

DA-6 对双 H 型立体栽培草莓光合作用和生长发育的影响

李瑞¹ 张蕾¹ 盛红亚¹ 徐川¹ 高振¹ 万继花¹ 董飞² 王红清^{1*}

(1. 中国农业大学 农学与生物技术学院, 北京 100193;

2. 新疆生产建设兵团第十二师农业科学研究所, 乌鲁木齐 830088)

摘要 针对立体栽培各层草莓生长状况不一致的现状,为促进 DA-6 在草莓立体栽培中的应用,以日光温室双 H 型立体栽培的‘红颜’草莓为试材,测定分析双 H 型立体栽培架上下层的光环境,分析冬季叶面喷施 DA-6 对双 H 型立体栽培上下层草莓光合作用、植株生长、果实产量和品质的影响。结果表明,双 H 型立体栽培的草莓下层光环境较差,下层南部、中部和北部光环境差异较大。随着 DA-6 浓度的提高,DA-6 处理双 H 型立体栽培草莓能够提高净光合速率、促进植株生长、增加草莓产量、改善果实品质,DA-6 对上下层草莓光合作用及生长发育的影响不同。20 mg/L DA-6 处理双 H 型立体栽培上层草莓,净光合速率比对照提高了 13.0%,叶面积提高了 18.0%,显著提高了叶绿素 a、b 含量、果实产量、果实硬度和可溶性固形物;30 mg/L DA-6 处理双 H 型立体栽培下层草莓,净光合速率比对照提高了 53.0%,叶面积提高了 11.1%,显著提高了叶绿素 a、b 含量、果实产量、果实硬度和可滴定酸含量,降低了可溶性固形物含量;40 mg/L DA-6 处理则产生了抑制作用,表明对于光环境相对较差的双 H 立体栽培下层草莓,适度喷施 DA-6 有利于促进草莓的光合作用、产量增加和提早成熟。

关键词 立体栽培;DA-6;草莓;弱光;净光合速率;产量;品质

中图分类号 S 668.4

文章编号 1007-4333(2016)02-0041-09

文献标志码 A

Effect of DA-6 on strawberry photosynthesis and growth in the double-H three-dimensional culture system

LI Rui¹, ZHANG Lei¹, SHENG Hong-ya¹, XU Chuan¹, GAO Zhen¹,
WAN Ji-hua¹, DONG Fei², WANG Hong-qing^{1*}

(1. College of Agriculture and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. Twelfth Division of Xinjiang Production and Construction Corps Academy of Agricultural Sciences, Unumqi 830088, China)

Abstract In view of present situation that the growth of strawberry in different stereo cultivation layers is not the same and to promote the application of DA-6 in stereo cultivation, ‘Benihoppe’ strawberry (*Fragaria × ananassa* Duch.) in the double-H three-dimensional of protected cultivation was used to explore the light conditions of culture system and the effect of spraying DA-6 in winter on strawberry photosynthesis, plant growth, yield and quality of fruit. The results revealed that the light conditions of lower layer of double H-dimensional cultivation was poor and the light environment of southern, central and northern part of lower layer was quite different and DA-6 improved the net photosynthetic rate, promoted plant growth, increased strawberry production and improved fruit quality with the increase of DA-6 concentration. Compared with the control, the net photosynthetic rate of upper strawberry with 20 mg/L DA-6 treatment was increased by 13.0% and LAI improved 18.0% and significantly increased chlorophyll a, b content, fruit yield, fruit firmness and soluble solids; the net photosynthetic rate of lower layer strawberry with 30 mg/L DA-6 was increased by 53.0% and LAI improved 11.1%, resulting in significant increase of chlorophyll a, b content, fruit yield, fruit firmness and titratable acidity and decrease of soluble solids content; however, the growth of strawberry with 40 mg/L DA-6 treatment was inhibited. Our study demonstrated that moderate spraying DA-6 can promote photosynthesis of strawberry and its early maturity, increase the productivity of dual H-dimensional cultivation of strawberries under

收稿日期: 2015-04-24

基金项目: 国家“863”计划(2013AA103002)

第一作者: 李瑞, 硕士研究生, E-mail: lirui9004@163.com

通讯作者: 王红清, 教授, 主要从事草莓栽培与生理研究, E-mail: wanghq@cau.edu.cn

relatively poor light environment in lower layer in.

Keywords three-dimensional cultivation; diethyl aminoethyl hexanoate; strawberry; weak light; net photosynthetic rate; fruit yield; berry quality

草莓(*Fragaria* × *ananassa* Duch.)鲜美红嫩,芳香浓郁,是深受人们欢迎的鲜食水果,具有较高的营养保健价值和经济价值。日光温室草莓立体栽培作为一种新型的栽培方式,能够提高空间利用率和单位面积产量、解决重茬问题^[1],改变了工人作业姿势,缩短了劳动时间,减少了劳动强度,使管理及采摘更加轻松^[2],已成为草莓观光采摘的一个亮点,深受人们喜爱,为企业和农户带来了丰厚的经济效益。双H型立体栽培,单位面积定植的株数多,土地利用率高^[3]。由于栽培架上层对下层的遮阴,使双H型立体栽培下层光环境较差,特别是光合作用最强的中午,下层遮阴严重,不利于草莓的生长发育,导致下层草莓植株长势弱,果实产量低,品质较差。

