

# 日光温室黄瓜群体结构参数及群体内辐射分布分析

张亚红, 陈端生, 黄晚华

(中国农业大学)

**摘要:** 为研究作物群体结构与环境要素的关系, 观测了日光室内黄瓜不同生育时期的群体结构参数和群体内太阳总辐射的水平分布和垂直分布。发现叶面积指数、叶面积密度、叶倾角、叶方位角等结构要素在不同生育时期有明显的变化: 随生育的进展, 叶面积指数稳定增加, 叶面积密度生育前期明显上升, 后期有所下降, 最大叶面积密度所在高度随黄瓜生长逐渐上移; 叶倾角分布主要以水平叶为主; 叶方位角以偏南居多, 偏北叶所占比例较少; 不同黄瓜品种间叶方位角和叶倾角也存在差异。这些变化与差异对黄瓜群体的辐射分布有重要影响, 也直接影响群体叶的光合速率, 此结果可为建立黄瓜群体辐射分布模型进一步优化日光温室结构, 建立日光室内作物生长模型、环境调节控制策略等提供理论依据。另外, 对植株的调控技术(如整枝打杈技术等)也有一定的参考意义。

**关键词:** 日光温室; 黄瓜; 群体结构参数; 总辐射

**中图分类号:** S625.5<sup>+</sup>; S314

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-6819(2003)01-0172-05

## 1 前言

随着节能型日光温室的飞速发展, 环境参数的调控也逐渐趋向智能化。以往日光温室的理论研究, 多考虑利用光、热等小气候资源, 提出了不少与温室建筑有关的光、热、湿等环境模型<sup>[1]</sup>。这些模型主要用于温室的优化结构设计, 因而主要考虑建筑结构与环境之间的关系, 不考虑作物与环境间的作用机理, 所以不能将这些模型直接应用于针对温室内作物的环境控制。

植物群体结构及其与冠层小气候的关系一直是植物生态学与农业气象学的一个重要课题<sup>[2]</sup>, 为建立考虑作物在内的环境模型, 必需明确作物的结构特征与环境要素的关系。在环境因素中, 以植物群体结构对辐射场的影响最为明显。国内外学者在描述农田光分布时, 特别关注作物群体结构(叶面积指数、叶面积密度、叶倾角、叶方位角等)特征的影响, 并已对小麦、玉米主要农作物群体结构做了不少研究<sup>[3~6]</sup>。Spitters 考虑叶面积指数、叶角分布等提出了番茄植株日光合速率的模型<sup>[7,8]</sup>。20 世纪 90 年代中期以来国外学者开始研究温室内作物群体结构以建立温室作物生长、温室作物环境及其控制模型。X. Yang 等<sup>[9,10]</sup>在研究双屋面温室内黄瓜结构特征的基础上, 建立了温室单行黄瓜内太阳辐射传输模型, D. Thevenard 等<sup>[11]</sup>对上述模型进行简化, 建立太阳辐射在温室双行黄瓜内传输模型。国内对设施中作物群体结构的相关研究还未见报道。由于日光温室结构的特殊性, 作物群体结构不同于双屋面温室, 本文以日光室内黄瓜群体结构为研究对象, 探讨黄瓜群体结构及其与辐射分布的关系。

## 2 实验与方法

### 2.1 实验设计

#### 2.1.1 黄瓜群体结构观测

选取中国农业大学科学园栽种黄瓜的日光温室 2 座。温室 A (7.5 m × 40 m) 黄瓜品种为津新密刺, 从中随机选取 12 株进行定株观测。2002 年 3 月 23 日定植, 抽蔓后期(4 月 23 日)至开花结果后期(5 月 28 日)每隔 3~6 d 观测一次。温室 B (8 m × 30 m) 的 6 个黄瓜品种为: 卡斯特、京研迷你 1 号、京研迷你 3 号、秋多星、康德及戴多星。每品种分别选 2~4 株在其生长盛期每周观测一次, 以比较品种间的群体结构。两温室黄瓜均为双行种植。

黄瓜植株的观测项目: 株高 ( $H$ )、叶片数 ( $n$ )、叶长 ( $L_L$ )、叶宽 ( $W_L$ )、叶倾角 ( $\theta$ )、叶方位角 ( $\varphi$ ) 等。

