

定植密度和剪叶处理对日光温室 番茄冠层光截获性能的影响

高志奎 王梅 任士福 高洪波

河北农业大学园艺学院, 保定 071000

摘要 通过不同定植密度和剪叶处理试验,研究日光温室番茄冠层横向和纵向、光合器官和光合机构的光能利用率,并对其主要参数进行测试和调控分析。通过球状积分仪测得,红光和蓝光下日光温室番茄的叶片吸光系数 ϵ 在基因型和叶位间具有明显差异;‘保罗塔’的红光和蓝光下叶片吸光系数比值 $\epsilon_{red}/\epsilon_{blue} > 1$,表明对红光吸收能力较强;‘Harvest’、‘莱福60’、‘红利’和‘以色列1498’的 $\epsilon_{red}/\epsilon_{blue} < 1$,表明对蓝光吸收能力较强。增加行距可以有效地抑制群体疯长,可使叶面积指数 I_{LA} 降低22.3%,避免冠层内部郁闭。随着剪叶程度的增加,日光温室番茄株幅明显缩小,株幅重叠率 ξ_p 也相应减小,叶面积重叠系数 ξ 和由冠层叶片和大气空间组成的冠层复合光吸收系数 α' 亦相应减小。采用剪半叶密植技术,即在密度增加17%~30%时,对膨果中期的果穗下位叶剪去叶1/3~1/2,保持株幅重叠率 ξ_p 在10%~20%之间,可改善冠层中下层光截获性能和提高群体光合效能。

关键词 日光温室; 番茄; 光能利用率; 剪叶; 光吸收系数

中图分类号 S 641.2 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2011)02-0161-06

20世纪90年代初,Bertin等^[1]建立了TOMSIM番茄生长发育动态模型。TOMSIM属于机理型模型,主要是基于太阳辐射和叶面积指数动态的冠层光截获量模拟研究,可被进一步用作理论研究的有力工具。Pien等^[2]建立的TOMGRO模型,主要通过对番茄生长发育与太阳辐射、温度、CO₂等环境因子间的作用关系进行模拟研究,对番茄的生长发育过程进行科学管理和产量预测具有重要作用。而Gijzen等^[3]基于光合作用建立了通用的温室作物生长模型HORTISIM。

自20世纪90年代中期以来,我国对温室番茄的生长发育模拟模型,先后从基于栽植密度为核心的农艺措施^[4]、单叶和群体的光合能力^[5]、冠层光截获^[6]、干物质积累与分配^[6-8]、养分吸收及产量效应^[6-9]、有效积温^[6]、日射量^[9]以及温室环境因子^[10-11]等角度推动相关研究逐步深入。孙忠富等^[12]在总结HORTISIM模拟模型和TOMGRO等番茄模拟模型的基础上,结合我国设施农业的发展现状与水平,建立了以番茄光合作用为核心、以干物质积累分配和植株形态发育为主要内容的温室番茄生长发育动态模型。田鹏^[13]通过单叶光合的温

光模拟,探讨了我国太原与荷兰气候差异对温室番茄产量的限制因子。

本研究在我国现有生产设施装备水平和技术条件下,以宏观的叶片冠层光截获到微观的光能转化原初动力学和光合酶动力学的光能利用率为切入点,包括冠层横向和冠层纵向、光合器官和光合机构的光能利用率,创建日光温室番茄光能利用效能模型,并对其主要参数进行测试分析和调控分析,以期通过创新相关栽培技术,充分挖掘日光温室番茄的高产潜力,进一步探索设施蔬菜的高产机制。

1 材料与方法

1.1 材料处理

试验在河北省定州市杨家庄乡辛兴村日光温室内进行。

试验I于2007年7月15日播种,2007年8月7日定植于日光温室内。供试品种为‘Harvest’。采用当年秋冬季节6穗果,深冬季节(1月份)换头再生,翌年冬春季节6穗果方式进行长季节栽培,栽植后农艺管理按常规进行。试验I的栽植行距处理分为2种方式:I-1为窄大行,大行距0.85 m,小行