DA-6(己酸二乙氨基乙醇酯)是一种新型高效的细胞分裂素类植物生长调节剂,植物吸收后可调节植物体内的生长素、细胞分裂素、赤霉素、脱落酸、乙烯等激素活性及在体内的平衡,提高植物叶片叶绿素,蛋白质、核酸的含量和光合效率,促进植物细胞的分裂、生长并提高作物产量和改善果实品质。DA-6因其价格低廉和可重复使用,在农业生产上具有广阔的应用前景^[4]。有研究表明,叶面喷施DA-6能够促进草莓植物干物质增加,扩大植物叶面积^[5],延缓叶片衰老,提高抗逆性^[6],提高叶片叶绿素含量和光合速率^[7-8],延长叶片功能期,促进植物碳水化合物的合成与积累,从而提高作物产量和品质^[9]。此外,DA-6能促进水稻^[10]、大麦和滁菊^[11]幼苗的生长,提高玉米^[12]、花生^[13]、茄子^[14]、生姜^[15]的产量,改善生姜、菠萝^[16]、豌豆^[17]、冬枣^[18]的品质,提高温室桃^[19-20]、大麦^[21]的净光合速率和叶绿素含量,提高水稻幼苗^[22]、冬枣^[23]、辣椒^[24]、花生^[25]、大豆^[26]的抗逆性。

为解决立体栽培下层光照不足以及产量低等问题,本试验以双H型立体栽培的‘红颜’草莓为试材,研究了DA-6对双H型立体栽培草莓光合作用、植株生长、果实产量和品质的影响,旨在为开展DA-6在双H型立体栽培草莓上的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

试验于2013—2014年在北京市昌平区天润园

草莓专业合作社日光温室(8 m × 50 m)内进行,南北走向,所选取的双H型立体栽培架以C型钢骨架作为支撑,长5 m,宽0.36 m,高1.4 m,每架栽植2层草莓;下层栽培槽底部距地面0.3 m,上层底部距下层顶部0.3 m,相邻栽培架间距为0.6 m^[27]。每层栽培槽定植2行‘红颜’草莓,行距20 cm,株距15 cm,选取栽培槽中部生长健壮、长势一致的草莓苗进行试验,每5株为一个小区,最初每株保留5个叶片。

1.2 处理

对双H型立体栽培架上下层草莓叶面喷施DA-6,浓度分别为0、10、20、30、40 mg/L,共设置10个处理(以下简称上CK、上10、上20、上30、上40、下CK、下10、下20、下30、下40),每个处理重复3次。

1.3 内容及方法

1.3.1 双H上下层不同位置光照强度

1月16日9:00—16:00每隔1 h测定1次数据,使用TES-1335型照度计测定距温室塑料薄膜最南端1.8、3.5和5.2 m处(以下简称南部、中部、北部)草莓植株第3叶位的光照强度。

1.3.2 净光合速率和草莓叶面积的测定

DA-6处理后每隔6 d于晴天9:00—11:30采用Li-6400XT型便携式光合仪测定标记叶片的净光合速率(P_n),采用开路系统,光子量照度为900 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,每个处理测定标记叶片的中心小叶。在测定光合速率的同时,用北京益康科技发展有限公司生产的EMA-YM02型叶面积仪测定标记叶片的叶面积。

1.3.3 叶绿素含量的测定

DA-6处理14 d后,每个处理采集3片标记用于测定光合速率的完全功能叶,测定叶绿素含量^[28]。

1.3.4 果实产量测定

自果实开始成熟,采收果实着色面积95%以上的果实,调查果实数目、最大单果重、平均单果重、单株产量,用1/1 000的分析天秤测量单果重。

1.3.5 果实品质测定

果实硬度用KM-1型果实硬度计(日本株式会社藤原制作所)测定,可溶性固形物含量用PAL-1

型数码测糖仪(日本爱宕株式会社)测定,可滴定酸含量用 NaOH 滴定法测定^[28]。

1.4 数据统计分析

数据统计分析和作图采用 SPSS20.0 和 Excel 软件,计算得到平均值及显著性分析采用 LSD 多重比较分析,显著性水平为 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 双 H 型立体栽培草莓上下层的光照强度日变化

由图 1 和表 1 可见,从光照强度看,双 H 型立体栽培架上下层光照强度日变化差异较大,上层不同位置之间和下层不同位置之间在每个时间点的差异较小。双 H 上的光照强度变化曲线为单峰曲线,峰值出现在 12:00 左右,双 H 下为双峰曲线,11:00 左右出现第一峰值,平均光照强度为双 H 上的 51.86%。正午受双 H 上阴影影响,完全遮光,光照强度出现低谷,平均光照强度为双 H 上的 15.56%,之后阴影移开,14:00 左右出现第二峰值,平均光照

强度为双 H 上的 69.43%。9:00—16:00,双 H 下的平均光照强度为双 H 上的 36.48%,可见双 H 下受双 H 上遮阴的影响光照强度较低。从下层各个位置看,下层南部的光照强度日平均量为下层北部的 86.50%,可见双 H 立体栽培下层北部的光照强度比南部更低。

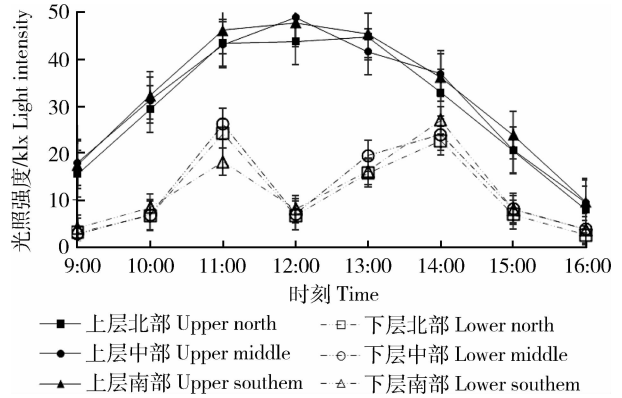


图 1 双 H 型立体栽培草莓不同位置光照强度日变化曲线
Fig. 1 Light intensity change in different positions at the double H hanging culture shelves

