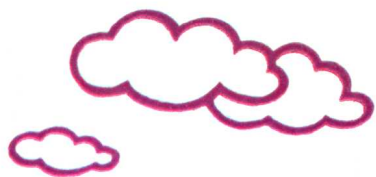


当代温室气候与花卉

罗中岭 编著



中国农业科技出版社

29
52

当代温室气候与花卉

罗中岭 编著

中国农业科技出版社

(京)新登字 061 号

图书在版编目(CIP)数据

当代温室气候与花卉 / 罗中岭编著—北京: 中国农业
科技出版社, 1994

ISBN 7—80026—789—X

I. 当… II. 罗… III. ①温室—气候—研究 ②温室—栽培
—概况—世界 IV. S62

中国版本图书馆 CIP 数据(94)第 08409 号

当代温室气候与花卉

罗中岭 编著

责任编辑: 高湘玲 郝心仁

封面设计: 孙宝林

※

中国农业科技出版社出版

北京海淀区白石桥路 30 号 邮政编码: 100081

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京中长印刷厂印刷

开本: 787×1092 毫米 1/32 印张: 10.25 字数: 227 千字

1994 年 10 月一版

1994 年 10 月第一次印刷

印数: 1—500 册 定价: 15.00 元

前 言

温室产业是一种高投入、高产出的集约化生产经营方式。随着我国人口的有计划增长和耕地面积的不断缩小,农业生产朝着集约化方向发展是历史的必然趋势。荷兰、日本土地面积小、人口密度大,温室面积占世界首位。相比之下,美国的温室企业不及北欧发达。中国拥有辽阔的国土和多种多样的气候区域,与美国有更多相似之处。本书的目的在于提供一个窗口,更多的展现以美国为主的国外目前温室气候研究动向和当今温室生产状况。主要对象是农业科学技术人员、大专院校有关专业师生、温室管理人员及温室技术人员。

国外近几年可控环境栽培理论方面,很重要的概念更新体现在花卉生产中差温(包括温室“倒温差”)的研究和推广。尽管对温室果菜类的生产,人们已习惯昼温高于夜温的温度管理方式,但昼温和夜温的累积与拮抗作用对温室产品产量和品质的影响目前研究得还不够。即使在热量资源十分充裕的地热温室,温度管理水平仍然有待提高。

本书力求反映最新的学科内容,集教学、生产与科研为一体,做到理论与实践并重,基础和应用齐备。第一篇根据作者长期实践经验及积累的资料,并参照1991年美国加利福尼亚大学及1992年密执安州立大学的讲义,除了提供研究分析现代化温室生产过程必要的物理工程气象知识外,也可以作为农用设施环境手册使用。第二篇取材于美国温室种植者协会组织观摩讲座的文稿、Heins博士关于温度控制的演说及生产第一线人员的真实采访记录。第三篇展示最新的研究动向,包括Heins博士和他的研究生写的两篇代表作,孙忠富博士关于温室光环境以及本书作者关于地热温室温度环境的文章。但愿本书对于充实新的温室栽培理论,发展我国的温室及保护地栽培有所帮助。

在本书的编辑过程中,一直得到农业气象研究所领导的关怀和支持,并得到徐师华、谢明新先生对应用篇日译中资料的校阅,借此机会向为本书出版做出努力的人们致以衷心感谢。

中国农业科学院农业气象研究所

罗 中 岭

1994年6月

目 录

第一篇 基础篇 温室气候学基础

第一章 光照	(1)
第一节 太阳辐射	(1)
第二节 温室自然光环境	(6)
第三节 人工光源	(14)
第四节 辐射测试技术	(16)
第五节 辐射单位的换算	(19)
第二章 温度	(27)
第一节 温室温度环境	(27)
第二节 生长发育温度三基点	(38)
第三节 温室的加热	(43)
第四节 温室内温度管理	(50)
第五节 温度测试技术	(53)
第三章 水分环境	(56)
第一节 水势与水分传输	(56)
第二节 空气湿度	(61)
第三节 温室蒸散	(66)
第四节 土壤水分	(73)
第四章 温室气流及二氧化碳调节	(80)
第一节 通风换气	(80)
第二节 温室内二氧化碳的调节	(85)
第五章 温室环境监测及控制	(94)
第一节 自动控制系统概述	(94)
第二节 数据采集	(97)
第三节 调节器的控制规律	(100)
第四节 计算机监测与控制	(103)

