

塑料大棚面太阳短波辐射参数变化规律

朱 军 储长树

(南京气象学院)

摘要 本文提出太阳直接辐射在塑料棚面上散射率的概念,并根据太阳短波辐射各分量的实测资料计算和分析了棚面各辐射分量的反射率、透射率、棚内外辐射比值及散射率的日变化和日平均值。

关键词 微气象, 太阳辐射, 温室

在形成塑料大棚内微气象环境的诸多气象因子中,太阳辐射是最重要的。在大棚薄膜材料一定的条件下,影响大棚面上太阳短波辐射再分配的基本因素是直射光线在棚面上的入射角和棚内膜面上水滴的数量及膜面本身的作用,这两类因素的变化会引起棚面对一系列太阳短波辐射参数作用的变化。大棚揭膜后,由于蒸发和通风作用,棚内膜面上水滴大幅度减少,太阳辐射在棚面上的再分配几乎仅受直射光入射角和棚膜的影响,各辐射参数的日变化形式及日平均值与闭膜条件下均有差异。本文根据棚内外太阳短波辐射各分量的实测资料计算和分析棚面各辐射分量的反射率、透射率、棚内外辐射比值及散射率的日变化和日平均值。

1 试验设置及观测

试验大棚呈拱形结构,南北走向。棚底面长约45米,宽8米,棚高约3.5米。大棚采用钢筋骨架,以新的塑料薄膜为棚面覆盖材料。

试验安排在1987年和1988年的12月到翌年的4月初。选择典型晴天和阴天*,进行全日观测,每半小时进行一次测定。

在棚内中央地段和棚外东侧距棚约10米的对照地段上各安置一套辐射表,仪器感应部分高度1.5米,以测定棚内外短波辐射各分量。

2 各短波辐射分量参数的日变化特点

2.1 各短波辐射分量参数的计算

为使用方便,列出表1和表2(表中 t 表示1天中的 t 时刻)。

收稿日期:1990-04-07

*本试验的晴、阴天标准如下:晴天全天各时刻总云量小于1,观测时太阳视面上不见云迹;阴天全天各时刻总云量为10,观测时不见太阳轮廓

表1 t时刻各短波辐射分量符号

辐射量 下标意义	总辐射 $Q(t)$	直接辐射 $S(t)$	散射辐射 $D(t)$
棚外(下标O)	$Q_O(t)$	$S_O(t)$	$D_O(t)$
棚内(下标I)	$Q_I(t)$	$S_I(t)$	$D_I(t)$
膜面反射(下标R)	$Q_R(t)$	$S_R(t)$	$D_R(t)$
膜面吸收(下标A)	$Q_A(t)$	$S_A(t)$	$D_A(t)$
膜面上透入棚内(下标T)	$Q_T(t)$	$S_T(t)$	$D_T(t)$

表2 t时刻各短波辐射参数符号

参数 下标意义	反射率 $R(t)$	透射率 $T(t)$	散射率	棚内辐射 棚外辐射
总辐射(下标Q)	$R_Q(t)$	$T_Q(t)$		
直接辐射(下标S)	$R_S(t)$	$T_S(t)$	$T_{S-D}(t)$	$M_S(t) = S_T(t)/S_O(t)$
散射辐射(下标D)	$R_D(t)$	$T_D(t)$: 晴天 $T_D(t)$: 阴天		$M_D(t)$

入射到棚面上太阳短波辐射分量均可分为3部分:

$$Q_O(t) = Q_R(t) + Q_T(t) + Q_A(t) \quad (1a)$$

$$S_O(t) = S_R(t) + S_T(t) + S_A(t) \quad (1b)$$

$$D_O(t) = D_R(t) + D_T(t) + D_A(t) \quad (1c)$$

大棚薄膜吸收的太阳辐射能约占入射辐射的1%^[1],可略而不计,因而有

$$Q_O(t) = Q_R(t) + Q_T(t) \quad (2a)$$

$$S_O(t) = S_R(t) + S_T(t) \quad (2b)$$

$$D_O(t) = D_R(t) + D_T(t) \quad (2c)$$

另一方面:

$$Q_T(t) = Q_i(t) \quad (3a)$$

$$S_T(t) \neq S_i(t) \quad (3b)$$

$$D_T(t) \neq D_i(t) \quad (3c)$$

即:透射入棚内的总辐射 $Q_T(t)$ 等于棚内的总辐射 $Q_i(t)$ 。但棚外的直接辐射和散射辐射透入棚内部分($S_T(t)$, $D_T(t)$)并不等于棚内实际的直接辐射和散射辐射($S_i(t)$, $D_i(t)$)。棚内的散射辐射实际上是由以下两部分转换而来的:棚外的散射辐射透入棚内部分($D_T(t)$);棚外的直接辐射在透入大棚过程中因薄膜和膜上水滴的散射作用,部分散射成为棚内的散射辐射。其中第二部分与棚外直接辐射之比称为散射率,令为 $T_{S-D}(t)$,因此

$$\begin{aligned}
 D_i(t) &= D_T(t) + S_0(t) \cdot T_{s-D}(t) \\
 &= D_0(t) \cdot T_D(t) + S_0(t) \cdot T_{s-D}(t)
 \end{aligned} \quad (4)$$

如忽略薄膜对太阳辐射的吸收作用, 直接辐射入射到棚面上后, 转化为以下 3 部分: 被薄膜反射出去($R_s(t) \cdot S_0(t)$); 散射成为棚内的散射辐射($T_{s-D}(t) \cdot S_0(t)$); 透射入棚内的直接辐射($T_s(t) \cdot S_0(t)$)。因此

$$R_s(t) + T_{s-D}(t) + T_s(t) = 1 \quad (5)$$

短波辐射各分量的参数可分别表为:

I. 总辐射

$$\text{透射率} \quad T_Q(t) = Q_i(t) / Q_0(t) \quad (6a)$$

$$\text{反射率} \quad R_Q(t) = Q_R(t) / Q_0(t) = 1 - T_Q(t) \quad (6b)$$

II. 直接辐射

$$\text{透射率} \quad T_s(t) = S_i(t) / S_0(t) \quad (7a)$$

$$\text{反射率} \quad R_s(t) = 1 - [T_s(t) + T_{s-D}(t)] \quad (7b)$$

$$\text{散射率} \quad T_{s-D}(t) = \frac{D_i(t) - D_0(t) \cdot T_D(t)}{S_0(t)} \quad (7c)$$

阴天条件下, $T_Q(t)$ 和 $R_Q(t)$ 分别表示散射辐射的透射率 $T_D(t)$ 和反射率 $R_D(t)$ 。因而

$$\text{晴天} \quad T_Q(t) + R_Q(t) = 1 \quad (8)$$

$$\text{阴天} \quad T_D(t) + R_D(t) = 1 \quad (9)$$

2.2 各短波辐射参数的日变化特点

利用(6)~(9)式及短波辐射各分量的实测结果, 可算出短波辐射各参数的日变化(图1)。

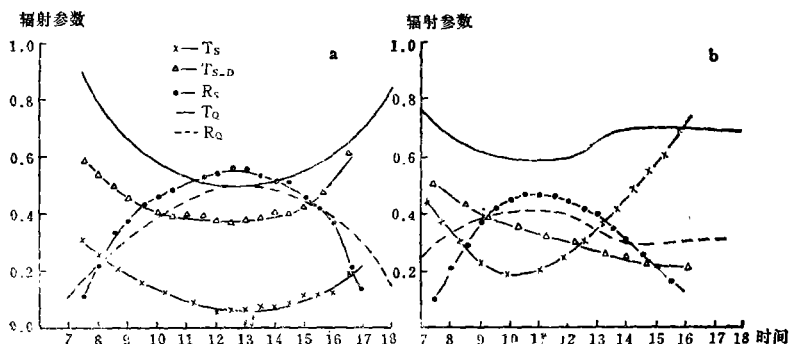


图1 薄膜(a)和棚膜(b)条件下参数的日变化(10时揭膜, 16时闭膜)

可以看出, 各辐射参数有如下变化特点:

(1) 直接辐射和总辐射的反射率均随太阳升高而增大, 透射率随太阳升高而减小。

其原因可作如下解释：a. 根据理论计算^[2]，在观测期间（赤纬 $\delta \approx -10^\circ$ ），南北走向的拱形大棚内辐射仪测点所对应的直射光线与棚面法线的交角—入射角和太阳高度角有如图2所示的日变化关系。由光学原理知，入射角越大，该面对入射光线的反射率越大，反之亦然。b. 闭膜条件下，日出后土壤蒸发和植物蒸腾加剧，空气中水汽含量急剧增多，并在膜面上凝成水滴，水滴量随太阳辐射增强而增多（表3）。