#### 2.1.2 群体内总辐射、净光合速率测定

采用 CD 公司提供的杆状辐射计和国产 (DFYZ) 天空辐射表观测总辐射, 分别在 2001 年 4 月 11 日和 2002 年 5 月 24 日在温室 A 中进行, 以真太阳时 8:00~17:00 每小时观测一次。观测点水平分布见图 1a 及图 1b, 各点高度设为 1.0 m; 垂直方向在温室中部 b3 (图 1a) 及 b2 (图 1b) 处 (双行行间), 图 1a 设置高度为 0.2、0.6、1.0、1.4 m 及冠层高度 (1.6 m); 图 1b 高度为

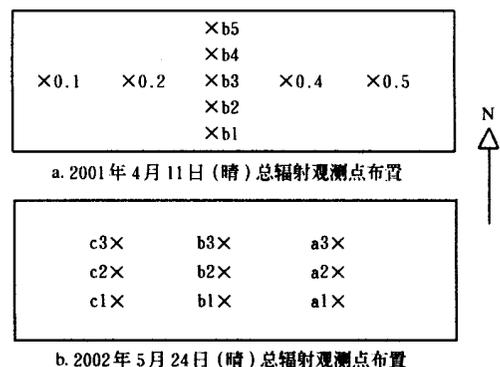


图 1 总辐射观测点分布(温室 A)

Fig 1 Layout of global solar radiation test points (in greenhouse A)

收稿日期: 2002-06-26 修订日期: 2002-11-08

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目 (39830283)

作者简介: 张亚红, 副教授, 在读博士生, 宁夏大学农学院气象教研组, 750105; 通讯作者: 陈端生, 教授, 博士生导师, 北京海淀区圆明园西路 2 号 中国农业大学园艺学院, 100094

0.2, 0.6, 1.0m 及冠层高度(1.4m)。温室黄瓜处于盛果期。

净光合速率采用美国产 CL-301PS 光合速率仪, 在观测点 b3(图 1a) 及 b2(图 1b) 处, 分别在两行各高度层次中选代表性叶片 4 片进行观测, 为减少测试误差, 对各高度进行往返巡检, 取平均值。观测时间为 9:00~ 11:00 和 14:00~ 15:00, 同时对黄瓜群体做同步观测。

### 2.2 原理与方法

#### 2.2.1 叶面积指数 (LAI) 的求算

1) 计算单叶叶面积 ( $S_L$ ): 采用黄瓜叶面积活体测量法, 由叶长 ( $L_L$ )、叶宽 ( $W_L$ ) 建立相关关系, 以经验公式  $S_L = 0.5W_L \times L_L + 0.25 \times W_L^2$  求算单叶叶面积 ( $R^2 = 0.9846$ ), 每次测量时, 选代表性植株 12 株, 由基部至冠层取叶, 以计算不同时期平均单株叶面积 ( $S_A$ )。

2) 求温室植株密度 ( $N$ ):  $N = (\text{每行株数} \times \text{行}) / [\text{温室长} \times (\text{温室宽} - \text{道路宽})]$ 。

3) 群体叶面积指数  $LAI = S_A \times N$ , 叶面积指数反映了植株叶面积与栽培床面积之比。

#### 2.2.2 叶面积密度 ( $f(z)$ ) 的计算

求算不同时期平均株高 ( $H$ ), 平均叶面积密度  $f(z) = LAI/H$ , 它反映群体叶面积的垂直分布情况; 某高度  $z$  的累积叶面积指数  $LAI(z) = \int_z^H f(z) dz$ 。

