

日光温室内各表面太阳辐射照度的模拟计算

佟国红^{1,2,3} 李保明^{1,2}

(1. 中国农业大学 水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 农业部设施农业生物环境工程重点开放实验室, 北京 100083;
3. 沈阳农业大学 水利学院, 沈阳 110161)

摘要 建立了温室内各表面太阳辐射照度计算模型, 并对沈阳地区跨度为 12 m 的日光温室进行模拟, 分析了温室建筑参数改变对温室内各表面太阳辐射照度的影响。结果表明: 冬季最冷月(2003~12 至 2004~02) 温室内后坡单位面积太阳辐射照度分别为土壤表面及后墙面的 1.45 和 1.49 倍; 温室地面太阳辐射照度模拟结果与实际测试结果差值不超过 5%。改变温室跨度和高度分别对地面及北墙面太阳辐射照度有较大影响, 且呈线性关系; 改变温室后坡仰角对温室内各表面太阳辐射照度的影响不显著。

关键词 日光温室; 太阳辐射照度; 计算模型; 测试

中图分类号 S 625.1

文章编号 1007-4333(2005)06-0061-05

文献标识码 A

Simulation of solar radiation on surfaces of a solar greenhouse

Tong Guohong^{1,2,3}, Li Baoming^{1,2}

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. Key Lab of Bioenvironmental Engineering, Ministry of Agriculture, Beijing 100083, China;

3. College of Water Conservancy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China)

Abstract A mathematical model for solar radiation on the surfaces of a solar greenhouse was proposed and the heat transfer of a solar greenhouse with 12 m span in Shenyang was simulated by above model. The simulated results showed that the solar radiations on the north roof surface in the coldest months (from December to February) were 1.45 and 1.49 times of that on the ground and north wall surfaces respectively and the values of solar radiation on the ground from the simulation and the experiments agreed well and the error between them was not more than 5%. The analytical results for influence of the building parameters on solar radiation to the surfaces of a solar greenhouse showed that the changes of span and height could obviously alter solar radiation intensity on the ground and north wall and their relationship indicated a linear one; while the alteration of north roof angle had a little influence on solar radiation intensity inside the greenhouse.

Key words solar greenhouse; solar radiation intensity; mathematical model; experiment

最大限度获得太阳能是日光温室设计的关键问题, 采光面材料、形式以及建筑参数等均影响温室对太阳辐射的获取。国外对温室内光环境及其影响因素已有较多研究^[1~9], 其中英国学者 Critten 对温室的透光率、结构构件在直射光及散射光条件下对室内透光量的影响以及温室几何形状、长度对室内透光量的影响等进行了系统研究^[1~6], Rosa 计算了朝向对室内透光量的影响^[7], Pieters 和 Deltour 计算了薄膜、作物、土壤吸收的太阳辐射量并考虑了玻璃框、采光面上的冷凝等因素对室内透光量的影

响^[8~9]; 但这些研究均是针对单栋或连栋全光温室的。我国的日光温室在建筑及结构形式上不同于国外全光温室, 因此不能直接使用上述研究成果。目前, 我国日光温室光环境研究的主要方法为, 经实地测试获得温室采光量^[10], 温室采光面剖面曲线用数学曲线表示然后模拟计算温室内各表面直射光透过量^[11~14], 基于计算固体表面间辐射换热的代数方法计算各表面散射光透过量^[15]等。以上方法在计算温室内直射光透过量时需运行计算机程序, 计算结果虽精确但方法繁琐。笔者拟利用本文中建立的模

收稿日期: 2005-04-09

基金项目: 北京市教育委员会共建项目建设计划资助项目(XK100190550)

作者简介: 佟国红, 硕士研究生; 李保明, 教授, 博士生导师, 通讯作者, 主要从事设施农业生物环境工程研究, E-mail: libm@capitalfarmer.net

型,在已知温室外水平面太阳辐射照度的前提下,将室外水平面太阳辐射照度直、散分离^[16-17],定量计算温室内各表面的太阳辐射照度,以简化计算,并运用此模型分析建筑参数变化对温室内各表面太阳辐射照度的影响,拟为温室设计、温室内热量变化预测和温室环境控制提供参考。