距 0.55 m, 株距 0.41 m, 每 667 m² 2 435 株; I-2 为宽大行, 大行距 1.00 m, 小行距 0.55 m, 株距 0.375 m, 每 667 m² 2 435 株。田间 3 次重复。2007 年 11 月进行植株冠层叶面积指数和单色光质下叶片吸光系数测定。

试验 II 于 2008 年 7 月 20 日播种, 2008 年 8 月 12 日定植于日光温室内。供试品种为‘保罗塔’。农艺管理同试验 I。试验 II 中, 栽植的大行距 0.85 m、小行距 0.55 m。栽植密度通过株距调节。株距分别为 0.409、0.346、0.310 m, 即每行分别栽植 23 株、27 株、30 株, 折合每 667 m² 分别栽植 2 435、2 859、3 176 株。

试验 II 剪叶试验设计为 3 组共 9 个处理, 即 ①每行 23 株, 剪去叶 1/2; ②每行 23 株, 剪去叶 1/3; ③对照 23, 每行 23 株, 不剪叶; ④每行 27 株, 剪去叶 1/2; ⑤每行 27 株, 剪去叶 1/3; ⑥对照 27, 每行 27 株, 不剪叶; ⑦每行 30 株, 剪去叶 1/2; ⑧每行 30 株, 剪去叶 1/3; ⑨对照 30, 每行 30 株, 不剪叶。每个处理为 5 株, 3 次重复。处理株在种植行的中部。剪叶方法是在每穗果实膨大中期, 即最大果实的 1/2 至 2/3 时, 对该果穗下位叶片从中脉处剪去全叶长度的 1/2 或 1/3。剪叶处理从 9 月份的第 1 穗果开始, 至 11 月份第 6 穗果结束。2008 年 11 月进行株幅重叠率、叶面积重叠系数、冠层光吸收系数测试。

1.2 植株冠层叶面积指数的测定

在试验 I 中, 选取距棚前底角 2、5、8 m 处的植株, 在距地面 0.5 m 高处, 采用 HEMIDIG 冠层分析仪分别测定宽大行和窄大行植株的叶面积指数 I_{LA} 。

1.3 单色光质下叶片吸光系数的测定

在 LED 红光 (650 ± 15) nm 和 LED 蓝光 (470 ± 15) nm 下测定球状积分仪内的初始光强 I_0 和置入番茄叶片状态下光强 I , 根据 Lambert-Beer's 定律 $I = I_0 e^{-\epsilon f}$ (ϵ 为吸光系数, f 为叶片厚度), 当 f 取值为 0.375 mm 时, 获得不同光质下的相对吸光系数 ϵ_{red} 、 ϵ_{blue} 。

1.4 株幅重叠率、叶面积重叠系数和冠层光吸收系数的测定

于 11 月下旬, 对试验 II 剪叶的 9 个处理, 田间测量株幅、株高 D , 并计算株幅重叠率 $\xi_p = \text{株幅}/\text{株距} \times 100\%$ 。HEMIDIG 型冠层分析仪测定叶面积指数 I_{LA} , 并用灰度法计算有效叶面积指数 I_{LAa} , 并

计算叶面积重叠系数 $\xi = (I_{LA} - I_{LAa})/I_{LA}$ 。用 LX-101 型照度计测定冠层顶部太阳入射光强 I_0 , I_g 为地面光强, 并计算冠层叶片和大气空间组成的冠层复合光吸收系数 $\alpha' = \ln(I_g/I_0)/D$ 。

2 结果与分析

2.1 日光温室番茄光能利用效能模型

日光温室番茄的光能利用率由从宏观的叶片冠层光截获到微观的光能转化原初动力学和光合酶动力学一系列光能利用率构成, 包括群体或个体的冠层横向光能利用率 U_{cc} 和冠层纵向光能利用率 U_{cv} 、光合器官光能利用率 U_{leaf} 和光合机构光能利用率 $U_{assimilation}$ 。则番茄光能利用效能模型可表达为:

$$U_{total} = U_{cc} \cdot U_{cv} \cdot U_{leaf} \cdot U_{assimilation} \quad (1)$$

