

拱形棚面直射光反射规律及大棚取向决策

朱 军 储长树 王华松

提 要

本文将拱形塑料大棚的横截面看作半圆形,用数学模式计算了南北向和东西向大棚面上直射光入射角的变化,并分析棚面上直射光反射率的日变化、季节变化和纬度变化。在此基础上,计算了两种走向大棚面法向直射光强的日平均比值。根据比值的时间和纬度变化,对 $0-60^{\circ}\text{N}$ 地区拱形大棚宜选择的合理走向作出了决策。

拱形塑料大棚的横截面可看作半圆形,其特点是用料省、支撑力强。是目前我国使用最广泛的一种塑料温室。

棚内太阳辐射的多少,在很大程度上决定了棚内的微气象环境。入射太阳辐射的一部分被棚面反射,其大小与大棚走向及太阳位置密切相关^[1]。因此,探讨棚面对太阳辐射的反射规律,对进一步研究棚内的光环境,确定大棚走向等有较强的实际意义。

由于天空的散射光可基本认为是各向同性的,所以大棚走向和太阳位置与棚面对散射光的反射率无关^[1]。但直射光的方向性很强,任一表面对直射光的反射率和其入射角密切相关。入射角越大,反射率就越大,反之亦然。由于太阳位置及大棚走向不同,造成直射光对棚面的入射角不同,从而引起棚面对直射光反射率的变化。

本文将拱形大棚看作半圆柱形,通过直射光在棚面上的入射角变化,推断东西走向和南北走向两种大棚棚面对直射光反射率的变化规律。并通过该两种走向大棚棚面法向直射光强之比值,评价同一太阳辐射条件下,两种走向大棚棚面所受直射光强的相对大小,进而从棚面受光条件的角度,对不同纬度地区拱形大棚的合理取向提出一些建议。

一、大棚棚面直射光反射率的变化规律

1. 直射光入射角日变化的理论模式

太阳直射光作为一巨大光束射于棚面,其上每一点均有一入射角。可以证明,棚面上沿大棚走向的直线上各点的入射角相等。但在大棚横截面的圆周上,入射角沿圆周而

变化。因此, 只需研究横截面圆周上的入射角, 便可反映出整个棚面的情况。

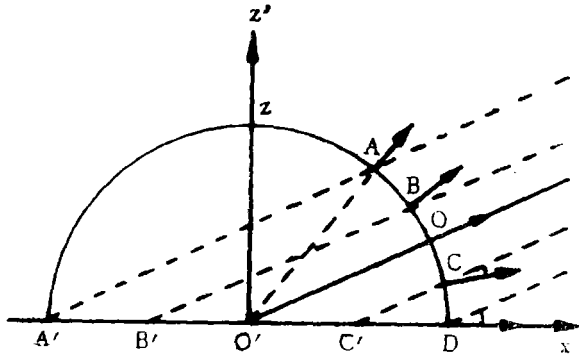


图1 直射光束在大棚横截面投影图

各点法线均有一夹角, 且O点两侧等弧长上的点的夹角相等(即 $\angle A = \angle D$, $\angle B = \angle C$)。由此可知, 到达棚内地面的直射光束中, 过棚中央点(O')的直射光线在棚面的入射角最小, 向两侧则均匀增大。所以过棚中央点的直射光在棚面上的反射率最小, 向两侧反射率同等均匀增大。O'点的反射率可作为一个标准, 来反映整个棚面上直射光反射率的变化情况。由于我们只需分析直射光入射角的时空变化, 以研究直射光反射率的变化规律。因此选择过中央点的直射光线为研究对象*, 对不同走向大棚和不同太阳高度角条件下, 棚面所受的直射光状况进行对比分析。根据入射角的变化, 间接探讨直射光反射率的变化。