#### 2.2.3 叶倾角 ( $\theta$ )、叶方位角 ( $\varphi$ )

叶倾角  $\theta$  是指叶片法线方向与垂直轴的夹角; 叶方位角  $\varphi$  是叶片法线方向在水平面的投影与正北方向的夹角。叶倾角与叶方位角通称叶角, 它是作物群体结构中重要的参数, 作物群体光分布和传递都以叶角为基础。计算叶角的分布频率就可以了解叶的空间分布<sup>[12]</sup>, 将叶方位角  $\varphi$  在  $0 \sim 2\pi$  范围, 叶倾角  $\theta$  在  $0 \sim \pi/2$  范围划分不同区域。将  $\varphi$  划分为 8 个方位: 即由正北开始, 沿顺时针方向,  $0 \sim 45^\circ$  记为方位 I,  $45 \sim 90^\circ$  记为 II, ...,  $315 \sim 360^\circ$  记为 VIII(图 2)。 $\theta$  划分为 3 挡: 即  $0 \sim 30^\circ$  (水平叶)、 $30 \sim 60^\circ$  (倾斜叶)、 $60 \sim 90^\circ$  (垂直叶)。

方位角分布频率:  $d_{\varphi} = S_{\varphi}/S \times 100\%$  ( $k = 1, 2, \dots, 8$ )

叶倾角分布频率:  $d_{\theta} = S_{\theta}/S \times 100\%$  ( $j = 1, 2, 3$ )

式中  $S_{\varphi}$ ——分布于方位  $k$  (I, II, ..., VIII) 区间的叶面积;  $S_{\theta}$ ——分布于第  $j$  挡叶倾角的叶面积;  $S$ ——植株总叶面积。

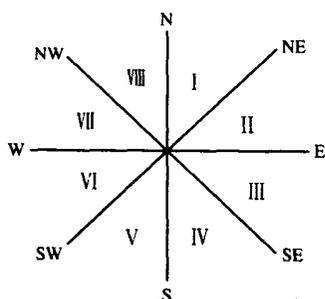


图 2 叶方位角的划分

Fig 2 Distribution of leaf azimuth angles

### 2.2.4 辐射与净光合速率的计算

对一天内不同时间、不同层次的总辐射、净光合速率进行统计分析。

## 3 结果与讨论

### 3.1 叶面积指数与叶面积密度的变化

表 1 列出不同时期平均叶面积密度  $f(z)$  与群体叶面积指数 LAI 的变化。

表 1 群体叶面积指数 (LAI) 与叶面积密度 ( $f(z)$ ) 的变化(温室 A)

日期	04-23	04-29	05-03	05-07	05-10	05-13	05-16	05-22	05-28
LAI	0.52	0.77	1.09	1.47	1.72	1.94	1.41	1.85	1.88
$f(z)$	1.15	1.24	1.34	1.43	1.46	1.42	0.87	0.97	0.85

由表 1 可见, (1) 黄瓜从抽蔓期(4 月 23 日)到开花结果期(5 月 22 日), 叶面积指数除 5 月 16 日降低外, 一直呈增加趋势。开花结果期前段是黄瓜生长旺盛期, 每天可增加 1.5 片叶, 开花结果后期因摘叶(打掉下位老叶)使叶面积指数下降。(2) 生育前期叶面积密度是逐渐增加的, 后期因叶面积增加速率小于株高增长的速率而下降。根据辐射传递原理, 生育后期随着株高的增长, 叶面积密度下降, 黄瓜群体叶片间受遮挡减少, 群体内辐射相应增加。

图 3 是不同时期黄瓜群体不同高度的叶面积密度  $f(z)$  的变化动态。

由图 3 可见, 叶面积密度  $f(z)$  的最大值是随着黄瓜生长上移的, 后期因温室高度限制, 瓜蔓水平伸长, 增加了上部冠层的叶面积密度, 使群体下层的透光性减弱。因此, 及时打(下位)叶且落蔓, 改善垂直方向的群体结构, 对增加群体的下部辐射有重要意义。

### 3.2 各生育时期的叶角分布与品种差异

1) 叶方位角总体表现: 将不同生育时期叶方位角 ( $\varphi$ ) 及不同品种平均叶方位角分布频率列于表 2, 由表可见, 温室 A 内黄瓜叶方位角以偏南方位(方位 IV、V) 占明显优势, 温室 B 也得到同样的结果, 并且偏南方位的叶随生育期增长而增加, 偏北方位(VIII, I) 则明显减少。由此可以得出, 越到生育后期, 温室内黄瓜叶的向光性表现越明显。另外, 在结果后期, 黄瓜蔓延延伸到温室横杆高度, 开始向水平方向伸长, 由于自然向光性, 整个蔓偏南生长。因此, 偏南方位叶在生育后期所占比例增大。从作物生长角度来看, 叶偏南生长适应了日光温室内光环境, 但必然削弱其它方位叶的生长, 对产量是否有影响尚待进一步研究。