1) 冠层横向光能利用率 U_{cc} 主要取决于冠层横向面的光截获能力。冠层横向面的漏光损失会直接降低群体的能利用率:

$$U_{cc} = (S - S_d)/S = S_{LAa}/S = I_{LAa} = I_{LA} - \xi \cdot I_{LA} = (1 - \xi) I_{LA} \quad (2)$$

式中, S 为土地面积, S_d 为地面漏光面积; S_{LAa} 为叶片重叠后的有效叶面积, I_{LAa} 为有效叶面积指数, I_{LA} 为叶面积指数, ξ 为叶面积重叠系数。其中, $\xi = (I_{LA} - I_{LAa})/I_{LA}$ 。则有 $I_{LAa} = I_{LA} - \xi \cdot I_{LA} = (1 - \xi) I_{LA}$; $I_{LAa} = \xi \cdot I_{LA}$, I_{LAa} 为重叠叶面积指数。

另外, 冠层叶面积重叠既有株间的横向和纵向的叶片重叠, 又有株内的纵向叶片重叠。则有:

$$\xi = \xi_b + \xi_i = (I_{LAba} - I_{LAba})/I_{LAba} + (I_{LAia} - I_{LAia})/I_{LAia} \quad (3)$$

式中, ξ_b 为株间叶片重叠系数, ξ_i 为株内叶片重叠系数, ξ_p 为株幅重叠率, I_{LAba} 和 I_{LAia} 分别为株间和株内叶面积指数, I_{LAba} 和 I_{LAia} 分别为株间和株内有效叶面积指数。其中, $\xi_p = \text{株幅}/\text{株距}$; k 为株内叶片重叠系数与株幅重叠率的比值, 即 $k = \xi_b/\xi_p$ 。

在蔬菜生育过程中, 由于 I_{LA} 的时间函数呈“S”型变化曲线, 所以 I_{LA} 的生长模型表达为:

$$I_{LA_t} = I_{LA_{max}} / (1 + a e^{-kt}) \quad (4)$$

其中, $a = (I_{LA_{max}} - I_{LA_0})/I_{LA_0}$ 为常数, I_{LA_0} 为初值, $I_{LA_{max}}$ 为最大值, I_{LA_t} 为 t 时刻的值, t 为时间, e 为自然对数的底, k 为速率常数。

2) 冠层纵向光能利用率 U_{cv} 取决于冠层纵向面的光截获能力。冠层纵向面的光衰减损失会直接降低个体的光能利用率。 U_{cv} 可以表达为:

$$U_{cv} = (I_0 - I_g)/I_0 = (I_0 - I_d - I_i)/I_0 \quad (5)$$

式中, I_o 为冠层顶部太阳入射光强, I_g 为地面光强, I_d 为地面漏光光强, I_f 为叶片透射光强。根据比尔定律, 则有:

$$U_{cv} = (I_o - I_o \times e^{-\alpha' D}) / I_o = 1 - e^{-\alpha' D} \quad (6a)$$

$$U_{cv} = (I_o - I_o \times e^{-\alpha D} - I_o \times e^{-\epsilon F}) / I_o = 1 - e^{-\alpha D} - e^{-\epsilon F} \quad (6b)$$