表 1 双 H 型立体栽培草莓不同位置的相对光照强度

Table 1 Relative light intensity of strawberry in different locations at the double H hanging culture shelves

位置 Location	时刻 Time								日平均光强 Mean
	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	
上层北部	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
下层北部	19.90	22.90	39.31	15.36	35.17	68.80	33.83	32.49	33.47
上层中部	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
下层中部	15.55	21.87	55.56	14.40	46.84	64.87	39.07	40.25	37.30
上层南部	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
下层南部	23.04	26.07	60.72	16.91	35.48	74.64	33.76	38.81	38.68

注:相对光强表示在某一时刻同一温室位置层光强值为基数 100,下层与上层的比值。

Note:Relative photosynthetic active radiation was the ratio between other layers and upper layer with photosynthetic active radiation of upper layer as the base value of 100.

2.2 DA-6 处理对双 H 型立体栽培草莓植株生长的影响

由表 2 可见,不同浓度 DA-6 处理后 21 d 内,双 H 上下层草莓叶面积迅速增加,之后叶面积增加缓慢,处理后 35 d 草莓叶面积基本停止增加。处理后第 14 天,双 H 上层草莓经过 10、20、30 mg/L DA-6 处理后叶面积分别比上层对照提高了 1.6%、13.2%、18.0%,40 mg/L DA-6 处理后叶面积比上

层对照减少了 1.1%,双 H 下层草莓经过 20、30 mg/L DA-6 处理后叶面积分别比上层对照提高了 5.1%、16.0%,分别比下层对照提高了 0.7%、11.1%,40 mg/L 处理后叶面积比上层对照减少了 19.4%,比下层对照减少了 22.7%,可见对于光温条件较差的双 H 下层草莓,适当提高 DA-6 浓度有利于增加草莓的叶面积进而促进草莓植株生长,过高浓度则抑制草莓的生长。

表2 DA-6处理对草莓叶面积的影响

Table 2 Effect of DA-6 treatment on the strawberry leaf area

cm²

处理 Treatment	处理后时间/d Days after treatment				
	7	14	21	28	35
上 CK	8.64±0.7 bc	14.41±1.5 c	16.60±1.4 bc	17.70±1.7 c	17.80±1.8 c
上 10	9.03±0.9 bc	14.64±1.5 c	17.41±1.6 bc	19.10±1.8 bc	19.32±1.4 b
上 20	8.35±0.6 c	16.31±1.0 ab	17.88±1.7 b	20.74±2.1 a	21.34±2.1 a
上 30	10.67±1.1 ab	17.01±1.9 a	19.85±1.8 a	21.11±2.4 a	21.23±2.2 a
上 40	8.88±0.7 bc	14.25±1.2 c	16.32±1.5 c	17.58±1.5 c	17.59±1.6 cd
下 CK	10.81±0.9 a	15.04±1.5 bc	17.36±1.7 bc	18.51±1.7 bc	19.25±1.8 bc
下 10	7.77±0.5 c	14.23±1.3 c	16.73±1.5 bc	18.28±1.8 bc	18.44±1.7 bc
下 20	7.75±0.6 c	15.15±1.4 b	16.81±1.6 bc	19.24±1.6 b	19.25±1.9 bc
下 30	10.21±1.1 ab	16.71±1.4 a	19.09±2.0 ab	19.18±1.7 bc	20.83±2.0 a
下 40	9.62±0.9 b	11.62±1.1 d	14.16±1.2 d	16.02±1.5 d	16.21±1.5 d

注:每列数字后标相同字母表示在 0.05 水平上无显著差异。下同。

Note: Values followed by same letters in each column are not significantly different at 0.05 level from each other. The same below.

2.3 DA-6 处理对双 H 型立体栽培草莓净光合速率的影响

由表 3 可见,不同浓度 DA-6 处理后 14 d 内,双 H 上下层草莓叶片的净光合速率快速增加,14 d 后增加变缓,处理 21 d 后草莓叶片净光合速率趋于稳定并开始有下降趋势,双 H 上下 2 层经过 40 mg/L DA-6 处理的净光合速率最先下降。处理后第 21 天,双 H 上层草莓经过 10、20、30 mg/L DA-6 处理的净光合速率分别比上层对照提高了 0.6%、13.0%、6.7%,40 mg/L DA-6 处理的净光合速率

比对照下降了 3.0%;双 H 下层草莓经过 30 mg/L DA-6 处理的净光合速率分别比上层对照和下层对照提高了 1.5%、53.0%,10、20 mg/L DA-6 处理的净光合速率分别比上层对照下降了 18.3%、10.2%,但分别比下层对照提高了 22.2%、34.4%,40 mg/L DA-6 处理的净光合速率分别比上层对照和下层对照下降了 36.0%、4.1%,可见光温条件较差的双 H 下层草莓喷施 30 mg/L DA-6 能够有效提高净光合速率,使上下层草莓生长一致,高浓度 DA-6 对草莓的光合作用产生了抑制作用。