1 计算模型

1.1 室外水平面太阳辐射照度的直散分离

采用不同晴朗系数下水平面太阳日总散射辐射照度与总辐射照度的关系公式^[16]将室外水平面太阳辐射照度进行直、散分离。晴朗系数

$$K_h = I_h / I_0 \quad (1)$$

式中: I_h 和 I_0 分别为地面水平面和大气上界水平面日总辐射照度, W/m^2 。当 $0.17 < K_h < 0.80$ 时,

$$I_d / I_h = 1.188 - 2.272 K_h + 9.473 K_h^2 - 21.856 K_h^3 + 14.648 K_h^4 \quad (2)$$

式中: I_d 为地面水平面日总散射辐射照度, W/m^2 。

1.2 水平面与倾斜面太阳辐射照度的转换

倾斜面太阳直射辐射、散射辐射及其在地面和周围建筑上的反射值^[17]

$$R_b = I_b / I_b = \cos i / \cos z \quad (3)$$

式中: I_b 和 I_b 分别为水平面及倾斜面太阳直射辐射照度, W/m^2 ; z 和 i 分别为光线在水平面及倾斜面上的入射角, ($^\circ$)。假设天空太阳散射辐射强度各向同性,则

$$R_d = (1 + \cos s) / 2 \quad (4)$$

式中: R_d 为投射到倾斜面的散射辐射照度 I_d 与投射到水平面上的散射辐射照度 I_d 的比值; s 为倾斜面与水平面间的夹角, ($^\circ$)。

太阳直射辐射和散射辐射在室外地面和周围建筑物上的反射系数

$$R_r = [(1 - \cos s) / 2] \quad (5)$$

式中: R_r 为室外地面对太阳辐射的平均反射率,一般为 0.2,有雪覆盖时为 0.6。

1.3 温室内各表面太阳辐射照度

计算温室内各表面太阳辐射照度时,忽略太阳光线透过薄膜时的折射对其方向的影响,不考虑温室内各表面对太阳辐射的反射。

1) 温室内各表面太阳直射辐射照度。图 1 为日光温室剖面示意图。首先计算太阳光线在温室内土壤表面、北墙面、后坡面投影的准确位置^[11-13],然后

计算太阳直射辐射照度的瞬时值和累积值。当太阳高度角小于后坡仰角时,太阳光线洒满土壤表面、北墙面和后坡面,温室内各表面太阳直射辐射照度^[17]

$$I_{b,g} = I_b, \quad I_{b,w} = \frac{\cos w}{\cos z} I_{b,g}, \quad I_{b,r} = \frac{\cos r}{\cos z} I_{b,g} \quad (6)$$

式中: $I_{b,g}$ 、 $I_{b,w}$ 、 $I_{b,r}$ 分别为温室内土壤表面、北墙面及后坡面太阳直射辐射照度, W/m^2 ; w 、 r 分别为太阳光线在北墙面和后坡面的入射角。

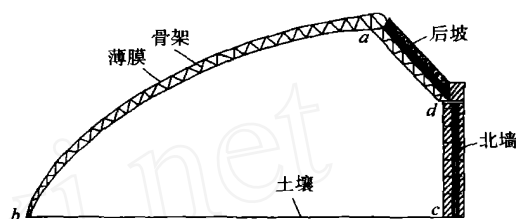


图 1 温室剖面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of greenhouse section

