Fang H L, Liang C Y. Effects of photoperiod on photosynthesis and antioxidative enzyme activities of *Lonicera japonica* [J]. *Journal of Jiangsu Forestry Science & Technology*, 2018, 45(4): 13-16 (in Chinese)

[26] Wu Y S, Gong W Z, Yang W Y. Shade inhibits leaf size by controlling cell proliferation and enlargement in soybean [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 9259

[27] 刘奇华，周学标，杨连群，李天，张建军. 生育前期遮光对水稻灌浆期剑叶生理特性及籽粒生长的影响[J]. 应用生态学报，2009, 20(9): 2135-2141

Liu Q H, Zhou X B, Yang L Q, Li T, Zhang J J. Effects of early growth stage shading on rice flag leaf physiological characters and grain growth at grain-filling stage[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(9): 2135-2141(in Chinese)

[28] Baker N R. Chlorophyll fluorescence: A probe of photosynthesis *in vivo* [J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2008, 59: 89-113

[29] Björkman O, Demmig B. Photon yield of O_2 evolution and chlorophyll fluorescence characteristics at 77 K among vascular plants of diverse origins[J]. *Planta*, 1987, 170(4): 489-504

[30] Matsuda R, Ozawa N, Fujiwara K. Effects of continuous lighting with or without a diurnal temperature difference on photosynthetic characteristics of tomato leaves[J]. *Acta Horticulturae*, 2012(956): 165-170

[31] Matsuda R, Ozawa N, Fujiwara K. Leaf photosynthesis, plant growth, and carbohydrate accumulation of tomato under different photoperiods and diurnal temperature differences [J]. *Scientia Horticulturae*, 2014, 170: 150-158

[32] 陈祥伟，刘世琦，冯磊，刘景凯，薛小艳. 不同LED光源对乌塌菜光合特性及品质的影响[J]. 华北农学报，2014, 29(S1): 243-248

Chen X W, Liu S Q, Feng L, Liu J K, Xue X Y. Effects of light qualities on photosynthetic response and nutritional quality of Savoy [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2014, 29(S1): 243-248 (in Chinese)

[33] 李泽，谭晓凤，卢锟，张琳，龙洪旭，吕佳斌，林青. 干旱胁迫对两种油桐幼苗生长、气体交换及叶绿素荧光参数的影响[J]. 生态学报，2017, 37(5): 1515-1524

Li Z, Tan X F, Lu K, Zhang L, Long H X, Lv J B, Lin Q. Influence of drought stress on the growth, leaf gas exchange, and chlorophyll fluorescence in two varieties of tung tree seedlings[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(5): 1515-1524 (in Chinese)

[34] 张欢，章丽丽，李薇，邢泽南，张丹，崔瑾. 不同光周期红光对油葵芽苗菜生长和品质的影响[J]. 园艺学报，2012, 39(2): 297-304

Zhang H, Zhang L L, Li W, Xing Z N, Zhang D, Cui J. Effects of

photoperiod under red LED on growth and quality of sunflower sprouts [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2012, 39(2): 297-304 (in Chinese)

[35] Liu J Y, Liu W K. Regulation of accumulation and metabolism circadian rhythms of starch and sucrose in two leaf-color lettuces by red: Blue ratios of LED continuous light [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2022, 196

责任编辑:董金波

第一作者简介: 李雪,硕士研究生,就读于西北农林科技大学园艺学院设施园艺学,主要研究方向为光环境对作物生长发育的影响。本科就读于西北农林科技大学设施农业科学与工程专业。曾获得多项国家级、省部级创新创业赛事奖项,并曾获“创新创业先进个人”“大学生社会实践先进个人”“校级优秀团员”等荣誉。以第一作者发表SCI论文2篇,中文核心期刊3篇,参与发表学术论文1篇(EI收录)。参与“西湾露天煤矿绿色循环发展模式”、“西藏高原设施蔬菜关键技术创新与集成”、深圳市创新创业计划技术攻关面上项目“功能性‘微农业’系统关键技术研发”等课题项目。

通讯作者简介: 杨振超,副教授,博士生导师,主要从事设施农业环境工程的研究。西北农林科技大学西安都市农业试验示范站站长,杨凌示范区立体绿化产业技术联盟理事长,中国农业工程学会、中国农学会都市与休闲农业分会、美国园艺学会和美国农学会会员。主要研究领域为设施农业、都市农业、休闲农业、有机农业和光伏农业。研究方向为植物工厂光热水气等环境精准调控、作物有机茎杆废弃物有机生态循环利用技术以及现代农业园区规划与管理。先后主持国家“863”计划课题、国家支撑计划课题和陕西省科技攻关计划等各类课题20多项;出版教材或专著14本,发表学术论文60余篇,其中SCI/EI收录10余篇;拥有软件著作权1个,授权国际专利1件,国内专利6件;获国家教学成果二等奖1项。