表3 DA-6处理对草莓净光合速率的影响

Table 3 Effect of DA-6 treatment on strawberry net photosynthetic rate

%

处理 Treatment	处理后时间/d Days after treatment				
	7	14	21	28	35
上 CK	6.32±0.5 b	8.96±0.7 b	10.96±1.1 b	11.02±1.0 b	10.89±0.9 bc
上 10	5.96±0.4 bc	8.12±0.6 bc	11.02±1.2 b	11.32±1.2 b	11.22±1.0 b
上 20	7.69±0.6 a	10.63±1.0 a	12.39±1.0 a	12.69±1.3 a	12.46±1.4 a
上 30	7.26±0.5 ab	10.21±0.9 ab	11.69±0.9 ab	12.03±1.0 ab	11.68±1.1 ab
上 40	5.62±0.3 bc	8.65±0.6 bc	10.64±1.1 b	9.36±0.8 c	9.01±0.9 c
下 CK	4.35±0.3 c	6.65±0.5 c	7.32±0.6 d	7.36±0.5 d	7.38±0.7 d
下 10	4.96±0.4 c	7.32±0.6 c	8.95±0.8 c	9.36±0.7 c	8.95±0.7 c
下 20	5.23±0.5 bc	8.42±0.8 bc	9.84±0.9 bc	10.12±1.0 c	9.86±0.9 c
下 30	6.39±0.6 b	8.99±0.9 b	11.12±1.1 ab	11.56±1.2 ab	10.99±1.0 bc
下 40	4.31±0.2 c	6.56±0.5 c	7.02±0.6 d	6.58±0.7 d	6.21±0.6 d

2.4 DA-6 处理对双 H 型立体栽培草莓叶绿素含量的影响

表 4 可见,双 H 上下层经过不同浓度 DA-6 处理 14 d 后草莓叶片的总叶绿素含量、叶绿素 a、b 含量存在明显的差异。双 H 上层草莓经过 10、20 mg/L DA-6 处理后显著增加了叶片的叶绿素 a、b 含量,其中 20 mg/L DA-6 处理效果更好,30 mg/L DA-6 处理显著增加了叶绿素 b 含量,40 mg/L DA-

6 处理显著降低了总叶绿素和叶绿素 b 含量。双 H 下层草莓经过 20、30 mg/L 处理后显著提高了叶绿素 a、b 含量并与上层对照之间没有显著差异,其中 30 mg/L 处理后叶绿素 a、b 含量更接近上 CK,40 mg/L 处理显著降低了总叶绿素和叶绿素 a、b 含量。可见通过 30 mg/L DA-6 处理可以使下层光温条件较差的草莓植株叶片中的叶绿素含量增加,促进草莓的光合作用。

表 4 DA-6 处理对叶绿素含量的影响

Table 4 Effect of DA-6 treatment on chlorophyll content

处理 Treatment	总叶绿素/(mg/g) The total chlorophyll	叶绿素 a/(mg/g) Chlorophyll a	叶绿素 b/(mg/g) Chlorophyll b	叶绿素 a/b Chlorophyll a/b
上 CK	2.10±0.19 c	1.47±0.09 c	0.62±0.04 cd	2.37 b
上 10	2.36±0.21 b	1.58±0.10 b	0.77±0.06 c	2.05 cd
上 20	2.95±0.26 a	1.96±0.15 a	1.00±0.07 a	1.96 d
上 30	2.42±0.26 b	1.55±0.10 bc	0.87±0.07 b	1.78 e
上 40	1.91±0.14 de	1.39±0.10 cd	0.52±0.04 e	2.67 a
下 CK	1.79±0.18 e	1.26±0.15 d	0.53±0.02 e	2.38 b
下 10	1.94±0.19 d	1.30±0.11 d	0.63±0.03 d	2.06 cd
下 20	2.00±0.17 cd	1.31±0.13 d	0.69±0.06 cd	1.90 de
下 30	2.14±0.14 c	1.40±0.12 cd	0.74±0.05 c	1.89 de
下 40	1.72±0.11 e	1.17±0.10 e	0.55±0.02 e	2.13 ab

2.5 DA-6 处理对双 H 型立体栽培草莓果实产量的影响

表 5 可见,双 H 上下层经过不同浓度 DA-6 处

理的草莓个数、平均单果重和单株产量存在显著差异。双 H 上层经过 1 mg/L 光低温条件下,提高 DA-6 处理浓度能够草莓的果实产量。

表 5 DA-6 处理对草莓产量的影响

Table 5 Effect of DA-6 treatments on strawberry fruit yield

处理 Treatment	果实数量/(株 ⁻¹) The number of fruit	最大单果重/g The largest fruit weight	平均单果重/g Average single fruit weight	单株产量/(g/株) Yield per plant
上 CK	11.1±1.0 c	32.1 d	16.0±1.3 d	178.6±15.3 d
上 10	11.0±1.3 c	35.6 c	18.9±1.6 c	209.1±19.5 c
上 20	12.4±1.1 a	42.6 a	20.5±1.8 a	253.5±21.8 a
上 30	11.9±1.3 b	35.9 c	19.6±1.5 bc	232.6±20.9 b
上 40	11.6±1.4 bc	39.2 b	17.2±1.7 d	200.7±17.3 c
下 CK	10.9±1.0 c	22.5 f	10.0±1.0 f	109.2±9.9 f
下 10	11.2±0.8 c	26.9 e	11.6±1.1 e	129.9±11.1 e
下 20	11.9±0.9 b	23.5 f	16.7±1.3 d	198.3±16.6 cd
下 30	12.1±1.7 a	28.9 de	17.6±1.5 cd	213.2±18.7 bc
下 40	10.8±1.2 c	23.6 f	11.6±1.1 e	125.6±10.4 e