如图2所示, 将大棚看作一半圆柱形。棚内地面中央点为O'。S、N、E分别为南、北、东三个基本方位。过O'点的直射光线与棚面交于P点, P点法线为PN', 过O'点平行于PN'的直线与棚面的交点为O, 可以证明O'O为棚面上O点的法线。设过O点, 且平行于大棚横向的切线交地面于M点。令 $\angle OMO' = \alpha$, $\angle OO'M = h_a$, 则 $h_a + \alpha = 90^\circ$,

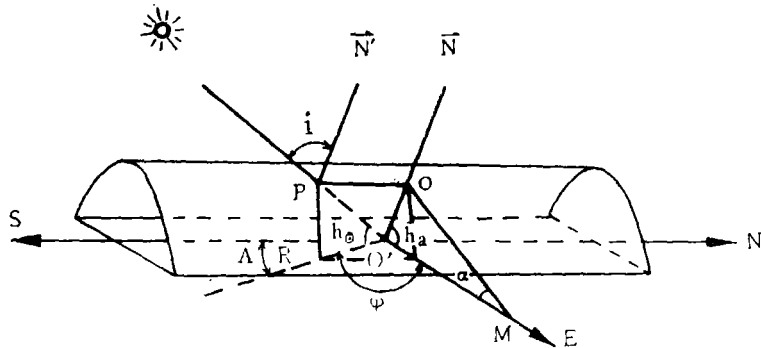


图2 拱形大棚棚面直射光入射角示意图

* 棚内地面上各点对应的棚面反射率均不同也无法确定, 更不能在大棚横向连续设辐射仪观测。实际观测中, 仅在棚中央安置辐射仪(该点的辐射值, 正是文中选择的直射光的辐射强度), 再通过棚内外辐射对比观测, 确定棚面上直射光的反射率

过 O' 点的直射光在棚面的入射角为 i , 并等于该光线与 $O'O$ 的夹角。直射光方位角为 A (直射光在水平面上的投影与正南方向的夹角), 直射光线在水平面上的投影与 $O'M$ 的夹角为 ψ , 取正南为初始方位(方位角为 0), 向东为负、向西为正。于是可建立以下的理论模式。

首先引入太阳高度角和方位角公式

$$\sin h_{\odot} = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega \quad (1)$$

$$\sin A = \frac{\cos \delta \cdot \sin \omega}{\cos h_{\odot}} \quad (2)$$

其中 $h_{\odot}$: 太阳高度角, φ : 地理纬度, δ : 赤纬, ω : 时角, A : 太阳方位角。

根据地形遮蔽角公式^[2], 可有

$$\sin h_{\odot} = \frac{|\cos \psi|}{\sqrt{\operatorname{ctg}^2 h_{\alpha} + \cos^2 \psi}}$$

结合 $h_{\alpha} + \alpha = 90^{\circ}$

则有

$$\sin h_{\odot} = \frac{|\cos \psi|}{\sqrt{\cos^2 \psi + \operatorname{tg}^2 \alpha}} \quad (3)$$

仿照太阳直射光线与山坡坡面法线夹角公式, 有

$$\cos i = \sin h_{\odot} \cos \alpha + \cos h_{\odot} \sin \alpha \cdot \cos(A - \beta) \quad (4)$$

其中 β : 直线 $O'M$ 与正南方向的夹角。

基于(1)~(4)式, 分别代入南北走向和东西走向大棚的具体条件, 便可得到两种走向大棚的计算模式。

1) 南北向大棚的理论模式 大棚条件为 $\psi = -(-90^{\circ} - A) = 90^{\circ} + A$ $\beta = -90^{\circ}$ 则(3)式变为

$$\sin h_{\odot} = \frac{|\cos(90^{\circ} + A)|}{\sqrt{\cos^2(90^{\circ} + A) + \operatorname{tg}^2 \alpha}}$$

整理后有

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{|\sin A|}{\operatorname{tg} h_{\odot}}$$

