

日光温室土壤温度分布边际效应的数值模拟

佟国红, 王铁良, 白义奎, 刘文合, 于威, 赵荣飞

(沈阳农业大学 水利学院, 辽宁 沈阳 110866)

摘要:采用 CFD 技术,以 2004 年 2 月 20 日(晴天)及 2 月 21 日(阴天)土壤温度模拟值与试验值对比进行研究,揭示土壤温度沿跨度分布的边际效应特点。结果表明:温室 0.2 m 深土壤温度呈现中部高、两端低,且中部以北降温较大的特点,0.2 m 深土壤温度跨中与北墙 1 m 处温差是跨中与前底脚 1 m 处温差的近 2 倍;模拟显示 0.2 m 深土壤温度距北墙 0.5 m 开始急剧下降,出现明显的边际界点,界点与中部温度相比下降近 3.0℃;与 0.2 m 深跨中土壤温度相比降幅 2℃的点在晴天 13:00 距北墙 2.5 m、23:00 距北墙 1.7 m,阴天 13:00 距北墙 1.4 m、23:00 距北墙 1.1 m,表明阴天土壤温度分布均匀性好于晴天。采用数值模拟的方法有助于了解土壤温度在温室边际区域的详细分布以指导温室建筑在边界处的构造设计。

关键词:日光温室;土壤温度;边际效应;数值模拟

中图分类号:S 155.5⁺4 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2010)15-0065-04

日光温室的长度远远大于其跨度,因此以往研究中通常在温室中部的跨度中间选择测点测试温室热性能^[1-6],测试结果对于评价不同结构日光温室的性能提供了直观的参考数据。由于温室各部分接受及贮存太阳能不同,导致各部分温度分布不均匀。孙治强等^[7]针对 10 m 跨度温室,从南底脚开始每 15 cm 布置一个测点测试 10 cm 深土壤温度,结果表明温室南部温度分布不均匀且与跨中相比存在温度分布边际界点。当温室南底脚设置防寒沟以后,减少了南部土壤的横向热散失,在这种情况下土壤温度分布情况如何成为值得关注的问题,该研究拟采用 CFD 技术模拟土壤内部的温度分布,揭示土壤温度沿跨度方向分布的边际效应特点。

1 材料与方法

1.1 数值模拟

1.1.1 模拟方案 模拟温室为 12 m 跨度日光温室(辽沈Ⅱ型),位于沈阳农业大学校园内。温室为东西走向,长度为 60 m,跨度为 12 m,脊高为 5.5 m,后墙高为 3.0 m。墙体为 600 mm 厚复合异质墙体,由内向外材料依次为 360 mm 红砖墙,50 mm 缀铝箔聚苯乙烯泡沫塑料板,20 mm 空气夹层,50 mm 缀铝箔聚苯乙烯泡沫塑料板,120 mm 红砖墙;后坡由 20 mm 厚松木板、150 mm 聚苯乙烯泡沫塑料板及保温层、防水层组成,共约 200 mm 厚。前屋面为聚氯乙烯多功能膜,夜间前屋面覆盖保温被。在温室南侧前底脚设置 80 cm 深防寒沟,绝热材料为 6 cm 厚聚苯乙烯泡沫塑料板。分别选择冬季晴天、阴天的天气情况,来分析土壤温度分布边际效应特点。

1.1.2 控制方程 控制方程的通用形式为^[8]

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{v} \varphi) = \text{div}(\Gamma \text{grad} \varphi) + S_{\varphi} \quad (1)$$

其中,代表通用变量 ρ 、 \mathbf{v} 、 Γ 、 S_{φ} 等;分别表示密度、速度矢量、广义扩散系数和源项。 φ 为 1 时,该方程为连续方程; φ 为 u 、 v 、 w 时,该方程为动量方程; φ 为 T 时, u 、 v 、 w 为能量方程。分别表示 3 个方向的速度; T 表示温度。

1.1.3 边界条件 该研究采用佟国红等^[9]建立的模拟晴天、阴天温室室内温度环境的模型。模拟时采用的边界条件分别为晴天、阴天室外的气候条件(温度、湿度、风速、太阳辐射)以及温室下面 1 m 深土壤的温度,边界条件中考虑了温室围结构内外表面的传热及相关系数、温室内外外的换气传热等。

1.1.4 初始条件 以模拟日前 1 d 23:00 至模拟日 0:00 的温室温度实测值作为模拟的初始条件。

1.2 试验验证

1.2.1 试验设计 12 m 跨日光温室(辽沈Ⅱ型)环境测点见图 1,各测点详细测试内容见佟国红等^[10-11],测试室内空气温度、室内土壤温度、室内各壁面温度采用 T 型热电偶(铜—康铜,直径 0.32 mm),测试室外太阳辐射用日射计(EKO, MS-601),测试室内太阳辐射用日射计(EKO-020VS),测试空气相对湿度采用双通道温湿度