2.6 DA-6 处理对双 H 型立体栽培草莓果实品质的影响

表 6 可见,DA-6 处理在不同程度上改变了双 H 立体栽培上下层草莓的果实品质。双 H 上下 2 层草莓经过 10、20、30、40 mg/L DA-6 处理后的果实硬度与上 CK 比都有显著性提高,各处理均不同程度地提高了草莓的果实硬度,但是处理间的差异不显著。20 mg/L DA-6 处理双 H 上层草莓比上 CK 显著提高了的可溶性固形物含量,30 mg/L DA-

6 处理双 H 下层草莓比下 CK 显著提高了可溶性固形物,但显著低于上 CK。双 H 上层草莓经过 10、20、40 mg/L DA-6 处理比上 CK 显著提高了可滴定酸含量,30 mg/L 处理也提高了可滴定酸含量,但与上 CK 差异不显著,双 H 下层草莓经过 10、20、30、40 mg/L DA-6 处理均比上 CK 显著提高了可滴定酸含量。可见双 H 下层草莓经过不同浓度 DA-6 处理后降低了可溶性固形物,提高了可滴定酸含量。

表 6 DA-6 处理对草莓果实品质的影响

Table 6 Effect of DA-6 treatment on strawberry fruit quality

处理 Treatment	硬度/(kg/cm ²) Hardness	可溶性固形物/% Soluble solid content	可滴定酸含量/(以柠檬酸计) Titratable acidity
上 ck	0.195±0.020 c	8.75±0.65 b	0.75±0.080 d
上 10	0.206±0.023 b	8.92±0.71 b	1.02±0.120 b
上 20	0.213±0.021 b	9.02±0.76 a	0.89±0.090 c
上 30	0.214±0.025 ab	8.94±0.69 ab	0.81±0.089 d
上 40	0.205±0.022 b	8.42±0.60 bc	0.95±0.105 c
下 CK	0.191±0.020 c	7.36±0.55 d	0.94±0.102 c
下 10	0.203±0.019 b	8.03±0.56 cd	1.11±0.130 a
下 20	0.229±0.028 a	8.31±0.61 c	0.95±0.108 c
下 30	0.220±0.020 a	8.12±0.56 c	1.04±0.110 b
下 40	0.215±0.026 a	7.66±0.54 d	0.93±0.100 c

3 讨论与结论

草莓的产量和品质关系到草莓的经济效益,立体栽培因其每公顷栽培株数多,对土地利用率高,因此早期产量高。本试验中双 H 型立体栽培由于栽培架上层对下层的遮阴,上层的平均光照强度为上层的 36.48%,下层草莓在白天 2/3 的时间内接受的光强不足上层的 50%,正午时刻,双 H 下层平均光照强度仅为上层的 15.56%。弱光条件下,叶绿素 a/b 下降,叶绿素 b 含量相对增加^[34],使净光合速率和羧化效率显著降低,而叶面积显著增加,以利于植株在弱光条件下更多的捕获光能^[32],弱光还导致花芽分化延迟、产品器官发育缓慢^[35]。弱光成为制约双 H 型立体栽培下层草莓生长、产量和品质的主要因素,如何提高下层草莓的光合能力进而提高

草莓产量是目前生产上亟待解决的问题。DA-6 是一种细胞分裂素类生长调节剂,能促进植物的光合作用和叶绿体发育等生理过程,提高叶绿素含量^[29],DA-6 处理可提高不同光强下草莓叶片的净光合速率、光合关键酶 Rubisco 及 FBPase 的活性,使遮荫条件下草莓叶片光合作用显著提高,而且 DA-6 对净光合速率、光合关键酶活性的作用有随着光强减弱而增加的趋势^[6]。

梁艳萍等^[6]认为弱光下光合关键酶 Rubisco 和 FBPase 的活性降低是净光合速率下降的主要原因。弱光条件下,叶片气孔导度和蒸腾速率降低,根部输送的细胞分裂素减少,叶片内细胞分裂素含量低于正常光强下的含量^[30],20 mg/kg 的 DA-6 处理在 50%自然光强下对净光合速率的提高作用大于正常光照条件^[6]。本试验结果表明:对于光照条件较好

的上层草莓, 20 mg/L DA-6 处理使净光合速率比上层对照提高了 13.0%, 显著提高了叶绿素 a、b 含量, 这与前人的研究一致; 对于光照条件较差的下层草莓, 30 mg/L DA-6 处理使净光合速率比下层对照提高了 53.0%, 比上层对照提高了 1.5%, 与下层对照比, 显著提高了叶绿素 a、b 含量, 与上层对照没有显著差异, 叶绿素 a/b 显著降低, 因此对于双 H 型立体栽培草莓下层光强不足上层 40% 的条件下, 适当提高 DA-6 的浓度有利于弱光条件下草莓叶片更多的捕获光能, 弥补了光照不足对草莓光合作用造成的影响。