表 2 叶方位角的分布频率

方位	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
04-23	11.9	13.1	16.1	13.3	16.9	8.4	8.2	12.1
温室 A	05-03	13.2	10.1	9.1	19.2	19.6	6.0	8.4
	05-28	2.1	14.4	17.8	22.0	22.5	9.2	9.0
平均	10.4	9.8	13.6	15.2	14.0	11.6	11.1	14.3
温室 B	平均	8.3	11.8	14.0	16.6	14.8	14.2	11.1

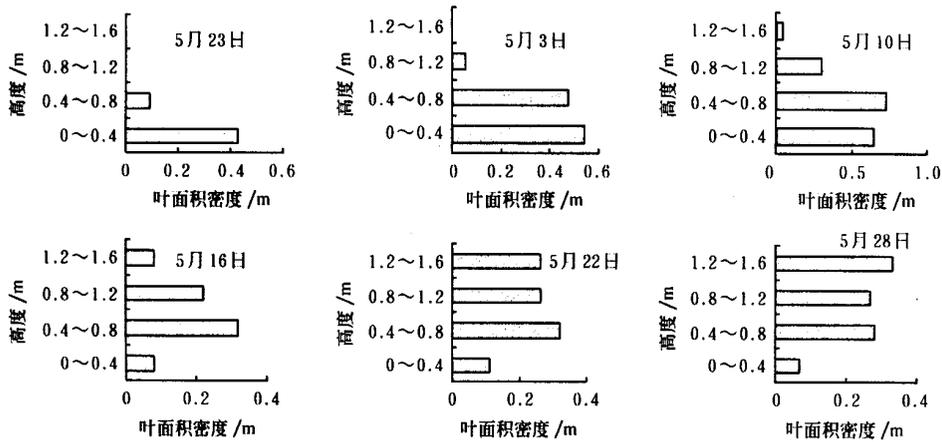


图3 叶面积密度的变化  
Fig 3 Changes of leaf area density

2) 品种间差异: 对温室B中的6个品种进行分析, 发现其方位角还是有明显差异(图4)。以其中3个品种为例: 品种1(卡斯特), 西向叶是弱势, 而南向与北向差异不明显; 品种2(京研迷你1号)、品种3(京研迷你3号)都是偏北方位是弱势, 而南向、东向、西向方位差异并不明显。偏南叶占优势能有效利用局部光照; 而偏西叶占优势, 可利用温室内温度在下午仍较高, 又有西向的光照, 对提高叶的光合性能有利, 尤其在冬季室外温度较低时, 对克服由于低温寡照引起光合生产能力下降有一定意义。

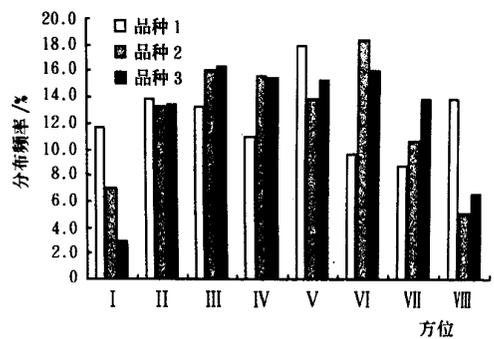


图4 品种间叶方位角的差异

Fig 4 Difference of leaf azimuth angles in different varieties

3) 叶倾角的分布及其变化: 黄瓜叶在生育期叶倾角的分布频率见表3。由表3可见: 水平叶 [ $\theta$  ( $0^\circ \sim 30^\circ$ )] 占明显优势, 全生育期平均为 58.0%; 其次是倾斜叶 [ $\theta$  ( $30^\circ \sim 60^\circ$ )], 占 35.8%; 垂直叶 [ $\theta$  ( $60^\circ \sim 90^\circ$ )] 占的比例很小, 仅占 6.2%。从开花结果初期到结果后期, 水平叶所占比例逐渐下降, 倾斜叶则逐渐上升, 垂直叶所占比重也有所上升。叶倾角的这种变化