(4)式变为

$$\cos i = \sin h_{\odot} \cos \alpha - \cos h_{\odot} \sin \alpha \sin A$$

所以南北向大棚入射角(i)的计算方程组为

$$\cos i = \sin h_{\odot} \cos \alpha - \cos h_{\odot} \sin \alpha \sin A \quad (5a)$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{|\sin A|}{\operatorname{tgh} \odot} \quad (5b)$$

$$\sinh \odot = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega \quad (5c)$$

$$\sin A = \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cosh \odot} \quad (5d)$$

2) 东西向大棚的理论模式 大棚条件为 $\psi = A$, $\beta = 0$, 则(3)式变为

$$\sinh \odot = \frac{|\cos A|}{\sqrt{\cos^2 A + \operatorname{tg}^2 \alpha}}$$

整理后有

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{|\cos A|}{\operatorname{tgh} \odot}$$

(4)式变为 $\cos i = \sinh \odot \cos \alpha + \cosh \odot \sin \alpha \cos A$, 所以东西向大棚入射角(i)的计算方程组为

$$\cos i = \sinh \odot \cos \alpha + \cosh \odot \sin \alpha \cos A \quad (6a)$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{|\cos A|}{\operatorname{tgh} \odot} \quad (6b)$$

$$\sinh \odot = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega \quad (6c)$$

$$\sin A = \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cosh \odot} \quad (6d)$$

3) 入射角日平均值计算模式 方程组(5)和(6), 用于计算入射角的日变化。对于某一纬度地区某天的日平均入射角 $\overline{i_d}$, 可用该天不同时刻(t)的入射角 $i(t)$ 对该时刻太阳高度角 $h \odot(t)$ 的加权平均求出

$$\overline{i_d} = \frac{\sum_{t=t_0}^{t_M} i(t) \cdot h \odot(t)}{\sum_{t=t_0}^{t_M} h \odot(t)} \quad (7)$$

其中, t_0 , t_M 分别为日出时刻和正午时刻(地方时)。

根据模式(5)——(7), 以冬至为起点, 赤纬(δ)每隔 7.8° 计算出两种走向大棚入射角的日变化。选择的赤纬和代表符号见表 1。

表 1 各选定赤纬及代表符号

代表符号	A	B	C	D	E	F	G
赤纬($^\circ \delta$)	-23.5	-15.7	-7.8	0	7.8	15.7	23.5
季 节	冬 至			二分日			夏至

2. 南北向大棚对直射光的反射规律

图 3 和表 2 分别为不同纬带入射角的日变化和日平均入射角的季节变化。可以看出: 冬至和二分日期间(实线部分), 入射角随太阳升高而增加; 夏至和二分日期间(虚线部分), 低纬地区(约 $\varphi \leq 15^\circ \text{N}$), 入射角随太阳升高而减小, $\varphi > 15^\circ \text{N}$ 的地区, 入射角随太阳高度先降后升, 随着纬度增加, 入射角日变幅增大; 由冬至到夏至, 日平均入射角逐步减小, 减小程度随纬度增高而加大。从而可以推出反射率的变化规律为 1) 冬至和二分日期间, 反射率随太阳升高而增大。2) 夏至和二分日期间, $\varphi \leq 15^\circ \text{N}$ 的纬带, 反射率随太阳升高而减小; $\varphi > 15^\circ \text{N}$ 的纬带, 反射率随太阳高度先降后升。3) 反射率日变幅随纬度增高而加大。4) 由冬至到夏至, 日平均反射率呈减小趋势, 减小程度随纬度升高而加大。5) 冬至和二分日期间, 日平均反射率随纬度而增加; 夏至和二分日期间, 日平均反射率随纬度先降后升(见表 2)