式中, α' 为冠层叶片和大气空间组成的冠层复合光吸收系数, α 为大气光吸收系数, D 为冠层深度或植株高度, ϵ 为叶片光吸收系数, F 为各节位叶片重叠平均厚度。这里, F 表达为 $F = nf / (\xi I_{LA} / I_{LAa}) = nf / (\xi I_{LA} / ((1 - \xi) I_{LA})) = nf(1 - \xi) / \xi$ 。其中, f 为各节叶平均厚度, n 为单株叶片数。将 F 表达式代入式(6b)可得:

$$U_{cv} = 1 - e^{-\alpha D} - e^{-\epsilon n f (1 - \xi) / \xi} \quad (7)$$

3) 光合器官的光能利用率 U_{leaf} 是指叶片吸收光强与太阳入射光强之比。照射在叶片表面的光能, 一部分会被吸收、另一部分会被反射与透射, 则有:

$$U_{leaf} = I_a / I_o = (I_i - I_r - I_p) / I_o \quad (8)$$

其中, I_o 为冠层顶部太阳入射光强, I_i 为叶片表面垂直入射光强, I_r 为叶片表面反射光强, I_p 为叶片透射光强, I_a 为叶片吸收光强。叶片表面垂直入射光强取决于叶片的受光姿态。当 α 为叶片纬向角, β 为叶片经向角, h' 为太阳高度角, σ 为太阳方位角, λ 为叶片表面光反射系数时, 式(8)可改写为式(9):

$$U_{leaf} = (I_o \sin(\alpha + h') \sin(\beta + \sigma) - \lambda I_i - I_i \times e^{-\epsilon f}) / I_o = \sin(\alpha + h') \sin(\beta + \sigma) (1 - \lambda - e^{-\epsilon f}) / I_o \quad (9)$$

4) 光合机构的光能利用率 $U_{assimilation}$ 是指光合 CO_2 同化需要的能量与叶片吸收光强之比。光合机构的光能利用率可以表达为式(10):

$$U_{assimilation} = U_{LCE} = P_n / I_a = J_A / I_a \quad (10)$$

式中, U_{LCE} 为光转化效率, 根据光合速率 P_n 对叶片吸收光强 I_a 的响应曲线计算, J_A 为支持 CO_2 同化的电子流。

光合机构的光能利用率取决于 PS II 原初光化学动力学特性、 CO_2 同化能力及特性等。被 PS II 天线色素复合体捕获吸收的光能, 一部分能量会被转化为光化学能 (k_p), 通过 PS II 蛋白复合体电子传递链形成 ATP 和 NADPH 用于 CO_2 同化驱动力, 另一部分会以调节性热能形式耗散 (k_d) 和非调节性热能形式耗散 (k_N), 再一部分以荧光形式释放 (k_f)。因此, PS II 实际光化学效率 ($\Phi_{PS II}$, 单位光量子流通过 PS II 的电子流) 被表达为 $\Phi_{PS II} = (F_{m'} - F_s) / F_{m'} = 1 - F_s / F_{m'}$ 。其中, $F_{m'}$ 为光适应下饱和光脉

冲产生的最大荧光强度, F_s 为稳态荧光强度。通过叶绿素 a 的荧光动力学参数测试反映出活体 PS II 蛋白复合体对光能的捕获、吸收、传递能力。则流经 PS II 整个传递链的电子流量 J_f 可以被给出:

$$J_f = a_{II} e_{II} I_a \Phi_{PS II} = a_{II} e_{II} I_a (1 - F_s / F_{m'}) \quad (11)$$

其中, a_{II} 为激发光能向 PS II 的分配比例, e_{II} 为 PS II 天线色素复合体的激发光能捕获效率。PS II 光吸收效率 $a_{II} e_{II}$ 可以取值为 0.45~0.50^[14]。

由于, 整个传递链的电子流 J_f 包括三部分: 支持 CO_2 同化的电子流 J_A 、Mehler 反应循环电子流 J_{MAP} 、氮素和硫素等还原同化的电子流 J_{nit} , 即:

$$J_f = J_A + J_{nit} + J_{MAP} \quad (12)$$

则有

$$J_A / I_a = J_f / I_a - J_{nit} / I_a - J_{MAP} / I_a = a_{II} e_{II} (1 - F_s / F_{m'}) / I_a - J_{nit} / I_a - J_{MAP} / I_a \quad (13)$$

因此, 在光合原初动力学中光合机构的光能利用率可以表达为式(14):

$$U_{assimilation} = a_{II} e_{II} (1 - F_s / F_{m'}) / I_a - J_{nit} / I_a - J_{MAP} / I_a \quad (14)$$