第二篇 应用篇 温室气候控制在花卉产业中的应用

第一章 美国温室花卉生产与研究动态	(110)
第一节 历史与现状	(110)
第二节 研究成果及其推广	(111)
第二章 差温的概念和应用	(112)
第一节 差温定义	(112)
第二节 差温应用中的几个实际问题	(113)
第三节 有关差温的其他问题	(114)
第三章 种植者谈差温(DIF)的应用	(116)
第一节 效果明显、还可节省矮化剂费用	(116)
第二节 需要认真地监测温度	(116)

第三节	立体栽培要注意温度梯度	(118)
第四节	强的负差可以获得更佳品质	(117)
第五节	差温不能完全取代矮化剂	(118)
第六节	因地制宜、因时制宜	(118)
第七节	循序渐进, 逐步推广	(119)
第四章	植物生长发育及开花最适温度的选择	(119)
第一节	温度影响曲线	(119)
第二节	温度的促进作用	(121)
第三节	温度对花分化的影响	(122)
第四节	株高、发育速度与开花的综合调控	(123)
第五章	模型图在生产上的应用	(125)
第一节	生长模型图概述	(125)
第二节	模型图的制作和使用	(126)
第三节	种植者应用图表法的实例	(128)
第三篇 研讨篇 温室光热环境研究与花卉的生长发育		
第一章	温度与花卉的生长发育	(131)
第一节	昼夜温差对温室花卉影响的研究动态	(131)
第二节	预测一品红茎伸长的昼夜温度数学模型	(134)
第三节	现蕾至开花阶段温度对百合发育速度及植株形态的影响	(140)
第四节	设施环境温度对一串红节间长度的影响	(143)
第二章	温室光热环境研究	(146)
第一节	双屋面温室中直射光分布的模拟分析方法	(146)
第二节	地热温室效应温度调控对策	(151)
附表		(157)

第一篇 基础篇

温室气候学基础

第一章 光照

太阳辐射穿过大气层达到地表,是温室的唯一自然光源。温室内的太阳辐照度与温室外太阳辐照度相关显著。与室外相比较,室内光明显的差异表现在数量减少、光质改变及光分布的不均匀性等三个方面,从而形成独特的温室光环境。当温室自然光照不能满足作物的特定要求时,尚需人工补光。

第一节 太阳辐射

一. 辐射定义与常用定律

电磁辐射指以电磁波或粒子形式发射、传递与吸收的能量。太阳辐射包括紫外辐射、可见光辐射和红外辐射。是电磁波辐射中的一小部分。在同一种介质中,辐射传播速度是常数。波长定义为波列上连续两个相同位相点之间的最短距离。通常用纳米(nm)表示。1 纳米(nm)=0.001 微米(μm)。频率定义为一秒钟之内通过一点的波数或电磁辐射在一秒钟传播距离之内的波数。。波长、频率、传播速度三者关系如下:

$$\lambda = c / \nu \dots\dots\dots (1.1)$$

式中: λ —波长;

c —光速在真空中为 $3.00 \times 10^8 \text{ms}^{-1}$;

ν —频率

常用辐射定律:

1. 斯蒂芬定律(Stefan's Law)

绝对温度为 T_1 的黑体,放入绝对温度为 T_2 的密闭器内,其得到或失去的数量由下式决定:

$$\Delta E = \sigma(T_1^4 - T_2^4) \dots\dots\dots (1.2)$$

式中 σ 是一个常数,其值为 $5.67 \times 10^{-8} \text{瓦} \cdot \text{米}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ 。

斯蒂芬定律的另一种表述形式是:“处于绝对温度零度以上的物体,都在不停的发射热辐射。黑体发射的辐射通量密度 I 是它的绝对温度四次方的函数”。

$$I = \sigma T^4 \dots\dots\dots (1.2a)$$

当物体不是理想的黑体时,辐射量要乘以物体的发射率 e , e 介于 0-1 之间。例如,温度为 T^{leaf} 的叶片,辐射的红外线通量为:

$$I = 2e_{\text{ir}}\sigma(T^{\text{leaf}})^4 \dots\dots\dots (1.2b)$$

e_{ir} —叶片的红外发射率;乘以 2 是因为叶子有上下两个表面。

斯蒂芬定律可以很好地解释温室内叶片温度与室内气温可能存在的显著差异。例如,夜间相对温暖的叶片与冰冷的玻璃屋面之间的净辐射,可能导致叶温低于周围空气温度。

常温下黑体发射率见表 1。地表、农田、绿色植物及某些物体的发射率见表 2。

表 1 黑体辐照度表(0~46℃)