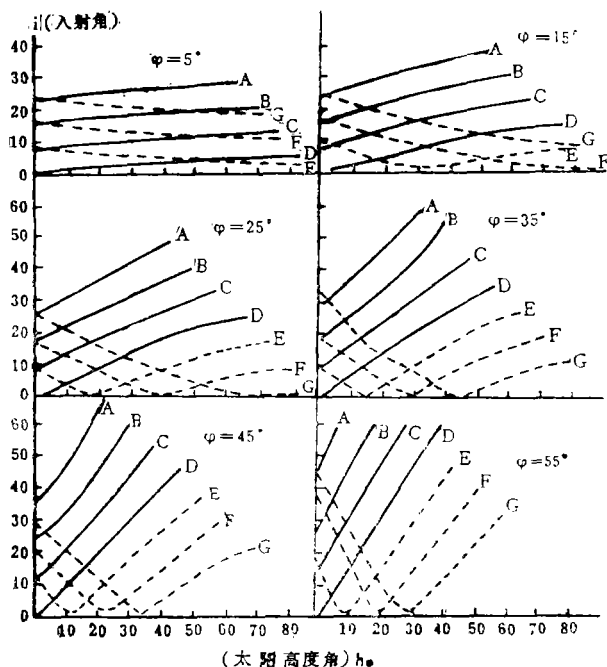


图 3 南北向大棚入射角随太阳高度角的变化规律

表 2 不同纬带南北向大棚各季节的日平均入射角($\bar{i}_d$)

$\delta(^{\circ})$ $\varphi(^{\circ}\text{N})$	-23.5	-15.7	-7.8	0	7.8	15.7	23.5
0	23.5	15.7	7.8	9.5	7.8	15.7	23.5
5	27.5	19.7	11.9	4.1	3.7	11.6	19.5
15	35.6	27.8	20.0	12.2	5.0	3.5	11.4
25	43.7	35.8	27.9	20.1	12.5	6.5	4.2
35	51.9	43.8	35.7	27.8	20.0	13.3	8.2
45	60.2	51.7	43.3	35.1	27.2	20.1	14.2
55	69.4	59.9	50.8	42.1	33.8	26.7	20.5

3. 东西向大棚对直射光的反射规律

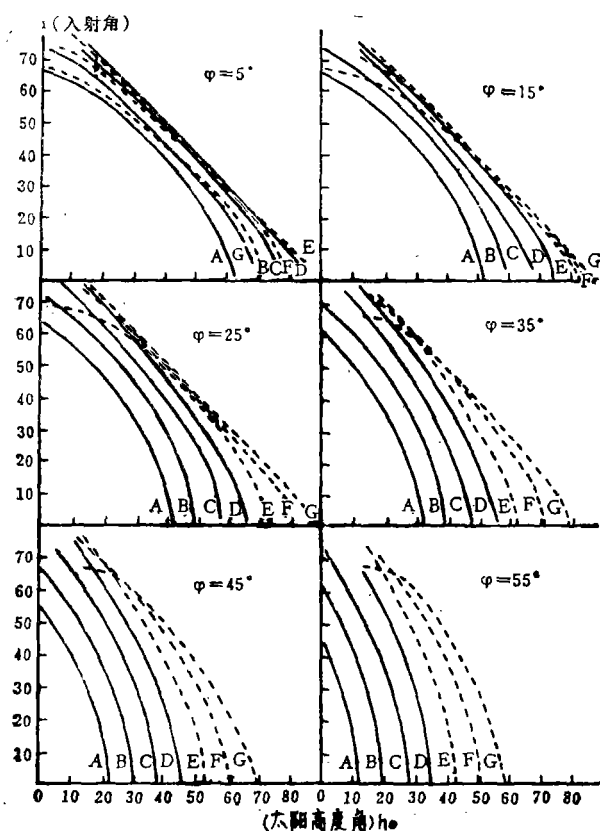


图4 东西向大棚入射角随太阳高度角的变化规律

图4和表3分别表示不同纬带入射角的日变化和日平均入射角的季节变化。可以看出：入射角的日变化均随太阳升高而减小，减小程度随纬度增高而加大；由冬到夏，日平均入射角基本呈增加趋势，增加的程度随纬度升高而加大；冬至和二分日期间，日平均入射角逐日变化大于夏至和二分日期间。可见反射率的变化规律为1)反射率日变化均随太阳升高而下降，纬度越高下降程度越明显。2)由冬到夏，日平均反射率呈增加趋势，增加程度随纬度升高而加大。3)冬至和二分日期间，日平均反射率逐日变化大于夏至和二分日期间。