2) 温室内各表面散射辐射照度。散射辐射为漫射辐射,用代数法确定角系数^[17-19]。不考虑前屋面对自身的辐射,假设温室无限长,对于温室各表面长度都相等,所以可用各线段长度代替对应表面面积,即用 l_{ab} 、 l_{bc} 、 l_{cd} 、 l_{ad} 、 l_{bd} 、 l_{ac} 分别表示图 1 中 ab 、 bc 、 cd 、 ad 、 bd 、 ac 的长度,并在角系数计算中代替对应表面面积,所以有

$$\left. \begin{aligned} l_{ab}, l_{bc} &= \frac{l_{ab} + l_{bc} - l_{ac}}{2 l_{ab}} \\ l_{ab}, l_{ad} &= \frac{l_{ab} + l_{ad} - l_{bd}}{2 l_{ab}} \\ l_{ab}, l_{cd} &= \frac{l_{bd} + l_{ac} - l_{bc} - l_{ad}}{2 l_{ab}} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: l_{ab}, l_{bc} 、 l_{ab}, l_{ad} 、 l_{ab}, l_{cd} 分别为采光面对地面、后坡及后墙的角系数。

$$\left. \begin{aligned} I_{d,g} &= I_d \times d \times \left. \begin{aligned} &ab, bc \\ &ab, cd \\ &ab, ad \end{aligned} \right\} \quad (8) \end{aligned} \right\}$$

式中: $I_{d,g}$ 、 $I_{d,w}$ 、 $I_{d,r}$ 分别为温室内土壤表面、北墙面及后坡面太阳散射辐射照度, W/m^2 ; d 为太阳散射光透过率。

3) 温室内各表面辐照量。

$$\left. \begin{aligned} Q_g &= (I_{b,g} + I_{d,g}) A_g \\ Q_w &= (I_{b,w} + I_{d,w}) A_w \\ Q_r &= (I_{b,r} + I_{d,r}) A_r \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中： Q_g 、 Q_w 、 Q_r 分别为温室内土壤表面、北墙面及后坡面太阳辐射量， W ； A_g 、 A_w 、 A_r 分别为温室内土壤表面、北墙面及后坡面面积， m^2 。

2 模拟与分析

2.1 模拟计算与测试结果分析

实验温室位于沈阳农业大学校园内，东西走向，长 60 m，跨度 12 m，脊高 5.5 m，后墙高 3.0 m。温室西半跨为实验小拱棚，东半跨种植叶菜。实验期间温室薄膜已使用 2 年。在室外和温室内中部土壤表面分别放置日射计（EKO，MS-601 和 EKO-020VS，日本），测试水平面太阳辐射照度，周围无遮挡物。传感器连接数据采集器（EKO，CADAC21，日本）进行数据采集和存储，数据采集频率为 1 次/s，每 10 min 记录 1 次。测试时间为 2003-12-11 至 2004-03-31。

取自 2003-12-20 起每隔半月左右晴天 9:00—15:00 温室内外土壤水平面太阳辐射照度测试数据的每小时均值，计算冬季最冷月（2003-12 至 2004-

02）温室内各表面太阳辐射照度。此期间实验温室约 8:00 揭帘，15:30 盖帘。

对室外地面水平面太阳辐射进行直、散分离。影响天空晴朗系数的因素较多，根据式（2），晴朗系数从 0.6~0.8 变化时，太阳散射辐射照度与总辐射照度的比值为 0.2~0.4，这与文献[20]和[21]的结论一致。本文中室外地面水平面散射辐射照度与总辐射照度的比值取 0.2，并认为全天晴朗系数不变。由式（3）~（5）计算到达采光面的太阳直射、散射及总辐射照度，其中散射辐射包括天空散射辐射以及其在室外地面、周围建筑物的反射部分。

模拟日全天太阳高度角小于后坡仰角，从前坡透过的直射光洒满土壤表面、北墙面和后坡面。不考虑采光面曲率对直射光透过率的影响，根据晴天实测数据的统计分析，9:00—15:00，直射光透过率 $= -0.0123t^2 + 0.2914t - 1.1908$ ， t 为此时间段的整小时数。散射光透过率取 0.7^[22]，采用式（7）计算角系数。温室内各表面太阳总辐射照度模拟计算及实验测试结果见图 3。从图 3 模拟值可见，后坡