弱光逆境下, 植物功能叶片的外部形态和内部结构会发生变化, 如叶片变大变薄, 叶柄变长, 叶色变淡等, 这是一种对弱光适应性的反应^[30]。本试验中双 H 上层草莓经 20 mg/L DA-6 处理后 14 d, 叶面积比上层对照提高了 18.0%, 表明 DA-6 能够促进草莓叶面积增加; 双 H 下层草莓经 30 mg/L DA-6 处理后 14 d, 叶面积比上层对照提高了 16.0%, 比下层对照提高了 8.2%, 而下层对照草莓叶面积在 35 d 内始终高于上层对照, 这可能是 DA-6 与弱光对叶面积增加产生了互作。

弱光不仅直接影响光合作用, 还间接影响光合产物在植物各器官间的运输和分配。弱光处理降低了光合速率, 减慢了光合产物运输速度, 使光合产物较多地流向叶片和支持结构^[30], DA-6 能够促进 CO₂ 的固定和碳水化合物的积累, 提高作物产量和品质^[17, 21]。本试验结果表明: 对于光照环境较好的双 H 上层草莓, DA-6 处理显著提高了平均单果重和单株产量, 表明即使上层草莓, 由于温室薄膜的遮阴, 也没有达到最大光合效率, DA-6 促进了光合产物的积累, 增加了草莓产量。对于光环境较差的下层草莓, 草莓单株产量显著高于上 CK, 平均单果重与上 CK 没有显著差异, 而同期下层草莓叶面积相对增加量比上层较少, 表明 DA-6 可能改变了下层草莓光合产物的运输方向, 光合产物向果实分配明显增多, 向叶片分配减少, 因此增加了草莓产量。

弱光还影响植物的花芽分化、开花、授粉、坐果及果实发育等。本试验中双 H 下层草莓经 20 和 30 mg/L DA-6 处理后, 草莓果实成熟提前, 显著提高了果实硬度、可滴定酸含量, 降低了可溶性固形物含量, 因此弱光条件下提高 DA-6 的浓度虽然能促进碳水化合物的运输分配, 增加草莓的产量, 对改善果实品质影响较小。对于双 H 型立体栽培草莓下

层光照不足的情况, 提高 DA-6 的使用浓度有利于增强下层草莓的光合作用, 促进植株生长、调控光合产物运输分配, 促进果实产量增加和提早成熟, 但对果实品质影响较小, 因此 DA-6 可以在草莓立体栽培中适当的应用。

参 考 文 献

- [1] 邢文鑫, 赵永志, 曲明山, 王崇旺, 郭宁, 廖洪, 刘宝文, 董海泉, 宋卫堂. 草莓立体栽培概况[J]. 河北农业科学, 2011, 15(7): 4-7
Xing W X, Zhao Y Z, Qu M S, Wang C W, Guo N, Liao H, Liu B W, Dong H Q, Song W T. General introduction of strawberry stereo cultivation[J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2011, 15(7): 4-7 (in Chinese)
- [2] 罗赞, 林晓, 汪佳易, 王红清. 第七届世界草莓大会草莓立体栽培模式[C]//草莓研究进展(IV)2015, (2): 555-563
Luo Y, Lin X, Wang J Y, Wang H Q. The three-dimensional planting mode of the 7th world congress of strawberry[C]. In: *Research Progress of Strawberry(IV)*, 2015, (2): 555-563 (in Chinese)
- [3] 林晓, 罗赞, 王红清. 草莓日光温室立体栽培的光温效应及其影响分析[J]. 中国农业大学学报, 2014, 19(2): 67-73
Lin X, Luo Y, Wang H Q. Effect of light and temperature on strawberry in three-dimensional culture system[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2014, 19(2): 67-73 (in Chinese)
- [4] 王铭琦. 新型植物生长调节剂 DA-6 的合成与活性研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2006
Wang M Q. Synthesis and activities study of a new plant growth regular DA-6 [D]. Haerbin: Northeast Agricultural University, 2006 (in Chinese)
- [5] 苗鹏飞, 刘国杰, 李绍华, 单守明. DA-6 对秋季草莓叶片光合速率和植株生长的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(12): 2722-2726
Miao P F, Liu G J, Li S H, Shan S M. Effects of foliar spraying DA-6 on the photosynthetic rate and plant growth of strawberry in autumn[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(12): 2722-2726 (in Chinese)
- [6] 梁艳萍, 牟红梅, 王晶晶, 刘国杰, 赛买提·玉素甫. 不同光强下 DA-6 对草莓光合作用及抗氧化酶活性的影响[J]. 中国农业大学学报, 2011, 16(5): 71-76
Liang Y P, Mou H M, Wang J J, Liu G J, Saimaiti Y S P. Effects of DA-6 on leaf photosynthesis and antioxidant enzyme activities of strawberry under different light intensities[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2011, 16(5): 71-76 (in Chinese)
- [7] 单守明, 刘国杰, 李绍华, 苗鹏飞. DA-6 对草莓叶绿体光化学反应和 Rubisco 活性的影响[J]. 中国农业大学学报, 2008, 13(2): 7-10