K	℃	Wm-2	K	℃	Wm-2	K	℃	Wm-2	K	℃	Wm-2
273	00	314.9	285	12	374.1	297	24	441.1	309	36	517.1
274	01	319.6	286	13	379.3	298	25	447.1	310	37	523.8
275	02	324.3	287	14	384.7	299	26	453.2	311	38	530.6
276	03	329.0	288	15	390.1	300	27	459.2	312	39	537.5
277	04	333.8	289	16	395.5	301	28	465.4	313	40	544.4
278	05	338.6	290	17	401.0	302	29	471.6	314	41	551.4
279	06	343.5	291	18	406.6	303	30	477.9	315	42	558.5
280	07	348.5	292	19	412.2	304	31	484.2	316	43	565.6
281	08	353.5	293	20	417.9	305	32	490.6	317	44	572.8
282	09	358.6	294	21	423.6	306	33	497.1	318	45	580.1
283	10	363.7	295	22	429.4	307	34	503.6	319	46	587.4
284	11	368.8	296	23	435.2	308	35	510.2			

表 2 各种物体表面短波辐射的反射率、长波辐射发射率或吸收率

表 面	短波反射辐射 (0.3~2.5μm 300~2500nm)	长波发射率及吸收率 (>2.5μm >2500nm)
理想黑体	0	1.00
冰雪表面	0.69	—
雪面上有冰屑	0.67	0.89
纯净白雪	0.87	0.82
干沙地表	0.18	0.90
湿沙地表	0.09	—
潮湿地表,70%~95%裸地	0.11	0.95
干燥耕地	0.23	—
干草地	0.32	—
农田作物层或灌木林	0.40	0.90
黄熟作物田或枯黄灌木林	0.30	0.70
燕麦叶片	0.50	0.96
白纸	0.75	0.95
白色塑料	0.93	0.91
红砖	0.45	0.92
混凝土	0.40	0.88
白色涂料(在铝板上)	0.80	0.91
黑色涂料(在铝板上)	0.04	0.88

2. 维恩位移定律(Wien's Displacement Law)

物体发射的最大波长 λ 与辐射体的绝对温度的关系是:

$$\lambda = \frac{\text{常数}}{T (K)} \dots\dots\dots (1.3)$$

式中常数 = $3.6 \times 10^6 \text{ nm} \cdot \text{K}$ 。

该定律是根据布朗克辐射分布公式(Planck's radiation distribution)导出的。布朗克公式表明单位波长的量子通量密度与 $\lambda^{-4} / (e^{hc/\lambda kT} - 1)$ 成比例。式中: λ 为波长; T 为绝对温度; k 为波兹曼常数, $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ 。将布朗克公式对 λ 求导数, 令导函数为零, 得到维恩位移定律。公式 1.3 表明, 发射的最大波长是辐射体温度的函数。如果物体的性质是一个完全辐射体或“黑体”, 理论光谱强度即可计算出来。太阳可以被认为是一个黑体, 它的表面温度约 5800K。根据维恩定律

$$\lambda = \frac{3.6 \times 10^6 \text{ nm} \cdot \text{K}}{5800 \text{ K}} = 620 \text{ nm}$$

太阳光谱的范围大约是 300~3 000 微米。

3. 兰伯特余弦定律(Lambert's Cosine Law)

“单位辐射表面向随意方向发射的辐射强度(单位立体角通量)与该面的法线和辐射方向之间夹角的余弦成正比”。

让我们考虑兰伯特定律应用于温室地表水平接受面的情况。设 γ 表示辐射平行光线与 S 面法线间的夹角。如果 I_0 是单位垂直面 S_n 上的光线强度, 而 I 是单位表面 S 上的通量密度, 则根据兰伯特定律

$$\frac{I}{I_0} = \cos \gamma \dots\dots\dots (1.4)$$

式中 γ 表示天顶距。

根据日地几何学, 角 h 是太阳在地平线上的高度角。天顶距 γ 是高度角的余角。这样, 对于入射到一个水平面上太阳高度为 h 的辐射通量密度为:

$$\frac{I}{I_0} = \sin h \dots\dots\dots (1.4a)$$

4. 基尔霍夫定律

受到辐射的某种“灰体”, 吸收、反射和透射该辐射的一部分。令 α 、 r 、 t 分别表示某一特定波长 λ 的吸收率 $a(\lambda)$, 反射率 $r(\lambda)$ 和透射率 $t(\lambda)$, 则

$$a(\lambda) + r(\lambda) + t(\lambda) = 1 \dots\dots\dots (1.5)$$

短波辐射在特定物体表面(如叶片、温室玻璃面)的吸收率、反射率、透射率的大小, 取决于太阳的位置(太阳高度角、方位角) 物体表面对于入射辐射的角度以及构成该物体的材料。