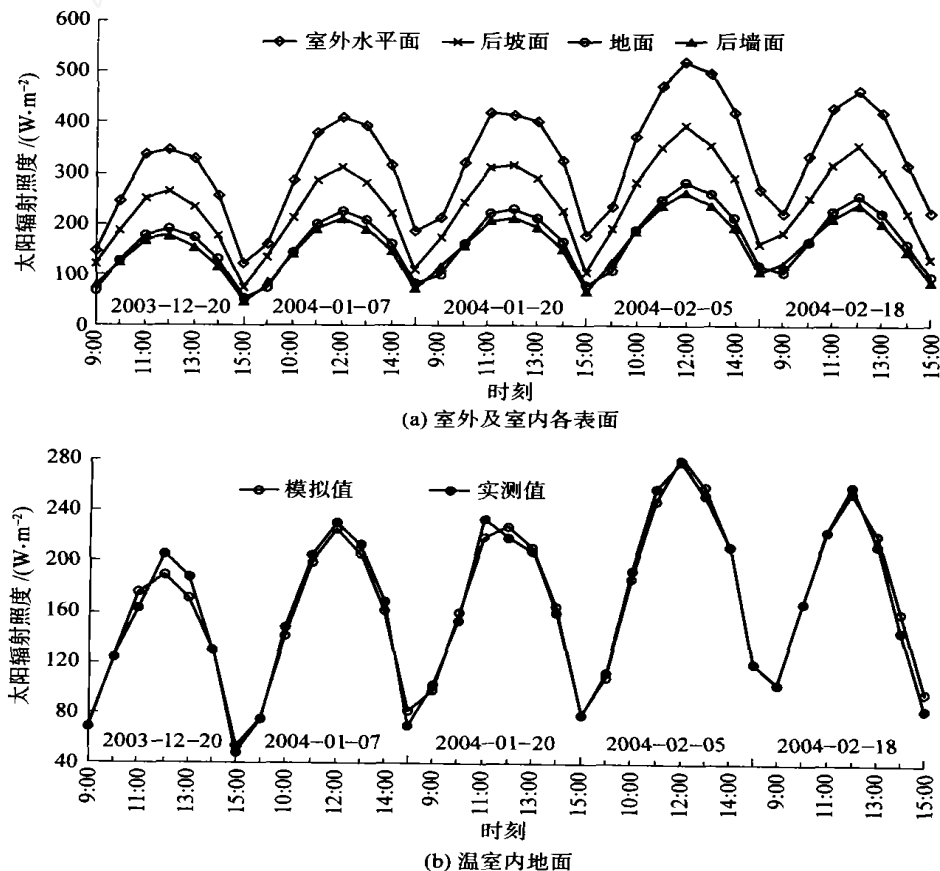


图 2 太阳辐射照度模拟计算结果与实验结果

Fig. 2 Solar radiation intensities from the simulation and the experiment

表面太阳辐射照度均高于其他表面,分别是土壤表面及后墙面的1.45和1.49倍。若考虑单位长度温室全天各内表面所获得的太阳辐照量,在不考虑作物的情况下,土壤表面全天所获得的太阳辐照量占各表面总和的65%,后墙面和后坡面分别占16%和19%,土壤为主要的蓄热体;当室内有作物时,投射到地面被土壤吸收的太阳辐照量与作物种植密度、种类及不同生长阶段有关。因此,温室越冬生产时,增加后坡及后墙的蓄热及隔热,最大限度利用太阳能是温室结构设计中应考虑的问题。

从地面辐射照度模拟值与计算值比较结果(图2(b))看,二者差值基本不超过5%。15:00个别测试数据低于模拟值,误差约10%,可能与当日管理及盖帘情况有关。

2.2 建筑参数变化对温室内各表面太阳辐射照度的影响

以实验温室的建筑参数为参考对象,为便于对比,将前坡面看做单斜面,温室内无作物,模拟时间2004-02-18 T9:00—15:00。建筑参数变化的约束条件是前坡面及后坡面仰角 45° 。