- Shan S M, Liu G J, Li S H, Miao P F. Effects of different concentrations of DA-6 on chloroplast photochemical reaction and Rubisco activities in strawberry [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2008, 13(2): 7-10 (in Chinese)
- [8] 杨清, 艾沙江·买买提, 刘国杰, 邹文静, 赵红伟, 刘奎霞. DA-6对草莓叶片叶绿素合成前体物质及关键酶活性的影响[J]. 中国农业大学学报, 2012, 17(4): 86-90
- Yang Q, Aishajiang M M T, Liu G J, Zou W J, Zhao H W, Liu K X. Effect of DA-6 on key precursors and enzyme activity of chlorophyll biosynthesis in strawberry leaves [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2012, 17(4): 86-90 (in Chinese)
- [9] 苗鹏飞, 刘国杰, 单守明. DA-6对草莓生长结果影响试验[J]. 中国果树, 2007, (3): 22-25
- Miao P F, Liu G J, Shan S M. Effect of DA-6 on the development and fruit of strawberry [J]. *China Fruits*, 2007, (3): 22-25
- [10] 张子龙, 梁颖. DA-6对水稻种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 西南农业大学学报, 2001, 23(3): 219-221
- Zhang Z L, Liang Y. Effects of DA-6 on seed germination and seedling growth in rice [J]. *Journal of Southwest Agricultural University*, 2001, 23(3): 219-221
- [11] 吴燕, 耿书德, 史长江, 岑明龙, 王雪娟, 连洪燕. DA-6对滁菊幼苗生长及叶片氮代谢的影响[J]. 核农学报, 2014, 28(12): 2283-2289
- Wu Y, Geng S D, Shi C J, Cen M L, Wang X J, Lian H Y. Effects of DA-6 on growth of Chuzhou chrysanthemum seedlings and nitrogen metabolism of Chuzhou chrysanthemum seedlings leaves [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2014, 28(12): 2283-2289 (in Chinese)
- [12] 李占录, 翟世宏, 李爱军, 李作一, 袁斌, 田森林, 王坚强. 玉米抽雄期叶面喷洒 DA-6 增产效果的研究 [J]. 玉米科学, 2006 (14): 84-85
- Li Z L, Zhai S H, Li A J, Li Z Y, Yuan B, Tian S L, Wang J Q. Effect of foliar spraying DA-6 on production during corn tasseling stage [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2006(14): 84-85 (in Chinese)
- [13] 于俊红, 彭智平, 杨少海, 黄继川, 詹愈忠. DA-6对干旱胁迫下花生生理及生长指标的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(1): 168-172
- Yu J H, Peng Z P, Yang S H, Huang J C, Zhan Y Z. Effect of DA-6 on physiological and growth characteristics in peanut under drought stress [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2009, 27(1): 168-172 (in Chinese)
- [14] 胡兆平, 李伟, 陈建秋, 陈海宁, 高荣庆, 贾亮, 刘毅, 李新柱, 郭宗端, 刘广富. 复硝酸钠、DA-6和 α -萘乙酸钠对茄子产量和品质的影响[J]. 中国农学通报, 2013, 29(25): 168-172
- Hu Z P, Li W, Chen J Q, Chen H N, Gao R Q, Jia L, Liu Y, Li X Z, Guo Z R, Liu G F. Effect of sodium nitrophenolate, DA-6 and NAA on the eggplant yield and quality [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(25): 168-172 (in Chinese)
- [15] 燕丛, 徐坤, 李云, 宋小艺. 复硝酸钠和 DA-6 对生姜生长及产量品质的影响 [J]. 中国蔬菜, 2011(20): 69-73
- Yan C, Xu K, Li Y, Song X Y. Effect of compound sodium nitrophenolate and DA-6 on growth, yield and quality of ginger [J]. *China Vegetables*, 2011(20): 69-73 (in Chinese)
- [16] 姚艳丽, 孙光明, 刘忠华, 苏倚, 张秀. DA-6和DCPTA对菠萝果实品质发育的影响[J]. 热带作物学报, 2011, 32(7): 1218-1222
- Yao Y L, Sun G M, Liu Z H, Su Y, Zhang X. Effect of DA-6 and DCPTA on the quality development of pineapple [J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2011, 32(7): 1218-1222 (in Chinese)
- [17] 张明才, 段留生, 田晓莉, 李召虎, 王郁铨. DTA-6+Mo复配剂对甜豌豆产量品质的调控[J]. 华北农学报, 2006, 21: 192-195
- Zhang M C, Duan L S, Tian X L, Li Z H, Wang Y Q. Regulation of compound DA-6+Mo on yield and quality of sweet pea [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2006, 21: 192-195 (in Chinese)
- [18] 谭晓红, 王贵禧, 陈金印, 梁丽松. 采前 DA-6 和 DCPTA 处理对冬枣果实品质发育的影响 [J]. 林业科学研究, 2007, 20(4): 485-489
- Tan X H, Wang G X, Chen J Y, Liang L S. Effects of DA-6 and DCPTA pre-harvest treatment on the quality promotion of 'Dongzao' Jujube (*Zizyphus jujube* Mill cu 'Dongzao') fruits [J]. *Forest Research*, 2007, 20(4): 485-489 (in Chinese)
- [19] 单守明, 刘国杰, 李绍华. DA-6对温室桃树光合作用和叶绿体活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(6): 1237-1241
- Shan S M, Liu G J, Li S H. Effects of different DA-6 concentration on photosynthesis and chloroplast activity of peach in greenhouse [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(6): 1237-1241 (in Chinese)
- [20] 杨清, 艾沙江·买买提, 王志霞, 刘国杰. DA-6对桃树叶片叶绿素合成途径的调控研究[J]. 园艺学报, 2012, 39(4): 621-628
- Yang Q, Aishajiang M M T, Wang Z X, Liu G J. Effects of DA-6 on chlorophyll biosynthesis pathway in peach leaves [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2012, 39(4): 621-628 (in Chinese)
- [21] 周天, 胡永军, 周晓梅, 王萍, 郭继勋. DA-6对野大麦幼苗光合作用和生长的影响[J]. 草业科学, 2004, 21(4): 31-34
- Zhou T, Hu Y J, Zhou X M, Wang P, Guo J X. Effect of DA-6 on seedling photosynthesis and growth of wild barley *Hordeum brevisubulatum* [J]. *Pratacultural Science*, 2004, 21(4): 31-34 (in Chinese)
- [22] 张子龙. DA-6浸种对水稻幼苗生长及抗寒性的影响[J]. 贵州农业科学, 2001, 29(4): 14-17
- Zhang Z L. Effects of DA-6 on seedling growth and its cold-resistance in rice [J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2001, 29(4): 14-17 (in Chinese)
- [23] 马庆华, 谭晓红, 梁丽松, 王贵禧. 生长调节剂 DA-6 和 DCPTA 处理对冬枣果实发育过程中活性氧及其相关生理指标的影响 [J]. 食品科学, 2011, 32(8): 296-299