二、辐射分类及光谱

1. 直接辐射与散射辐射

太阳辐射到达温室外表面的全部能量包括直接辐射和散射辐射两部分。常用术语解释如下:

太阳直接辐射: 来自太阳圆面的立体角内, 投向与该立体角轴线相垂直的面上的太阳辐射, 主要含有未经散射和未经反射的太阳辐射, 单位为 Wm^{-2} 。用直接日射表测量。

太阳散射辐射: 来自整个半球(除太阳圆面的立体角外)的向下散射和反射的太阳辐射。单位为 Wm^{-2} 。可用带有遮光片(环)的总辐射表来测量, 或由总辐射减去直接辐射计算而得。

太阳总辐射: 来自太阳圆面的立体角的太阳辐射, 包括从太阳直接投射到地面上的太阳直接辐射与经过大气散射后到达地面的散射辐射之总和。单位为 Wm^{-2} , 可用总辐表(又称日射表)测量。

2. 辐射光谱

全部太阳辐射的波长范围约自 300 纳米至 3,000 纳米(0.3~3.0 微米), 称为短波辐射。其中有一半以上的红外辐射(约 52%)波长大于 700 纳米。以辐射热的形式为植物生长发育提供热源。

400~700 毫微米的波段称为可见光区。Wess(1985)在美国 Nebraska 进行测试表明, 当天顶角 $< 80^\circ$ 时, 各种天空条件所测定的可见光与太阳总辐射之比近似为 0.46 的常数(Szeicz 1974 年在英国的测试的比值为 0.5)。

植物正常生长发育所需的辐射谱段, 即辐射的植物生理有效区的波长范围, 称为生理辐射或光合有效辐射。这个辐射谱段保证植物的最重要的生理学过程如光合作用、光周期现象等。光合有效辐射的波段大体上等同于可见光区, 但比可见光谱略广一些, 即 380~710nm。各种波段的定义和特性见表 3。

表 3 各种波段的定义和特性

颜色	波段 (nm)	中心波长 (nm)	频率 ($\times 10^{14}\text{Hz}$)	能量 (kJ/mol)
紫外	低于 400	254	11.80	471
紫光	400~425	410	7.31	292
蓝光	425~490	460	6.25	260
绿光	490~560	520	5.77	230
黄光	560~585	570	5.26	210
橙光	585~640	620	4.84	193
红光	640~740	680	4.41	176
红外	740 以上	1400	2.14	85

三、太阳辐射的计量单位

在研究温室植物光环境时,可以采用三类常用的测试手段来测量光的通量。这三种仪器一是辐射表测定辐射通量;二是量子传感器 测量光量子通量;三是照度计 用来测量光通量,与人眼视觉有关;现依据国际标准,分别介绍这三种单位制:

1. 用能量单位表示太阳辐射

能量单位表示辐射的常用术语有:

辐射能通量:单位时间来自辐射源的辐射总量。单位:瓦(W即 $\text{J} \cdot \text{s}^{-1}$)

辐射强度:在给定方向上单位球面角内,离开点的辐射源的辐射通量。单位:瓦/球面度($\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$)。

辐射度:单位面积上入射的辐射通量,可以用日射表、总辐射表测量。单位:瓦/米²($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)。过去曾用非国际标准的卡/厘米²·分($\text{Cal cm}^{-2} \text{min}^{-1}$)表示。

$$1 \text{ cal cm}^{-2} \text{min}^{-1} = 697.8 \text{ 瓦/米}^2$$

辐照量:辐照度与其持续时间的乘积。单位:焦耳/米²($\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$)或兆焦耳/米²($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$)。

光合辐照度(PI, Photosynthetic Irradiance):指光合有效辐射的辐照度,可以用有效生理辐射仪、光合辐照度传感器测量。理想的传感器应仅在 400~700nm 波长范围敏感,且光谱响应一致。单位为 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

分光辐照度是指某一给定波长范围内,单位波长(纳米)的辐照度。某一波段的辐照度即为该波段内各波长辐照度的积分,单位为瓦/米²·纳米($\text{Wm}^{-2}\text{nm}^{-1}$)。可用分光日射表进行测量。

2. 用量子表示太阳辐射

辐射具有波粒二象性,即除了具有波动性外,还有其粒子性。光线由不连续的粒子组成,称为光子(photon)或量子(quantum)。每一个量子携带的能量为:

$$E_{\lambda} = h\nu = hc / \lambda \quad (\text{单个量子为基础}) \dots\dots\dots (1.6)$$

式中 E_{λ} 是波长为 λ 的单个量子所具有的能量,下标 λ 表明强调特定波长。

h —Planck 常数 6.626×10^{-34} 焦耳·秒($\text{J} \cdot \text{s}$)