图3所示模拟结果表明,在脊高、北墙高、后坡面长度及后坡面仰角不变的情况下,跨度每增加1 m,温室内土壤表面日均太阳辐射照度增加 13 W/m^2 ,北墙面和后坡面分别减少6和 7 W/m^2 ;若考虑温室单位长度各表面面积(温室单位长度分别乘以各表面宽度,下同),到达后坡面及北墙面的太阳辐照量变化不明显,而土壤表面跨度每增加1 m太阳辐照量增加1300 W。但是实际温室设计中,并不是跨度越大越好,因为跨度大,温室前坡面增大,则其夜间散热量也增大;另外,在有作物的温室中,温室土壤表面获得的太阳辐射照度还与种植密度、作物种类及不同生长阶段有关。只有在前坡夜间保温措施好、作物叶面积指数小的情况下,增加温室跨度才是有利的。

在跨度、北墙高度和后坡水平投影长度不变的情况下,温室后坡仰角的变化对室内各表面太阳辐射照度影响不显著,对后墙面几乎无影响。测试结果显示,后坡面夜间表面温度与温室内空气温度几乎相等,因此试图通过加大后坡仰角增加后坡面太阳辐射照度从而提高后坡蓄热量是没有意义的,这与文献[23]的结论相同。

在温室跨度、后坡长度及仰角不变的情况下,同时提高北墙高度和脊高,结果表明:高度每增加1 m,

土壤表面太阳辐射照度减少 21.0 W/m^2 ,北墙面和后坡面分别增加 17.0 和 4.1 W/m^2 。若考虑温室单位长度各表面面积,北墙和脊高每增加1 m土壤表面太阳辐照量减小250 W,北墙面增加1163 W。北墙是温室夜间热源,增加北墙面太阳辐射照度从而增加北墙蓄热量,可提高温室的热稳定性,对温室冬季生产十分有利。

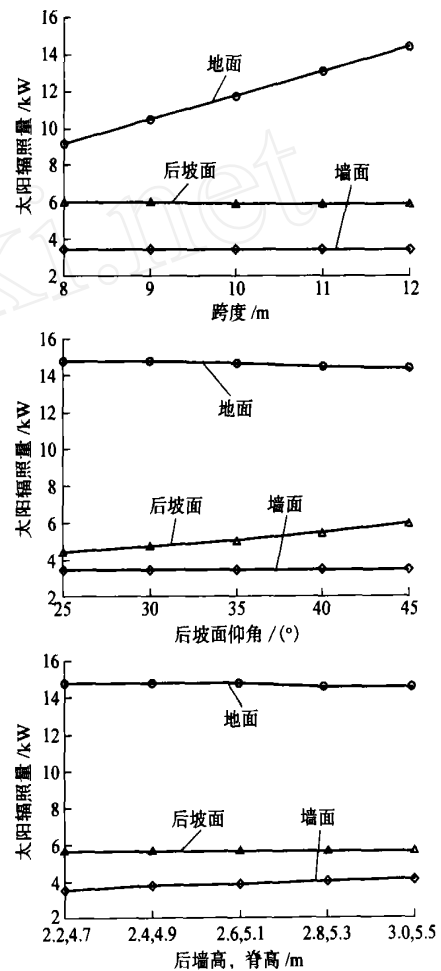


图3 建筑参数变化对室内各表面太阳辐射照量(温室单位长度)的影响

Fig. 3 Influence of building parameters on solar radiation on surfaces of a solar greenhouse (1 m along length)

3 结论

1) 在获得室外水平面太阳辐射照度的情况下,采用本文中计算模型可定量预测日光温室内各表面获得的太阳辐射照度,冬季最冷月的模拟结果与测试结果误差5%,说明了计算模型的可靠性。模拟结果显示,到达后坡面的太阳辐射照度约为总进光量的50%。

2)在脊高、北墙高、后坡长度及仰角不变的情况下,改变温室跨度对土壤表面太阳辐射照度影响较大,跨度每增加1 m,土壤表面太阳辐射照度增加 13 W/m^2 。在跨度、后坡长度及仰角不变的情况下,温室北墙高度和脊高每增加1 m,北墙面太阳辐射照度增加 17 W/m^2 ,温室单位长度北墙面增加 1.163 W 。温室后坡仰角变化对室内各表面太阳辐射照度的影响不显著。