表3 棚内膜面上结水量(厚度: 毫米)随时间变化

时 间	8 时	9 时	10 时	11 时	12 时
结 水 量	0.075	0.090	0.093	0.123	0.149
时 间	13 时	14 时	15 时	16 时	
结 水 量	0.152	0.141	0.130	0.130	

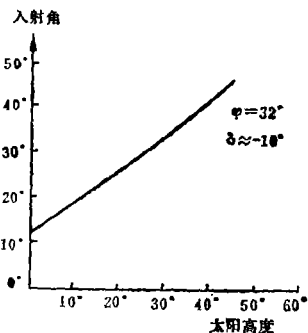


图2 (春分前)入射角与太阳高度角关系

由表3可见，膜上结水量在13时以前增加而13时以后减少。由于膜上水滴对太阳短波辐射在各个方向都存在散射作用，该作用使入射的短波辐射部分以反射辐射的形式从棚面上反射出去，水滴愈多，反射作用愈强。

总辐射由直射光和散射光组成，因而其反射率和透射率与直射光有相同的变化趋势。

(2) 揭膜通风后，膜上水滴量减少，午后膜面上几乎无水滴存在，因而，辐射参数的日变化无对称性。揭膜后不久，直射光反射率开始下降，透射率上升。

(3) 闭膜条件下，散射率随太阳升高而减小，日变化基本对称于正午。揭膜后，由于膜上水滴量逐步减小，散射作用削弱，散射率呈单一下降趋势。

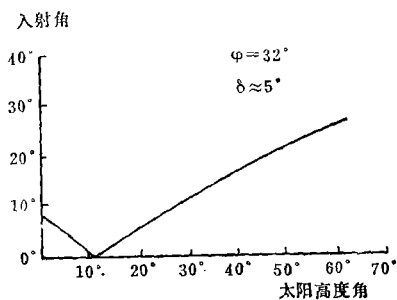


图3 (春分后)入射角与太阳高度角关系

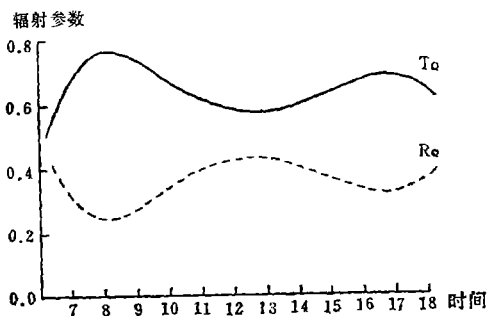


图4 (春分后)总辐射的反射率和透射率的日变化

春分后，直射光在棚面上的入射角随太阳高度呈非均一的日变化形式^[2]。由图3可见，从日出到正午，入射角先降后升，因而棚面反射率先降后升，透射率则相反。由正午到日落，则出现与上午对应的形式（图4）。

3 各短波辐射参数的日平均值

令 t_1 、 t_2 、 $\dots$ 、 t_n 分别为一天中对辐射的第1、2、 $\dots$ 、 n 次观测的时刻。

根据 $T_Q(t) = Q_I(t)/Q_O(t)$, 经适当代数运算可推出

$$\overline{T_Q} = \frac{\sum_{t=t_1}^{t_n} T_Q(t) \cdot Q_O(t)}{\sum_{t=t_1}^{t_n} Q_O(t)} = \frac{\sum_{t=t_1}^{t_n} Q_I(t)}{\sum_{t=t_1}^{t_n} Q_O(t)} \quad (10)$$