表3 不同纬带东西向大棚各季节的日平均入射角($\bar{i}_d$)

$\delta(^{\circ})$	-23.5	-15.7	-7.8	0	7.8	15.7	23.5
$\varphi(^{\circ}\text{N})$							
0	26.3	27.6	28.3	37.8	28.3	27.6	26.3
5	25.9	27.5	28.4	28.5	28.2	27.7	26.6
15	25.1	27.1	28.5	29.1	28.9	28.0	27.1
25	24.0	26.6	26.5	29.7	30.0	29.2	27.6
35	22.5	25.7	28.3	30.2	31.0	30.5	29.0
45	20.1	24.3	27.8	30.6	32.1	31.9	30.4
55	16.2	22.0	26.9	30.8	33.2	33.2	31.8

二、各纬带拱形大棚合理走向决策

当太阳位置一定时, 由于南北向和东西向大棚棚面对直射光的反射率不一样, 致使直射光的透过量有差异, 导致两种棚内的太阳辐射条件不同。通过分析两种棚面上直射光强的比值, 可间接评价两种棚内太阳光照的相对强弱。为此, 从接受太阳辐射条件的角度出发, 对不同纬带大棚的合理取向作出决策。

南北向和东西向大棚棚面法向的直射光强, 可分别表为

$$S_{(S-N)} = S_m \cdot \cos i_{(S-N)}$$

$$S_{(E-W)} = S_m \cdot \cos i_{(E-W)}$$

其中, 下标(S-N)和(E-W)分别表示南北向和东西向, S_m 为直射光方向的直接辐射强度。两光强比值C可表为

$$C = \frac{S_{(S-N)}}{S_{(E-W)}} = \frac{\cos i_{(S-N)}}{\cos i_{(E-W)}} \quad (8)$$

$C > 1$, $S_{(S-N)} > S_{(E-W)}$, 表示南北向大棚的太阳辐射条件优于东西向大棚; $C < 1$, 则反之。

采用比值C的日平均值 $\bar{C}_d$, 可判断两种走向大棚全天平均受光状况的优劣程度。利用已有模式, 可构成计算日平均C值的方程组

$$\operatorname{tg} \alpha_{(S-N)} = \frac{|\sin A|}{\operatorname{tg} h_{\odot}} \quad (9a)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_{(E-W)} = \frac{|\cos A|}{\operatorname{tg} h_{\odot}} \quad (9b)$$

$$C = \frac{\sinh_{\odot} \cos \alpha_{(S-N)} - \cosh_{\odot} \sin_{(S-N)} \cdot \sin A}{\sinh_{\odot} \cos \alpha_{(E-W)} + \cosh_{\odot} \sin_{(E-W)} \cdot \cos A} \quad (9c)$$

$$\bar{C}_d = \frac{\sum_{t=t_0}^{t_M} C(t) \cdot h_{\odot}(t)}{\sum_{t=t_0}^{t_M} h_{\odot}(t)} \quad (9d)$$

其中, $C(t)$ 为一天中 t 时刻的比值(t 为地方时)。

利用方程组(9)并结合太阳高度角和方位角公式, 可求出冬至和二分日之间, 我国主要纬带日平均值 $\bar{C}_d$ (表4)。

由表4可见, $\varphi \leq 10^\circ \text{N}$, $\bar{C}_d$ 均大于1, $\varphi > 10^\circ \text{N}$, 开始出现 $\bar{C}_d$ 小于1的情况, $10^\circ \text{N} < \varphi \leq 25^\circ \text{N}$, 冬至到二分日的大部分时段, $\bar{C}_d$ 仍大于1, $25^\circ \text{N} < \varphi \leq 40^\circ \text{N}$, 冬至到二