在 Carvon 循环中, CO_2 同化能力与 RuBP 再生速率、rubisco 数量与活性以及无机磷供应能力有关。在 RuBP 再生限制下用于 PRC 和 PRO 循环需求的电子传递速率可以通过 CO_2 同化速率来计算^[15]。即:

$$J_A = (A + R_d) (4C_i + 8\Gamma^*) / (C_i - \Gamma^*) \quad (15)$$

其中, A 为实测的 CO_2 同化速率, R_d 为暗呼吸速率, C_i 为胞间 CO_2 浓度, Γ^* 为叶绿体 CO_2 补偿点。因此, 在光合 CO_2 同化动力学中光合机构的光能利用率可以表达为:

$$U_{assimilation} = (A + R_d) (4C_i + 8\Gamma^*) / (C_i - \Gamma^*) / I_a \quad (16)$$

2.2 栽植行宽对日光温室番茄植株冠层叶面积指数的影响

试验 I 中栽植行宽对日光温室番茄植株冠层叶面积指数 I_{LA} 的影响显著(图 1)。在 0.5 m 高处, 宽大行中间(5 m 处)的叶面积指数稍高于两侧, 表明此处的番茄植株长势较强; 在 0.5 m 高处, 窄大行靠近温室后墙(8 m 处)的叶面积指数最大, 与此处弱光造成了番茄植株的徒长致使叶面积指数增大有关。

2.3 日光温室番茄品种叶片吸光系数的叶位间比较

当光线照射到番茄叶片表面时, 一部分光被叶片吸收, 一部分光被折射、反射或者透射。叶片对光能的吸收能力与吸光系数密切相关。

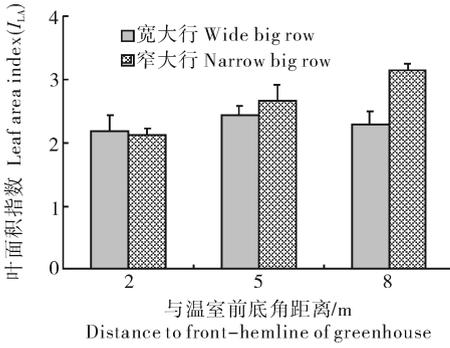


图 1 栽植行距对日光温室番茄植株冠层叶面积指数的影响

Fig. 1 Effect of planting spacing on tomato canopy leaf area index in solar greenhouse

试验 I 中,通过球状积分仪测得红光和蓝光下,日光温室番茄的叶片吸光系数 ϵ 在品种间具有明显差异(图 2)。红光下,‘保罗塔’叶片 ϵ_{red} 较高,‘Harvest’和‘莱福 60’叶片 ϵ_{red} 较低,‘红利’和‘以色列 1498’叶片 ϵ_{red} 居中;蓝光下,‘红利’和‘以色列 1498’叶片 ϵ_{blue} 值较大,‘Harvest’叶片 ϵ_{blue} 较小,‘保罗塔’和‘莱福 60’叶片 ϵ_{blue} 居中。另外,‘保罗塔’的 $\epsilon_{red}/\epsilon_{blue} > 1$,表明对红光吸收能力较强;其它 4 个品种的 $\epsilon_{red}/\epsilon_{blue} < 1$,表明对蓝光吸收能力较强(图 2)。

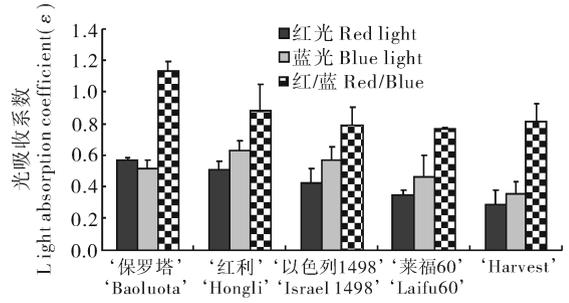


图 2 红光和蓝光下日光温室番茄叶片平均吸光系数 (ϵ_{red} , ϵ_{blue}) 和吸光系数比 ($\epsilon_{red}/\epsilon_{blue}$) 的品种间比较