$\overline{T_Q}$ 即为对总辐射进行加权平均得到的总辐射的日平均透射率。

同样, 对于直接辐射和阴天条件下散射辐射透射率的日平均值及日平均散射率有

$$\overline{T_S} = \frac{\sum_{t=t_1}^{t_n} T_S(t) \cdot S_O(t)}{\sum_{t=t_1}^{t_n} S_O(t)} = \frac{\sum_{t=t_1}^{t_n} S_I(t)}{\sum_{t=t_1}^{t_n} S_O(t)} \quad (11)$$

$$\overline{T_D} = \frac{\sum_{t=t_1}^{t_n} T_D(t) \cdot D_O(t)}{\sum_{t=t_1}^{t_n} D_O(t)} = \frac{\sum_{t=t_1}^{t_n} D_I(t)}{\sum_{t=t_1}^{t_n} D_O(t)} \quad (12)$$

$$\overline{T_{S-D}} = \frac{\sum_{t=t_1}^{t_n} T_{S-D}(t) \cdot S_O(t)}{\sum_{t=t_1}^{t_n} S_O(t)} = \frac{\sum_{t=t_1}^{t_n} D_I(t)}{\sum_{t=t_1}^{t_n} S_O(t)} = \frac{\sum_{t=t_1}^{t_n} T_D(t) \cdot D_O(t)}{\sum_{t=t_1}^{t_n} S_O(t)} \quad (13)$$

为了计算方便, (13) 式中散射辐射透射率 $T_D(t)$ 可采用全天平均值 $\overline{T_D}$, 因此

$$\overline{T_{S-D}} = \frac{\sum_{t=t_1}^{t_n} D_I(t)}{\sum_{t=t_1}^{t_n} S_O(t)} = \overline{T_D} \cdot \frac{\sum_{t=t_1}^{t_n} D_O(t)}{\sum_{t=t_1}^{t_n} S_O(t)} \quad (14)$$

在(10)~(14)式的基础上, 总辐射、散射辐射及直接辐射的日平均反射率可分别表为:

$$\overline{R_Q} = 1 - \overline{T_Q} = 1 - \frac{\sum_{t=t_1}^{t_n} Q_I(t)}{\sum_{t=t_1}^{t_n} Q_O(t)} \quad (15a)$$

$$\overline{R_D} = 1 - \overline{T_D} = 1 - \frac{\sum_{t=t_1}^{t_n} D_I(t)}{\sum_{t=t_1}^{t_n} D_O(t)} \quad (15b)$$

$$\text{直接辐射} \quad \overline{R}_S = 1 - (\overline{T}_S + \overline{T}_{S-D}) = 1 - \frac{\sum_{t=t_1}^{t_n} Q_i(t)}{\sum_{t=t_1}^{t_n} S_o(t)} + \overline{T}_D \cdot \frac{\sum_{t=t_1}^{t_n} D_o(t)}{\sum_{t=t_1}^{t_n} S_o(t)} \quad (15c)$$

由(4)式可得出棚内外散射辐射的日平均比值 $\overline{M}_D$

$$\overline{M}_D = \frac{\sum_{t=t_1}^{t_n} D_i(t)}{\sum_{t=t_1}^{t_n} D_o(t)} = \overline{T}_D + \overline{T}_{S-D} \cdot \frac{\sum_{t=t_1}^{t_n} S_o(t)}{\sum_{t=t_1}^{t_n} D_o(t)} \quad (16)$$

直接辐射透入棚内部分与棚外直接辐射之比的日平均值为

$$\overline{M}_S = \left(\frac{\overline{S_T(t)}}{\overline{S_o(t)}} \right) = \left(\frac{\overline{S_i(t) + S_o(t) \cdot T_{S-D}(t)}}{\overline{S_o(t)}} \right) = \overline{T}_S + \overline{T}_{S-D} \quad (17)$$

如采用全日自动累积的辐射记录仪,只需将最终测取的各辐射分量的全日累积值代入对应公式,便可立即得出最终结果。在这种情况下,上述各式中的求和号 $\sum_{t=t_1}^{t_n}$ 应改为积分号 $\int_{t_0}^{t_e}$,其中 t_0 , t_e 分别为日出、日落时间。

闭膜和揭膜两种条件下,各参数的日平均值如表4所示(注:阴天不揭膜)。

表4 闭、揭膜条件下各参数的日平均值(为3天平均值)

处 理	天 气	晴				天			阴 天	
		$\overline{T}_Q$	$\overline{R}_Q$	$\overline{T}_S$	$\overline{T}_{S-D}$	$\overline{R}_S$	$\overline{M}_D$	$\overline{M}_S$	$\overline{T}_D$	$\overline{R}_D$
闭 膜		0.62	0.38	0.13	0.55	0.32	1.63	0.68	0.58	0.42
揭 膜 (晴天)		0.69	0.31	0.33	0.41	0.26	1.14	0.74		