分日的大部分时段, $\overline{C_d}$ 小于 1, $\varphi > 40^\circ\text{N}$, $\overline{C_d}$ 基本都小于 1。

表 4 各纬带日平均值 $\overline{C_d}$ 的季节变化(虚线所括的 $\overline{C_d}$ 均小于 1)

$\varphi(^{\circ}\text{N})$ $\delta(^{\circ})$	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
-23.5	1.13	1.09	1.04	0.98	0.92	0.86	0.79	0.72	0.64	0.56	0.48	0.38	0.27
-15.7	1.25	1.21	1.18	1.13	1.08	1.02	0.96	0.90	0.83	0.75	0.67	0.59	0.50
-7.8	1.35	1.34	1.31	1.28	1.24	1.20	1.15	1.09	1.04	0.97	0.90	0.83	0.75
0	1.49	1.50	1.49	1.49	1.48	1.46	1.44	1.42	1.40	1.37	1.34	1.31	1.29

鉴于塑料大棚主要在冬半年使用, 且纬度越低, 使用期越局限于最冷季(δ 约为 -23.5° 至 -7.8°)。于是, 可对我国所处的主要纬带内, 对大棚的合理取向作出决策(见表 5)。

表 5 不同纬带拱形大棚合理走向决策

纬带($^{\circ}\text{N}$)	大 棚 合 理 走 向
$\varphi \leq 10$	南 北 向
$10 < \varphi \leq 25$	南北向(但仅在 12 月至翌年 1 月使用也可选东西向)
$25 < \varphi \leq 40$	基 本 可 选 为 东 西 向
$40 < \varphi < 60$	东 西 向
$60 \leq \varphi$	东 西 向

三、小 结

根据拱形大棚棚面直射光入射角的时空变化规律, 间接推断棚面对直射光反射率的时空变化规律。又根据南北向和东西向大棚棚面上直射光强的日平均比值, 评价出不同季节和纬带, 两种大棚受光条件的优劣程度。进而对不同纬带拱形大棚宜选择的合理走向作出决策。主要结论为:

1. 南北向大棚, 冬至和二分日期间, 反射率随太阳升高而增大; 夏至和二分日期间, 反射率随太阳升高而先降后升。

2. 东西向大棚, 各季节反射率均随太阳升高而减小。

3. $\varphi \leq 10^\circ\text{N}$ 地区, 大棚应选择南北走向; $10^\circ\text{N} < \varphi \leq 25^\circ\text{N}$ 地区, 可根据主要使用时段而定, 但侧重于选择南北走向; $25^\circ\text{N} < \varphi \leq 40^\circ\text{N}$ 地区, 基本上可选择东西向; $\varphi > 40^\circ\text{N}$ 地区, 选择东西向。

参 考 文 献

- [1] Mastalerz, J.H., The greenhouse environment, John Wiley and sons, 53—77, 1977.
[2] 翁笃鸣等, 小气候和农田小气候, 6—9, 117—122, 农业出版社, 1981.

CHARACTERISTICS OF REFLECTION OF DIRECT SOLAR RADIATION BY THE PLASTIC SURFACE OF THE QUONSET- TYPE GREENHOUSE AND DECISION FOR REASONABLE CHOICE OF ORIENTATION

Zhu Jun Chu Changshu Wang Huasong

ABSTRACT

The cross section of the Quonset-type plastic greenhouse is considered as a semi-circle. By means of the mathematical model, the incident angles of direct solar radiation at various elevations on the plastic surface of the greenhouse in north-south and east-west orientations are calculated and daily, seasonal and latitudinal changes of its reflectivity on the plastic surface are analyzed. On this basis, calculation is made for the mean daily ratio of the intensity of direct solar radiation normal to the surface of the greenhouse in the two orientations. A decision is thus made for the reasonable choice of orientation in the zone of 0-60°N from the seasonal and latitudinal changes of the ratio.