此外,经常用到的还有数量为 N 的量子($N = 6.022 \times 10^{23}$,即阿伏加特罗常数)所携带的能量。

$$E_{\lambda} = N h \nu = N h c / \lambda \quad (\text{摩尔为基础}) \dots\dots\dots (1.6a)$$

例如波长为 460 纳米(蓝色光)的光波,频率为 5.52×10^{14} 赫芝(见表 1.1)。根据公式 1.6a 计算,1 摩尔量子所具有的能量为:

$$\begin{aligned} E_{\lambda 460} &= (6.022 \times 10^{23} \text{mol}^{-1})(6.626 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}) \\ &\quad (5.52 \times 10^{14} \text{s}^{-1}) = 260 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1} \end{aligned}$$

即每摩尔 460nm 的光量子具有 260 千焦的辐射能。

光合量子通量密度(PPFD, Photosynthetic Photon Flux Density):指光合有效辐射中的量子通量密度。它表示单位时间单位面积上,在 400~700 nm 波长范围内入射的光量子数。该物理量可以通过余弦量子传感器(如 Li-190SB、Li-192SB、Li-191SB)进行测量。单位为: $\mu\text{Es}^{-1}\text{m}^{-2}$ 、 $\text{Es}^{-1}\text{m}^{-2}$

或: $\mu\text{mols}^{-1}\text{m}^{-2}$ 、 $\text{mols}^{-1}\text{m}^{-2}$

3. 可见光的光度表示法

常用的术语和单位:

光通量: 指人眼能感觉到的辐射量, 代表单位时间由辐射源放射具有标准视觉响应的辐射总量, 单位为流明(lm)。

发光强度: 由辐射源在给定方向上单位立体角内放射的光通量, 单位为坎德拉(cd)。1 cd = 1 lm · sr⁻¹。依光度学定义, 当频率为 540×10^{12} Hz (相当于 555nm 波长) 的单色辐射源, 在给定方向上的辐射强度为 1 / 683 W · sr⁻¹, 称为 1 cd。从而建立起光度单位与辐射单位的联系。

照度(即光通量密度 Flux Density): 单位面积上入射的光通量。单位为 lx 勒克斯, 1 lx = 1 lm · m⁻²。可用照度计或 Li-210SB 传感器测定。

第二节 温室自然光环境

温室内的自然光随室外太阳辐射的变化而变, 并形成了自己独特的自然光环境。其特征表现在光照强度、光照分布、光质、散射光比率以及光照时数等方面。

一、温室采光量的计算

透进温室的光量不仅与温室内植物的光合作用有直接关系, 而且与构成温室内的气温、湿度等环境条件的关系也很密切, 透光量的时间和空间分布与温室的结构、形式、建筑方位、覆盖材料的透光特性、太阳的位置、气象条件等有复杂的函数关系。

1. 温室平均光透射率

设定室外的总辐射自然光强为 I_0 , 则透过采光屋面进入温室的光强 I 为:

$$I = I_0 \tau \quad \dots\dots\dots (1.7)$$

τ 为温室光透射率

温室光透射率 τ 可以分为直射光透射率 τ_z 与散射光透射率 τ_s 两部分。即:

$$\tau = \tau_z + \tau_s \quad \dots\dots\dots (1.8)$$

2. 散射光透射率

通常情况下, τ_s 取决于覆盖材料的种类、温室的结构形式及尘染情况, 而与栋方位、季节和时间无关。 τ_s 除尘染外, 对一定的温室可看作为一个常数。

一般情况下, 温室散射光透射率可由下式确定

$$\tau_s = \tau_{s0} \cdot (1-r_1) \cdot (1-r_2) \cdot (1-r_3) \quad \dots\dots\dots (1.9)$$

式中: τ_{s0} —干洁覆盖材料对散射光的光透射率, 见表 4。当屋顶面倾角较大时应折减 2%~3%;

r_1 —温室构架、设备等不透光材料的遮光损失。一般大型温室不超过 5%, 小型温室不超过 10%, 连栋温室比同类结构的单栋温室降低 4%~5%;

r_2 —覆盖材料因老化造成的光透射率损失;

r_3 —水滴和尘染的透光损失。一般水滴透光损失可达 20%~30%,尘染可达 15%~20%。

表 4 覆盖材料散射光透射率

材 料	厚 度(nm)	散射光透射率
普通平板玻璃	3	0.82
普通平板玻璃	5	0.78
钢 化 玻 璃	0.6~1.0	0.78
F R P 板	0.8~1.0	0.75