3)温室建筑参数变化对室内各表面太阳辐射照度的影响呈线性关系,温室最佳建筑参数应结合温室种植作物的种类、生产方式、管理方式并结合模拟结果确定。

参 考 文 献

- [1] Critten D L. A computer model to calculate the daily light integral and transmissivity of a greenhouse[J]. J Agric Eng Res, 1983, 28:61~76
- [2] Critten D L. The effect of geometric configuration on the light transmission of greenhouses[J]. J Agric Eng Res, 1984, 29:199~206
- [3] Critten D L. The effect of house length on the light transmissivity of single and multispans greenhouses[J]. J Agric Eng Res, 1985, 32:163~172
- [4] Critten D L. A general analysis of light transmission in greenhouses[J]. J Agric Eng Res, 1986, 33:289~302
- [5] Critten D L. Light transmission losses due to structural members in multispans greenhouses under diffuse skylight conditions[J]. J Agric Eng Res, 1987a, 38:193~207
- [6] Critten D L. Light transmission losses due to structural members in multispans greenhouses under direct light conditions[J]. J Agric Eng Res, 1987b, 38:109~115
- [7] Rosa R, Silva A M, Miguel A. Solar irradiation inside a single span greenhouse[J]. J Agric Eng Res, 1989, 43:221~229
- [8] Pieters J G, Deltour J M. Performances of greenhouse with the presence of condensation on cladding materials[J]. J Agric Eng Res, 1997, 68:125~137
- [9] Pieters J G, Deltour J M. Modeling solar energy input in greenhouse[J]. Solar Energy, 1999, 67:119~130
- [10] 陈端生,郑海山,张建国,等.日光温室气象环境综合研究(三)——几种弧型采光屋面温室内直射光量的比较研究[J].农业工程学报,1992,8(4):78~82
- [11] 吴毅明,曹永华,孙忠富,等.温室采光设计的理论分析方法——设施农业光环境模拟分析研究之一[J].农业工程学报,1992,8(3):73~80
- [12] 曹永华,孙忠富,吴毅明.温室采光辅助设计软件(GRLT)的研制——设施农业光环境模拟分析研究之二[J].农业工程学报,1992,8(4):69~77
- [13] 孙忠富,吴毅明,曹永华,等.日光温室中直射光的计算机模拟方法——设施农业光环境模拟分析研究之三[J].农业工程学报,1993,9(1):36~41
- [14] 孙忠富,李佑祥,吴毅明.北京地区典型日光温室直射光环境的模拟和分析——设施农业光环境模拟分析研究之四[J].农业工程学报,1993,9(2):45~52
- [15] 杜军,王怀彬,杨励单.温室内太阳净辐射分配及计算[J].太阳能学报,2001,22(1):115~118
- [16] Collares-Periera M, Rabl A. The average distribution of solar radiation—correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values[J]. Solar Energy, 1979, 22:155~164
- [17] Tiwari G N. Solar energy fundamentals, design, modeling and applications[M]. Pangbourne(England): Alpha science international Ltd, 2002: 22~26
- [18] 卞伯绘.辐射换热的分析与计算[M].北京:清华大学出版社,1988:75
- [19] 章熙民,任泽霁,梅飞鸣.传热学(新一版)[M].北京:中国建筑工业出版社,1993:217
- [20] Khalil A, Alnajjar A. Experimental and theoretical investigation of global and diffuse solar radiation in the United Arab Emirates[J]. Renewable Energy, 1995, 6:537~543
- [21] 潘锦泉.日光温室优化设计及综合配套技术(一)——专题技术研究成果[J].农村实用工程技术,1999(1):7
- [22] Van den kieboom A M G, Stoffers J A. Light transmittance under diffuse radiation circumstances[J]. Acta Horticulturae, 1985, 174:67~74
- [23] 佟国红,王铁良,白义奎,等.日光温室建筑参数对室内温度环境影响的研究[J].沈阳农业大学学报,2003,34(3):203~206