- Ma Q H, Tan X H, Liang L S, Wang G X. Effects of plant growth regulators DA-6 and DCPTA on reactive oxygen species and related physiological indices of 'Dongzao' during growth[J]. *Food Science*, 2011, 32(8): 296-299 (in Chinese)
- [24] 陈艳丽, 范飞, 王旭, 李绍鹏, 曹振木. DA-6对高温胁迫下黄灯笼辣椒幼苗的影响[J]. *热带作物学报*, 2014, 35(9): 1795-1801
- Chen Y L, Fan F, Wang X, Li S P, Cao Z M. Effects of DA-6 on *capsicum chinense* Jacq seedlings subjected to high temperature [J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2014, 35(9): 1795-1801 (in Chinese)
- [25] 于俊红, 彭智平, 黄继川, 李锐, 詹愈忠. DA-6对花生花期干旱胁迫下的生理效应[J]. *热带作物学报*, 2008, 29(4): 465-467
- Yu J H, Peng Z P, Huang J C, Li R, Zhan Y Z. Effect of DA-6 on physiological changes of peanut at anthesis under drought stress[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2008, 29(4): 465-467 (in Chinese)
- [26] 施晓明, 李淑芹, 许景钢, 佟玉欣. 干旱胁迫下 DA-6 浸种对大豆苗期叶片保护酶活性的影响[J]. *东北农业大学学报*, 2009, 40(9): 48-51
- Shi X M, Li S Q, Xu J G, Tong Y X. Effect leaves soaking the seeds in DA-6 on protective enzyme activities soybean seedling under drought stress[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2009, 40(9): 48-51 (in Chinese)
- [27] 王红清. 一种用于温室草莓观光采摘及生产的双H支架栽培系统[P]. 中国专利, ZL201120293224. 8, 2012-05-30
- Wang H Q. Double H stand cultivation system for strawberry harvesting and production in greenhouse[P]. Chinese Patent, ZL201120293224. 8, 2012-05-30 (in Chinese)
- [28] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 134-161
- Li H S. *Principle and Technology of Plant Physiological and Biochemical Experiments* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 134-161 (in Chinese)
- [29] Ookawa T, Naruoka Y, Sayama A, Hirasawa T. Cytokinin effects on ribulose-1, 5-bisphosphate carboxylase oxygenase and nitrogen partitioning in rice during ripening [J]. *Crop Science*, 2004, 44(6): 2107-2115
- [30] Mohammad P. *Handbook of Photosynthesis* [M]. 2nd ed. Florida: the Chemical Rubber Company Press, 2005: 169-451
- [31] Boonman A, Prinsen E, Gilmer F, Schurr U, Peeters J M, Anton, A C J, Voesenek L L, Pons T. Cytokinin import rate as a signal for photosynthetic acclimation to canopy light gradients[J]. *Plant Physiol*, 2007, 143: 1841-1852
- [32] 刘卫琴, 汪良驹, 刘晖, 庄猛, 李志强. 遮阴对丰香草莓光合作用及叶绿素荧光特性的影响[J]. *果树学报*, 2006, 23(2): 209-213
- Liu W Q, Wang L J, Liu H, Zhuang M, Li Z Q. Effects of shading on photosynthesis and chlorophyll fluorescence characteristics of Toyonoka strawberry cultivar[J]. *Journal of Fruit Science*, 2006, 23(2): 209-213 (in Chinese)
- [33] 杨延杰, 李天来, 林多, 邹琳娜, 范文丽. 弱光逆境对主要果菜生长发育影响的研究进展[J]. *辽宁农业科学*, 2004(6): 26-29
- Yang Y J, Li T L, Lin D, Zhou L N, Fan W L. Researches of the effects on low light stress in fruit vegetable plant growth and development [J]. *Liaoning Agricultural Science*, 2004(6): 26-29 (in Chinese)
- [34] 翁忙玲, 程慧林, 姜卫兵. 弱光对园艺植物光合特性及生长发育影响研究进展[J]. *内蒙古农业大学学报: 自然科学版*, 2007, 28(3): 279-282
- Weng M L, Cheng H L, Jiang W B. Effects of low light on photosynthetic characters growth and development of horticultural plants[J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University: Natural Science Edition*, 2007, 28(3): 279-282 (in Chinese)
- [35] 韩霜, 陈发棣. 植物对弱光的响应研究进展[J]. *植物生理学报*, 2013, 49(4): 309-316
- Han S, Chen F D. Research progress in plant response to weak light[J]. *Plant Physiology Journal*, 2013, 49(4): 309-316 (in Chinese)

责任编辑: 王燕华