料板,120 mm 红砖墙;后坡由 20 mm 厚松木板、150 mm 聚苯乙烯泡沫塑料板及保温层、防水层组成,共约 200 mm 厚。前屋面为聚氯乙烯多功能膜,夜间前屋面覆盖保温被。在温室南侧前底脚设置 80 cm 深防寒沟,绝热材料为 6 cm 厚聚苯乙烯泡沫塑料板。分别选择冬季晴天、阴天的天气情况,来分析土壤温度分布边际效应特点。

1.1.2 控制方程 控制方程的通用形式为^[8]

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{v} \varphi) = \text{div}(\Gamma \text{grad} \varphi) + S_{\varphi} \quad (1)$$

其中,代表通用变量 ρ 、 \mathbf{v} 、 Γ 、 S_{φ} 等;分别表示密度、速度矢量、广义扩散系数和源项。 φ 为 1 时,该方程为连续方程; φ 为 u 、 v 、 w 时,该方程为动量方程; φ 为 T 时, u 、 v 、 w 为能量方程。分别表示 3 个方向的速度; T 表示温度。

1.1.3 边界条件 该研究采用佟国红等^[9]建立的模拟晴天、阴天温室室内温度环境的模型。模拟时采用的边界条件分别为晴天、阴天室外的气候条件(温度、湿度、风速、太阳辐射)以及温室下面 1 m 深土壤的温度,边界条件中考考虑了温室围结构内外表面的传热及相关系数、温室内外外的换气传热等。

1.1.4 初始条件 以模拟日前 1 d 23:00 至模拟日 0:00 的温室温度实测值作为模拟的初始条件。

1.2 试验验证

1.2.1 试验设计 12 m 跨日光温室(辽沈Ⅱ型)环境测点见图 1,各测点详细测试内容见佟国红等^[10-11],测试室内空气温度、室内土壤温度、室内各壁面温度采用 T 型热电偶(铜—康铜,直径 0.32 mm),测试室外太阳辐射用日射计(EKO, MS-601),测试室内太阳辐射用日射计(EKO-020VS),测试空气相对湿度采用双通道温湿度

第一作者简介:佟国红(1966-),女,博士,副教授,现从事设施农业建筑与环境工程研究工作。E-mail: guohongtong@yahoo.com.cn。
基金项目:“十一五”国家科技支撑计划重点资助项目(2008BADA6B00);教育部留学回国人员科研启动基金资助项目(教外司留[2009]1001号);辽宁省博士科研启动基金资助项目(20061040)。
收稿日期:2010-04-10

仪, 以上所有传感器都接到数据采集器中自动采集、存储, 数据采集频率为每秒 1 次, 存储为每 10 min 的平均值(环境测试仪器由日本筑波大学提供)。测试时间为 2003 年 11 月 25 日至 2004 年 7 月 31 日, 该研究采用 2004 年 2 月 20 日(晴天)、2 月 21 日(阴天)的测试值进行模拟验证, 晴天 8:00 揭帘, 15:00 盖帘; 阴天 8:00 揭帘, 13:00 盖帘。

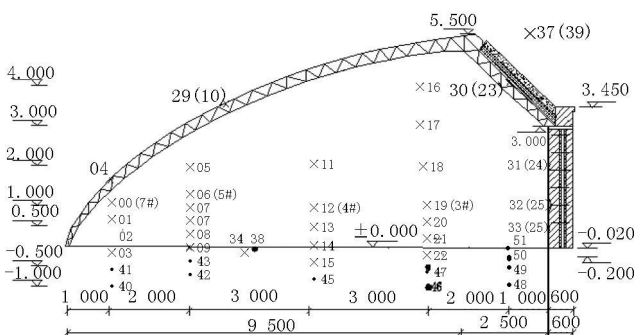


图 1 日光温室中部横剖面各测点布置示意图

Fig.1 Measurement positions inside the central section of the solar greenhouse

注: X—测点仪器于 2003 年 11 月 25 日布置; ●—测点仪器于 2004 年 2 月 11 日布置。

Note: X—Measuring point instrument disposal in November 25, 2003; ●—Measuring point instrument disposal in February 11, 2004.