3.直射光透射率

直射光透射率主要由投射光线的入射角 α 及玻璃屋面在入射角为 α 时的透射率 τ_α 决定。

第一步先求直射光在采光屋面上的入射角 α 。入射角 α 与温室方位、屋面倾角以及太阳高度角、方位角,有着密切的关系。求入射角 α 的计算步骤如下:

(a)求水平表面上的太阳高度角及方位角 太阳高度角 h 及太阳方位角 ω 的计算公式如下:

$$\sin h = \sin \Phi \cdot \sin \delta + \cos \Phi \cdot \cos \delta \cdot \cos w \quad \dots\dots\dots (1.10)$$

$$\sin \omega = \cos \delta \cdot \sin w / \cos h \quad \dots\dots\dots (1.10a)$$

式中: h —太阳高度角(度)

ω —太阳方位角(度)

Φ —地理纬度(度)

δ —赤纬(度)

δ 近似计算式如下: (赤纬的精确值参见表 5)

$$\delta = 23.45 \sin [360^\circ (248+n) / 365] \quad \dots\dots\dots (1.10b)$$

n 为一年中的第几天,可按给定的月、日代入下式求解:

$$\text{对于平年 } n = \langle (275M+9) / 12 \rangle - 2 \langle (M+9) / 12 \rangle + D - 30 \quad \dots\dots\dots (1.10c)$$

$$\text{对于闰年 } n = \langle (275M+9) / 12 \rangle - \langle (M+9) / 12 \rangle + D - 30 \quad \dots\dots\dots (1.10d)$$

$\langle \quad \rangle$ 表示取整数值。如 $\langle 17.835 \rangle = 17$

M —月份

D —日期

w —时角(度)

$$w = 15t$$

$$t = |H - 12|$$

t —方位时间,以真太阳时正午 12 时为 0°

H —计算过程选用的时刻,以 24 小时制表示

表 5 太阳赤纬逐月变化表

格林威治民用历 月 日期	太阳赤纬 (度)	格林威治民用历 月 日期	太阳赤纬 (度)
1 月 -9.25	-23.4433	7 月 9.75	22.3543
0.75	-23.0766	19.75	20.8380
10.75	-21.9446	29.75	18.7375
20.75	-20.1019	8 月 8.75	16.1243
30.75	-17.6333	18.75	13.0797
2 月 9.75	-14.6429	28.75	9.6898
19.75	-11.2441	9 月 7.75	6.0430
3 月 9.75	-7.5520	17.75	2.2292
11.75	-3.6787	27.75	-1.6600
21.75	0.2683	10 月 7.75	-5.5299
31.75	4.1866	17.75	-9.2815
4 月 10.75	7.9775	27.75	-12.8105
20.75	11.5454	11 月 6.75	-16.0074
30.75	14.7971	16.75	-18.7600
5 月 10.75	17.6424	26.75	-20.9589
20.75	19.9963	12 月 6.75	-22.5045
30.75	21.7829	16.75	-23.3227
6 月 9.75	22.9407	26.75	-23.3663
19.75	23.4285	36.75	-22.6309
29.75	23.2294		

(b)求太阳辐射光线对倾斜面(温室采光屋面)的入射角及透射率

第一步先求太阳辐射投向温室外表面直射光线入射角 α

直射光线入射角 α 的求算过程如下:

$$\cos \alpha = \sin h \cdot \cos \theta + \cos h \cdot \sin \theta \cdot \cos(\omega - \psi) \dots\dots\dots (1.11)$$

式中: α —入射角(度)

h —太阳高度角(度)

ω —太阳方位角(度)

θ —采光面与水平面的夹角(屋面倾角)(度)

ψ —采光面的方位角(度)正南为 0° ,顺时针为正,逆时针为负

第二步 求玻璃屋面对直射光线的透射率。

投射光线的入射角 α 确定后,直射光透射率可由下式确定

$$\tau_z = \tau_a \cdot (1-r_1) \cdot (1-r_2) \cdot (1-r_3) \dots \dots \dots (1.11a)$$

式中: τ_a —玻璃干洁覆盖材料在入射角为 α 时光透射率,入射角 α 根据公式 1.11 由太阳高度角、栋方位以及屋面倾角决定。 r_1, r_2, r_3 的定义同散射光透射率

下面以干洁玻璃为例,讨论在入射角为 α 时的光透射率。光透射率 τ_a 由光线多次反射透过玻璃后的透射率(反射透射率) τ_r 及穿越玻璃被玻璃吸收后的透射率(吸收透射率) τ_b 两部分组成,计算步骤如下:

(a) 干洁玻璃的反射透射率
$$\tau_r = \frac{1-R}{1+R}$$

式中: R —玻璃表面反射率, R 随入射角而变

$$R = \frac{1}{2} \left[\frac{\sin^2(\alpha - r)}{\sin^2(\alpha + r)} + \frac{\tan^2(\alpha - r)}{\tan^2(\alpha + r)} \right] \dots \dots \dots (1.12)$$

式中: α —入射角

r —折射角

折射角 r 的求算:
$$\sin r = \frac{\sin \alpha}{n}$$

n —折射率,普通玻璃取 1.52

(b) 干洁玻璃的吸收透射率
$$\tau_b = e^{-KL} \dots \dots \dots (1.12a)$$

式中: K —消光系数,普通玻璃取 0.1-0.3/cm

L —在玻璃内光线通过的实践路程,当入射角 = 0° (光线垂直入射) 时 L 等于玻璃厚度

$L = \text{玻璃厚度} / \cos r$

(c). 干洁玻璃的直射光总透射率
$$\tau_a = \tau_r \cdot \tau_b \dots \dots \dots (1.13)$$

式中: τ_r —光线经多次反射损失后的透射率

τ_b —光线经玻璃吸收损失后的光透射率

二、遮阴分布及其影响因素

遮阴的平面和空间分布,除太阳高度角、天气等自然因素外,主要由温室的方位角、屋面的角度、覆盖材料的散射特性及作物的叶面积指数和叶片倾角等群体结构决定。

1. 温室的方位与屋面角度

冬季太阳高度低,东西向水平结构材料所造成的阴影在一天之内移动不大。东西向单栋玻璃温室在直射光下日总量平均光透射率虽然较南北向高,但由于屋脊天沟等主要水平结构为东西向,在温室内将造成一条条阴影弱光带。侧墙垂直结构和屋面南北向水平结构材料,其阴影将随太阳方位的变化而移动,对于直射光日总量光透射率在床面分布的不均匀性影响不大。东西向单栋温室可以调整屋面角度使屋脊阴影投射到室外。对于东西向连栋温室,为了减小屋脊、天沟的阴影面积率,可采用适当的屋面角度,使屋脊、天沟投射至不种作物的散热器位置。

南北向温室光透射率在床面上的分布是床面中央高,东西侧墙附近低 10%;南面山墙处

光透射率较高,山墙顶面阴影以北逐渐减低 15%~30%。

2. 覆盖材料的散射特性及散射光在床面上的分布

半透明材料使入射光线产生扩散反射及扩散透射,使直射光线分散到很大的立体角范围内形成散射辐射。散射辐射有助于提高床面光照分布的均匀性。

散射光透过率在温室床面的分布,无论在透明玻璃温室,还是在散光性覆盖材料的温室,都是在床面中央部分最大,侧墙或山墙附近低 5%左右,墙角处最低。

散射光主要由顶面向下投射,由侧面入射较少。在侧墙不透明的温室,侧墙附近床面上的散射光透射率减少近 30%,在床面上的分布均匀。连栋温室的散射光透过率比同类结构的单栋温室低约 5%。

三、温室光透过率的模拟

1. 实验模拟

据模型计算,中高纬度地区冬季东西栋的下射光床面,平均光透射率较南北低 5%~20%。栋越长,纬度越高,差异越显著。春秋季节这种差异减少。藏田宪次(1993)利用模型试验研究了温室方位和地理纬度对太阳直射光透过率的影响。他认为,直射光对东西栋而言,无论连栋数多大,其夏至时光透过率均可看为定值,即 66%~77%。相反,冬至时东西单栋温室光透过率随纬度的增高而增大,55°N 地区光透过率 86%,而东西连栋,南北单栋及连栋都低于 40%,连栋温室直射光透射率在大于 15°N 地区内随纬度的增高而减少。尽管不同温室类型间的差异,在很大程度上取决于纬度高低,但光透射率大小仍可按以下顺序排列:

冬季:东西单栋 > 东西连栋 > 南北单栋 > 南北连栋

夏季:南北单栋 > 南北连栋 > 东西连栋 ≈ 东西单栋

2. 计算机模拟

用于分析温室内光环境的数学模式。其主要内容多数属于几何光学方面的问题,因为实际编制计算程序必须考虑到相当复杂的几何学关系。数学模式首先是 Nisen(1962 年)开始研究的。但到目前为止,甚少见发表过正式考虑温室内存在植物的模式,也未考虑周围建筑物的影响。但就温室的选型来说,数学模式应能满足求解温室地面上平均日射量的时间变化就可以了。