Fig. 2 Average light absorption coefficient (ϵ_{red} , ϵ_{blue}) and light absorption coefficient ratio ($\epsilon_{red}/\epsilon_{blue}$) in tomato leaves with red and blue light treatments

2.4 剪叶对日光温室番茄冠层光截获参数的影响

剪叶对日光温室番茄冠层光截获参数的影响显著(表 1)。从表 1 可见,在 3 个株距下,随着剪叶程度的增加,株幅明显缩小,株幅重叠率 ξ_p 亦相应减小甚至 $\xi_p < 0$ (即出现株间间隔);相应地,随着剪叶程度的增加,叶面积重叠系数 ξ 和为冠层叶片和大气空间组成的冠层复合光吸收系数 α' 也相应减小。同时,随着每行株数的增加,需要增加剪叶程度,才能将冠层光截获参数维持在一定水平,来保证既能充分利用光能,又不浪费光能。

表 1 剪叶对日光温室番茄冠层光截获参数的影响

Table 1 Effect of leaf-cutting on tomato leaf canopy interception parameters of light energy in solar greenhouse

每行株数 Number of tomatoes per line	剪叶处理 Leaf-cutting treatment	株距/cm Distance between plants	株幅/cm Column width	株幅重叠率/% Overlap rate of plant width (ξ_p)	I_{LA}	I_{LAa}	叶面积重叠系数 Overlap coefficient of leaf area (ξ)	相对光强/% Relative light intensity	冠层复合光吸收系数 Light absorption coefficient of canopy (α')
23	剪去叶 1/2 1/2 leaves cutted	40.9	28.6 f	-30.1 g	2.05 f	1.60 d	0.22 f	49.72 a	0.388 f
	剪去叶 1/3 1/3 leaves cutted	40.9	36.2 e	-11.5 f	2.39 e	1.81 d	0.24 f	45.03 a	0.443e f
	对照 23 None cutted	40.9	49.0 c	19.8 d	3.29 d	2.18 b	0.34 c	29.54 cd	0.678 c
27	剪去叶 1/2 1/2 leaves cutted	34.6	30.9 f	-10.9 f	2.67 e	1.96 c	0.27 e	42.67 b	0.473 e
	剪去叶 1/3 1/3 leaves cutted	34.6	39.6 d	14.4 d	3.17 d	2.23 b	0.30 d	33.49 c	0.608 d
	对照 27 None cutted	34.6	53.7 b	55.1 b	4.61 b	2.37 b	0.49 b	20.13 f	0.890 a
30	剪去叶 1/2 1/2 leaves cutted	31.0	32.1 f	3.3 e	3.26 d	2.23 b	0.32 d	39.54 b	0.515 e
	剪去叶 1/3 1/3 leaves cutted	31.0	41.0 d	32.0 c	3.99 c	2.55 a	0.36 c	23.77 e	0.798 b
	对照 30 None cutted	31.0	55.9 a	80.1 a	5.72 a	2.63 a	0.54 a	17.74 f	0.961 a

3 讨论

从式(2)和式(4)可见,光截获能力与叶面积重

叠系数 ξ 、最大叶面积指数 I_{LAmax} 和光合功能叶时期长短 t 有关,即与最适叶面积指数 I_{LAopt} 有关。番茄叶片全裂呈小叶状,致使上部冠层的漏光比例较大,