由表4可以看出各参数有如下特点:

(1)揭膜条件下,由于棚内膜面上水滴量大为减少,所以总辐射和直接辐射的透射率均比闭膜条件下高,后者的增加程度尤为明显;相反,反射率却比闭膜条件下小。由此可见,采取适当措施减少膜面上的结水量对减小棚面反射率、增加透射率、提高棚面对太阳短波辐射的透射量都具有实际意义。

(2)揭膜条件下,棚内外散射辐射强度之比($\overline{M}_D$)较闭膜条件下削弱,但两种条件下比值均大于1,这说明棚内散射光强大于棚外,此乃棚膜和膜面上水滴对直接辐射的散射作用所致。

(3)揭膜条件下的散射率小于闭膜条件。

(4)两种处理条件下,均有

$$\overline{M}_S > \overline{T}_Q$$

如令 $\overline{T}_D'$ 表示晴天条件下棚面对散射辐射的日平均透射率,经适当数学推导(见附录),可

以得到:

$$\overline{M}_s > \overline{T}_Q > \overline{T}_D'$$

该式说明, 晴天条件下, 直接辐射的透入率最高, 散射辐射透入率最低, 总辐射透入率居中。

本试验得到冯秀藻教授和翁笃鸣教授的多方指导, 张正元等同志在观测方面予以协助, 万长健同志在微机使用方面提供了方便, 在此表示衷心感谢。

参 考 文 献

- 1 内海修一著, 王志刚等译. 保护地园艺—环境与作物生理. 北京: 农业出版社, 1980
- 2 朱 军等. 南京气象学院学报, 1990, 14(3): 417—425

附 录

$$\text{因为 } T_D'(t) = \frac{D_T(t)}{D_O(t)} \quad M_s(t) = \frac{S_T(t)}{S_O(t)} \quad T_Q(t) = \frac{Q_T(t)}{Q_O(t)}$$

$$\text{则有 } T_D'(t) \cdot D_O(t) = D_T(t) \quad M_s(t) \cdot S_O(t) = S_T(t) \quad T_Q(t) \cdot Q_O(t) = Q_T(t)$$

而 $Q_i(t) = S_T(t) + D_T(t)$, 所以

$$T_D'(t) \cdot D_O(t) + M_s(t) \cdot S_O(t) = T_Q(t) \cdot Q_O(t) = T_Q(t) [S_O(t) + D_O(t)]$$

$$\text{因此 } [M_s(t) - T_Q(t)] \cdot S_O(t) = [T_Q(t) - T_D'(t)] \cdot D_O(t)$$

对时间 t 取平均

$$[\overline{M}_s(t) - \overline{T}_Q(t)] \cdot \overline{S_O(t)} = [\overline{T}_Q(t) - \overline{T}_D'(t)] \cdot \overline{D_O(t)}$$

由于各辐射参数与太阳辐射强度无关, 因而

$$[\overline{M}_s(t) - \overline{T}_Q(t)] \cdot \overline{S_O(t)} = [\overline{T}_Q(t) - \overline{T}_D'(t)] \cdot \overline{D_O(t)}$$

$$\text{即: } (\overline{M}_s - \overline{T}_Q) \cdot \overline{S_O(t)} = (\overline{T}_Q - \overline{T}_D') \cdot \overline{D_O(t)}$$

由表 4 可知 $\overline{M}_s - \overline{T}_Q > 0$, 且 $\overline{S_O(t)} > 0$, $\overline{D_O(t)} > 0$

因此必有 $\overline{T}_Q - \overline{T}_D' > 0$

故: $\overline{M}_s > \overline{T}_Q > \overline{T}_D'$

VARAIATIONS OF THE PARAMETERS OF SOLAR SHORT-WAVE RADIATION ON THE GREENHOUSE PLASTIC SURFACE

Zhu Jun Chu Changshu

(Nanjing Institute of Meteorology)

Abstract The concept of diffusing index of direct solar radiation on the greenhouse plastic surface is proposed in this study. Based on the data of solar radiation observed inside and outside the greenhouse, the diurnal variations and daily averages of the parameters including the albedo, transmissivity, diffusing index of direct solar radiation and the ratio of short-wave radiation inside the greenhouse to that outside are calculated and analysed.

Key words: micrometeorology, solar radiation, greenhouse