计算机模拟分为输入数据、数学模式以及输出数据三个模块。输入数据是指输入数学模式求算温室内光量所要求的参数,包括覆盖材料物理、光学特性资料;室外日射量时空参数及有关温室结构的数据资料。

输出数据则根据最终的使用目的,利用数学模式模拟有关温室光环境的数据。例如,评价不同类型温室的采光效果,温室内的相对受光量等。

目前,数学模型的输出一般取地面上水平相对受光量。实际上对光合产量以及加热负荷的计算所需要的数据也主要是植物或地面入射、反射和吸收的日射量。温室内床面的日射量表示温室内的光环境,可以说是一个有效且基本的指标。

曹永华等(1992),应用计算机模拟技术,研制了适合我国不同温室光环境分析的辅助设计软件 GRLT,可用于分析太阳直射辐射在温室内的时空分布,并能确定出最佳采光的温室结构。GRLT 可在 MS-DOS3.3 以上操作系统支持下,在 386、286 和 IBM-PC/XT 及其兼容机上运行。它是温室采光优化设计的一种辅助工具。孙忠富等(1993)进行了北京地

区典型日光温室直射光环境的模拟与分析,将温室采光屋面分成足够多的小折面,通过数学模型根据与辐射方向垂直的辐射强度、辐射透过率,小折面在地上投影长度等求达到温室地面上的辐射通量的精确解。上述工作为温室优化设计做出了贡献。

四. 温室内光质及日照时数

1. 温室内光质的改变

由于各种覆盖材料的光谱特性不同,对各个波段的吸收、反射和透射能力存在差异,致使透射温室的光谱有很大的差异。在相同的辐射能量下,光谱不同,对作物生长的有效性是不同的。

用于温室覆盖的材料主要有玻璃、玻璃纤维聚脂板(FRP板)、玻璃纤维丙烯酸树脂板(FRA板)、聚氯乙烯薄膜(PVC)以及聚乙烯薄膜(PE)等。玻璃对可见光部分及近红外与 $2.5\mu\text{m}$ 以内的红外部分透光率高,不透过 $4.5\mu\text{m}$ 以上的长波红外线。玻璃基本不透过紫外线,FRP板与玻璃一样,紫外光透过率低。FRA板紫外光透过率相当高。其余波段的透过率与玻璃相似。

聚乙烯、聚氯乙烯薄膜光透射率对于可见光部分均为90%左右。紫外部分聚乙烯薄膜透过率高。在近红光到 $5\mu\text{m}$ 的红外部分二者透射相似。对 $5\sim 25\mu\text{m}$ 的远红外辐射,聚乙烯薄膜的透射率远比聚氯乙烯薄膜为高。醋酸乙烯薄膜的透射特性居中。

2. 日照时数

(1)计算方法 在气象学中,日出至日落的时间称之为日照时数。在日出之前与日落之后的相当一段时间内,由于天空、云等的反射已形成了具有一定光强的曙暮光,对植物光周期已起着控制作用。在研究植物的光周期时,我们把一天中对植物产生光周期反应的时间称为光照时间 T ,即

$$T = T_{\text{日照}} + T_{\text{曙暮}} \dots\dots\dots (1.14)$$

式中: $T_{\text{曙暮}}$ ——对作物能产生光周期效应的一般曙暮光时间(小时)。一般为 22Lx 、最低为 $10\sim 3\text{Lx}$ 。曙暮光的光照强度与太阳高度、云况有关。

$T_{\text{日照}}$ 与地理纬度、季节、日期有关。

(2)光周期补光 在短日条件下,长日照植物可以采用人工光源延长白昼或打破长夜,从而获得必要的光周期诱导。温室作物如使用白炽灯,在植物冠层投射 $70\sim 100\text{Lx}$ 的照射,足可以起到长日效果。若采用其它电灯做光源,光照度应适当加强一些。产生光周期效应的电光源,按有效性强弱排列如下:

白炽灯 > 高压钠灯 > 金属卤化物灯 = 冷白色荧光灯 = 低压钠灯 > 汞灯。

(3)光周期遮光 为造成短日条件,需要延长暗周期。通常在清晨 $5\sim 8$ 时给作物覆盖遮光材料。具体做法可以根据作物品种、光照要求等选择黑色塑料薄膜或黑布等。下午到黄昏的遮光会带来热量郁积在作物周围的副作用。解决的办法是尽量推迟开始遮光时间,一般推迟到下午 $7\sim 8$ 点钟,直到次日早晨 $8\sim 9$ 点钟再揭开。另外也可以待天黑后除去遮光材料使热气散掉,次日曙光出现前再盖上遮光材料。