可使 $I_{LA,opt}$ 提高。然而,一则日光温室内的光照强度较低;二则小行距过小会诱发病害严重,并影响喷药防治效果;三则大行距过小会引起植株徒长冠层郁闭(图1),并会影响田间操作空间,造成叶片机械损伤和病菌虫卵的人为传播,致使日光温室长季节番茄的 $I_{LA,opt}$ 不宜过高。本研究通过增加大行距宽度明显改善了群体的光照分布状况,也降低了近温室后墙处的 I_{LA} ,有效地控制了近温室后墙处番茄植株的徒长问题,同时明显改善了田间操作效果。因此,应该根据株展幅度确定小行距和株距,以叶片重叠不超过叶长 $1/4$ 为宜;大行距以植株满架(180 cm)在上午 10:00 太阳斜射阴影在下一行 50 cm 高度以下为宜,且保证行走空间宽度 25~35 cm 为宜。

从式(8)可见,个体的光能利用率取决于植株高度 D 、叶片光吸收系数 ϵ 、叶片厚度 f 以及叶重叠程度 ξ 。采用植株调整技术降低叶面积重叠系数 ξ ,会对提高冠层横向和纵向光能利用率会有明显效果。

试验 I 测试结果表明,光吸收系数与基因型、光质、叶龄有关,一般在 0.2~0.9 之间。老龄叶对蓝光的光吸收能力会升高。与上位叶相比,中下位叶片能够获取的光照既有冠层漏光,也有冠层透射光,还会有散射光。另外,式(10)表明,叶片的受光姿态与单叶光能利用率 U_{leaf} 的关系密切。因此,吊蔓上架、摘除老叶和病叶等农艺措施是叶片光能利用率调控的关键技术。

对 CO_2 同化能力 A 的温光响应特性测试,有助于通过改善栽培环境来充分挖掘现有基因型的光合潜力。基因型的光能利用率取决于光合系统的光合效率表达,特别是逆境下的光合效率表达。选育与推广抗逆能力强的新品种是现代设施农业永久性的关键技术。

将光合对光强的响应曲线,转化成光合光转化效率 U_{LCE} 对 PAR 响应曲线会发现,在光合适温 ($t_1=28\text{ }^\circ\text{C}$) 下 $U_{LCE,max}$ 居中;光合亚适低温 ($t_1=22\text{ }^\circ\text{C}$) 下 $U_{LCE,max}$ 较高;光合亚适高温 ($t_1=34\text{ }^\circ\text{C}$) 下 $U_{LCE,max}$ 较低(文中数据未列出)。

本研究中,针对日光温室番茄冠层的中下层存在无效的光截获面积,以及因果实膨大后期的生长减缓带来的邻近功能叶光合效能不能充分调动两大

问题,并结合番茄的全裂叶型特点,尝试进行了剪半叶密植技术对日光温室番茄群体光能利用性能的调控研究,取得了改善冠层中下层光能截获性能和提高群体光合效能的双重效果。

另外,剪半叶与摘除老叶、病叶不同。摘除的老叶和病叶可以调控叶面积重叠系数 ξ ,包括株内叶片重叠系数 ξ_i 和株间叶片重叠系数 ξ_b ;剪半叶仅调控 ξ_p 为株幅重叠率,即株间叶片重叠系数 ξ_b 。