主要是由于群体下位叶由水平转向下垂, 冠层上部叶片大多维持不变, 根据光传递原理, 群体中下位叶的截光能力由于叶倾角上述变化而减弱。在结果后期最大的叶面积密度已上升到冠层上部, 这样, 冠层截光处于最重要地位。

表3 叶倾角的分布频率(温室A)

Table 3 Frequencies of leaf zenith angles(in Greenhouse A)

%

叶倾角 ( $\theta$ )	日期/月-日									平均
	04-23	04-29	05-03	05-07	05-10	05-13	05-16	05-22	05-28	
$0^\circ \sim 30^\circ$	79.8	68.3	68.0	66.0	57.8	60.0	53.4	47.1	30.2	58.0
$30^\circ \sim 60^\circ$	16.8	29.9	28.0	27.6	32.7	33.4	44.3	46.6	60.1	35.8
$60^\circ \sim 90^\circ$	3.4	1.8	3.4	6.4	9.5	6.6	2.3	6.3	9.7	6.2

4) 品种间叶倾角差异: 结果盛期和后期对温室B的6个品种叶倾角观测结果做统计分析, 发现不同品种叶倾角分布也有明显差异。图5表示黄瓜结果中后期, 3个品种叶倾角分布。品种1(卡斯特)水平叶倾斜叶较少, 而垂直叶和倾斜叶所占比重较大; 品种2(京研迷你1号)垂直叶所占比重最大; 品种3(京研迷你3号)叶倾角主要分布在  $0^\circ \sim 60^\circ$ ; 水平叶与倾斜叶差异不明显。因此, 改善品种, 培育结构优良、抗衰老的品种, 对增强黄瓜的截光性能, 充分利用光能, 增加光合产量以及提高品质, 都有积极意义。

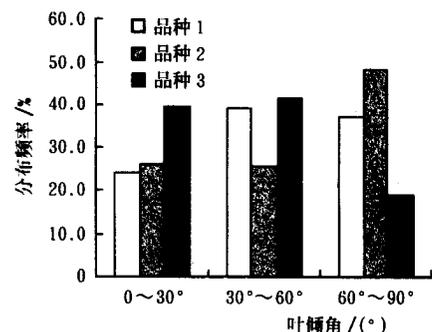


图5 叶倾角的品种差异

Fig 5 Difference of leaf zenith angles in different varieties

### 3.3 群体内的辐射分布

#### 3.3.1 总辐射的日变化

图 6 是日光温室内黄瓜结果盛期(2002 年 5 月 24 日, 晴), 室外及室内 1.0 m 高处 9 个测点的平均总辐射和不同高度总辐射的日变化, 由图可见, 群体内 1.0 m 总辐射日变化与冠层上方及室外日变化近似一致。因为只要冠层上方叶的截光能力不变, 透过冠层进入冠层内的辐射应与冠层上方或室外的辐射维持相对稳定的比值。

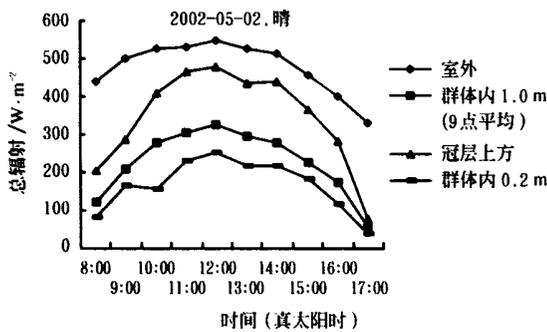


图 6 总辐射的日变化

Fig. 6 Daily changes of global solar radiation

#### 3.3.2 总辐射的空间分布

1) 水平分布(见表 4): 东西方向, 总辐射差异不明显, 但以中部略高; 南北方向, 以南部最高, 北部最低, 这主要由于日光温室本身的结构特点所致, 但也引起温室内黄瓜冠层叶结构特征的差异: 温室靠南部的植株叶面积密度要高于中、北部植株叶面积密度, 温室中部黄瓜也要比东、西部黄瓜长势略好。

表 4 总辐射的水平分布(2001-04-11, 晴)

Table 4 Horizontal distributions of global solar radiation (2001-04-11, clear)

测点位置	南			中		北			东			西	
	b1	b2	b3	b4	b5	a5	a4	b3	a2	a1			
总辐射/W·m <sup>-2</sup>	198	189	164	151	131	152	158	168	164	159			

2) 垂直分布(见图 7): 从辐射垂直分布图可以看出, 从 1.6 m 向下到 1.2 m, 总辐射值是迅速递减的, 再向下递减的速度缓慢, 这跟黄瓜群体的叶面积分布密切相关。

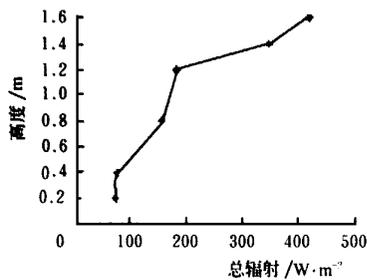


图 7 总辐射的垂直分布(2001-04-11, 晴)

Fig. 7 Vertical distributions of global solar radiation

#### 3.3.3 总辐射、光合速率与叶面积指数的关系

植物冠层不同高度总辐射与其上部累计叶面积等有

直接关系。对植株(双行 2 株)的叶面积做同步观测, 分层求得 1.4、1.0、0.6、0.2 m 高度累积叶面积指数(见表 5)。发现总辐射随群体高度变化与累积叶面积指数呈负相关, 即黄瓜群体内辐射值随其上方的叶面积(用累积叶面积指数表示)的增加而迅速减少, 到 0.2 m 高度, 辐射值不及冠层上方的 50% (全天平均为 49.4%)。根据上文分析可知冠层叶面积密度大, 水平叶居多, 截光性好; 而群体下部叶面积密度较小, 倾斜叶、垂直叶较多, 截光性较差。因此, 群体越往下辐射减少越慢。太阳总辐射与植物光合有效辐射(PAR)有相关性, 植物冠层叶的净光合速率也因总辐射的变化由冠层上部向下递减。从上午和下午光合作用旺盛时段测得的不同叶片净光合速率结果发现, 每层的平均净光合速率与总辐射变化趋于一致。因为在光饱和点以下, 作物叶片的净光合速率与接受的光合有效辐射 PAR 成正比。群体越向下, 接收的 PAR 越少, 加上越到下层叶, 由于叶的老化使光合能力下降, 使叶的净光合速率由冠层上部向下递减。

表 5 总辐射、净光合速率与累积叶面积指数关系

Table 5 Relationship among global solar radiation, net photosynthetic rate and cumulate leaf area index

高度 /m	12 时总辐射 /W·m <sup>-2</sup>	平均总辐射 /W·m <sup>-2</sup>	累积叶面积指数	净光和速率 /100 μmol/(m <sup>2</sup> ·s) <sup>-1</sup>
0.2	251	171	1.82	0.86
0.6	266	196	1.18	0.98
1.0	433	295	0.68	1.48
1.4	478	344	0.23	1.68

## 4 结 论

1) 叶面积指数 从抽蔓期到开花结果期温室内黄瓜叶面积指数稳定增长, 尤其在开花结果前期增加最快。同时, 叶面积密度在整个生育前期上升后期下降, 最大叶面积密度所在高度随黄瓜生长逐渐上移, 最后位于冠层上部。

2) 叶倾角与方位角 叶方位角以偏南居多, 而且随着生育期的推移愈明显; 而北向叶所占比例减少且表现突出。黄瓜的叶倾角大多分布在 0~30 范围即主要以水平叶为主, 但随着作物生长期和叶的衰老, 水平叶片慢慢下垂, 向倾斜叶甚至向垂直叶发展。不同品种黄瓜叶方位角与叶倾角也存在明显差异。

3) 群体总辐射和净光合速率分布 温室黄瓜群体内总辐射与冠层上方以及室外总辐射的日变化趋势一致。在水平方向, 不同部位的辐射也不同, 南部大于北部。群体内不同高度处总辐射与净光合速率都由上向下随累积叶面积指数增加而依次递减。