参 考 文 献

- [1] BERTIN N, GARY C. Tomato fruit-set: a case study for validation of the model TOMGRO[J]. Acta Horticulturae, 1993, 328: 185-193.
- [2] PIEN H, LEMEURE R. The use TOMGRO as a simplified diagnostic tool for growers[J]. Acta Horticulturae, 1999, 507: 285-292.
- [3] GIJZEN H, HEUVELINK E P, CHALLA H, et al. HORTISIM: a model for greenhouse crops and greenhouse climate[J]. Acta Horticulturae, 1998, 456: 441-450.
- [4] 冯爱兰, 陈广宗, 张守新. 番茄高产栽培农艺措施组合模型的研究[J]. 河南职业技术学院学报, 1994, 22(2): 24-28.
- [5] 吴元中, 李育民. 自控温室番茄生产的光合数值模拟[J]. 生态农业研究, 2000, 8(4): 17-19.
- [6] 侯加林, 王一鸣, 丛晓燕, 等. 番茄叶序发育动态模拟模型[J]. 农业机械学报, 2006, 37(7): 101-103.
- [7] 侯加林, 王一鸣, 徐云, 等. 番茄生长发育非线性模拟模型[J]. 农业机械学报, 2006, 37(3): 80-83.
- [8] 李灵芝, 弓志青, 李亚灵, 等. 温室番茄长季节栽培生长发育特性的研究[J]. 华中农业大学学报, 2003, 22(4): 395-398.
- [9] 褚金翔, 孙忠富, 杜克明, 等. 基于 TOMSIM 模型的温室番茄中杂 9 号生产潜力的空间分析[J]. 中国农业气象, 2009, 30(1): 49-53.
- [10] 徐刚, 张昌伟, 李德翠, 等. 温室长季节栽培番茄发育动态模拟模型的研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(增刊): 243-246.
- [11] 杨丽丽, 王一鸣, 董乔雪, 等. 基于结构功能模型实现番茄植株产量优化[J]. 中国农业大学学报, 2008, 13(1): 71-76.
- [12] 孙忠富, 陈人杰. 温室番茄生长发育动态模型与计算机模拟系统初探[J]. 中国农业生态学报, 2004, 11(2): 84-88.
- [13] 田鹏. 太原地区温室番茄限产因素探讨——光照、温度对产量的影响[D]. 太谷: 山西农业大学园艺学院, 2004.
- [14] LAISK A, LORETO F. Determining photosynthetic parameters from leaf CO_2 exchange and chlorophyll fluorescence[J]. Plant Physiol, 1996, 110: 903-912.
- [15] VON-CAEMMERER S. Biochemical models of leaf photosynthesis[J]. Collingwood, Australia: Csiro Publishing, 2000: 29-90.

Effects of planting spacing and leaf-cutting on canopy interception of light energy in greenhouse tomato

GAO Zhi-kui WANG Mei Ren Shi-fu GAO Hong-bo

College of Horticulture, Agricultural University of Hebei, Baoding 071000, China

Abstract Under the current production facilities equipment and technical available level in China, light energy utilization efficiency and its main parameters influenced by light energy utilization efficiency of canopy cross section, canopy vertical section, photosynthetic organs and photosynthetic apparatus, were analyzed in greenhouse tomato, in order to exploit the solar energy utilization efficiency from the macro leaf canopy interception of light energy to micro original dynamics of light energy conversion and kinetics of photosynthetic synthase. The leaf light absorption coefficient (ϵ) of tomatoes in greenhouse was significantly different between genotypes and leaf position with red and blue light irradiation by using globale integral instrument. The leaf red and blue light absorption coefficient ratio ($\epsilon_{\text{red}}/\epsilon_{\text{blue}}$) of 'Baoluota' variety was more than 1, which indicated that leaf had strong absorption capacity to red light. However, the ratio of $\epsilon_{\text{red}}/\epsilon_{\text{blue}}$ of 'Harvest', 'Laifu 60', 'Hongli' and 'Israel 1498' varieties was less than 1, which indicated that leaf of these varieties had strong absorption capacity to blue light. Increasing row space could inhibited effectively group unrestrained growth and decreased the leaf area index (I_{LA}) by 22.3%, which could avoid closure of inside canopy. As the degree of leaf-cutting increasing, the tomato plant width in greenhouse significantly decreased, meanwhile the overlap rate of plant width (ξ_p), the overlap coefficient of leaf area (ξ) and complex light absorption coefficient (α') of canopy consisting with canopy leaves and canopy air space were all decreased accordingly. Using the techniques of cutting-half-leaf with the close-planting, namely, ear inferior leaves were cut 1/3-1/2 as fruit expanding stage to maintaining overlap rate of plant width (ξ_p) between 10% and 20% when the planting density increased by 17%-30%, achieved the double effects of both improving the light energy interception of middle and lower canopy and enhancing the groups photosynthetic capacity.

Key words greenhouse; tomato; light energy utilization efficiency; leaf-cutting; light absorption coefficient

(责任编辑:张志钰)