本研究是在目前应用较普遍的节能型日光温室内进行的, 结果表明: 黄瓜群体结构有一定的特征, 群体内的辐射分布与群体结构密切相关。上述结果为建立日光温室内作物群体的光环境模型奠定基础。可以推断生长着作物的日光温室内的光环境将有别于我们过去曾经建立的用于建筑结构参数的光环境模型(不考虑作物), 这对

于进一步优化日光温室结构有一定的指导意义。另一方面该研究也为建立日光温室内作物生长模型,特别是群体内分层光合速率的计算提供依据。而作物生长模型,则是温室光、温、CO<sub>2</sub>浓度等环境控制以及对植株的调控技术(如整枝、打杈技术等)的基础。

#### [参 考 文 献]

- [1] 陈端生 中国节能型日光温室的理论与实践[J]. 农业工程学报, 2001(1): 22~ 26
- [2] 刘国安 作物叶面积指数和叶倾角分布函数的一种推算方法[J]. 中国农业气象, 1994, 15(6): 11~ 15
- [3] . Pocc, T. H JI COH. 农作物叶片的空间取向及其测定方法[A]. 王天铎主编 光合作用与作物生产译丛[C]. 北京: 农业出版社, 1982, 14~ 24
- [4] 颜景义, 郑有飞, 张海珍等 小麦群体结构及光能利用分析[J]. 中国农业气象, 1995, 16(6): 5~ 9
- [5] 潘学标, 王延琴, 崔秀稳等 棉花群体结构与棉田光量子传递特性关系的研究[J]. 作物学报, 2000, 26(3): 333~ 340
- [6] 董振国, 刘瑞文 冬小麦夏玉米高产田群体结构参数[J]. 中国农业气象, 1995, 16(1): 9~ 12
- [7] Spitters C J T. Separating the diffuse and direct component of global radiation and its implications for modeling canopy photosynthesis Part I: Components of incoming radiation [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1986, (38): 217 ~ 229
- [8] Spitters C J T. Separating the diffuse and direct component of global radiation and its implications for modeling canopy photosynthesis Part II: Calculation of canopy photosynthesis [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1986(38): 231~ 242
- [9] Yang X, Short T H, Fox R D, et al Plant architectural parameters of a greenhouse cucumber row crop [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1990, (51): 93~ 105
- [10] Yang X, Short T H, Fox R D, et al A theoretical model of solar radiation transfer in a row-crop canopy [J]. Transaction of the A S A E, 1990(33): 917~ 924
- [11] Therenard D, Zhang Y, Jewett T J, et al Monitoring and modeling of light penetration into double-row greenhouse crop [J]. Transaction of the A S A E, 1999(42): 165~ 174
- [12] 钟阳和, 张理, 罗真萍 春小麦三种种植方式的群体结构分析[J]. 中国农业气象, 1990, (11): 40~ 44

## Analysis of architectural parameters and solar radiation distribution in cucumber canopy in sunlight greenhouse

Zhang Yahong, Chen Duansheng, Huang Wanhua

(College of Agronomy and Bio-technology, China Agricultural University, Beijing 100094, China)

**Abstract:** In order to study the relationship between plant canopy architecture and environmental elements in sunlight greenhouse, cucumber architectural parameters and the spatial distributions of global solar radiation in canopy were observed. The results showed that leaf area index, leaf area density, leaf zenith and azimuth angles varied obviously with growth stages and differed from varieties. Leaf area index increased steadily as the growth stages went on, and leaf area density increased at the early stage and decreased at the late stage. The height where much leaf area density was located was going up as cucumber developed; The main leaf zenith angle distributions were horizontal and the most leaf azimuth angles were leaning to the south. The differences were found to be related closely to spatial distributions of global solar radiation in canopy, also influencing photosynthetic rate. The results were anticipated to be useful in modeling the radiation transfer into cucumber canopy, developing the crop model, controlling greenhouse environment, reforming greenhouse architectural structure and so on.

**Key words:** sunlight greenhouse; cucumber; canopy architectural parameters; solar radiation