1.2.2 参数采集 采集的 2 月 20 日(晴天)、2 月 21 日(阴天)室外的气候条件(温度、湿度、风速、太阳辐射)以及温室下 1 m 深土壤的温度作为模拟输入边界条件; 沿跨度土壤表面及土壤 0.2 m 深度各 5 个测点的土壤温度作为模拟验证温度。

2 结果与分析

土壤 0.2 m 深度模拟温度为沿跨度方向每 5 cm 间隔的模拟点温度, 模拟结果与土壤 0.2 m 深度 5 个测点的土壤温度比较, 比较的时间点分别取下午 13:00 和晚上 23:00。

2.1 晴天土壤温度分布边际效应

2 月 20 日(晴天)土壤 0.2 m 深温度在 13:00 和 23:00 的测试值及模拟值如图 2 所示。

从图 2 中可见, 土壤 0.2 m 深温度沿跨度分布不均匀, 在近北墙处土壤温度发生急剧下降, 说明温室的后部土壤与外界交换着大量的热量。

图 2 a 中 0.2 m 深土壤模拟温度与测试温度从量值上看, 各测点误差在 0.5℃以内, 绝对误差在 0.7%与 4.5%之间; 从温度分布趋势上看, 模拟值和测试值变化趋势相同, 跨中温度高, 南北两端温度低, 尤其是跨中以北土壤温度降幅较大。从测试值看, 跨中与距前底脚 1 m 的温度值相差 1.5℃、与距北墙 1 m 的温度值相差 3.0℃; 跨中温度模拟值与距前底脚 1 m 的模拟值相差 1.1℃、与距北墙 1 m 的模拟值相差 2.8℃。模拟显示 0.2 m 深土壤温度在距北墙 0.5 m 处有明显边际界点, 从界点开始温度发生急剧下降, 此处温度与中部温度相比下降 3.2℃; 和中部温度相比, 温度降幅为 2℃的点距北墙 2.5 m。

图 2 b 中模拟值和测试值相比 0.2 m 土壤温度除 3 m 测点外, 其它测点模拟值和测试值的温度差值均在 0.5℃以内; 在测点 3 的绝对误差为 9%, 其它点的绝对误差在 2.1%和 3.3%之间。从温度分布趋势上看, 模拟值和测试值变化趋势相同, 跨度中间温度高、南北两端

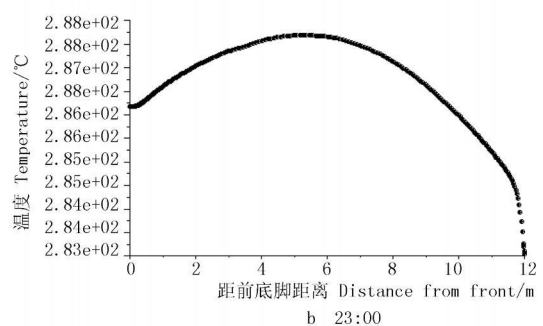
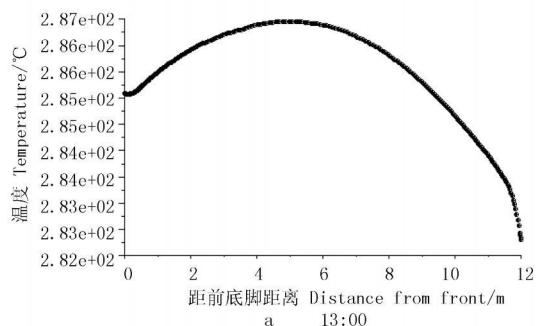
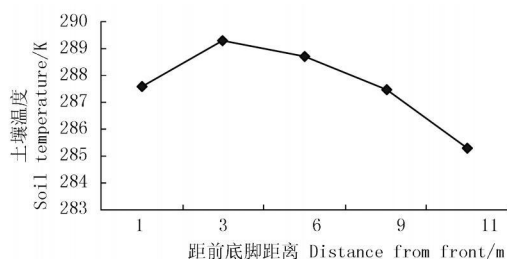
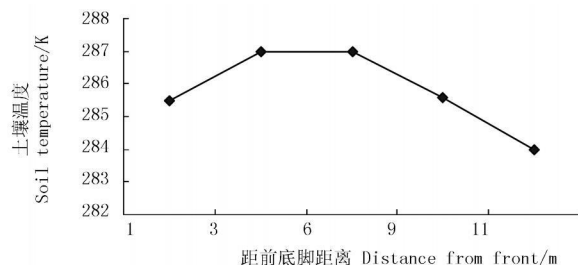


图 2 晴天 0.2 m 土壤温度测试值(上图)和模拟值(下图)

Fig.2 Measured(top) and simulated(bottom) soil temperatures of 0.2 m on the sunny day

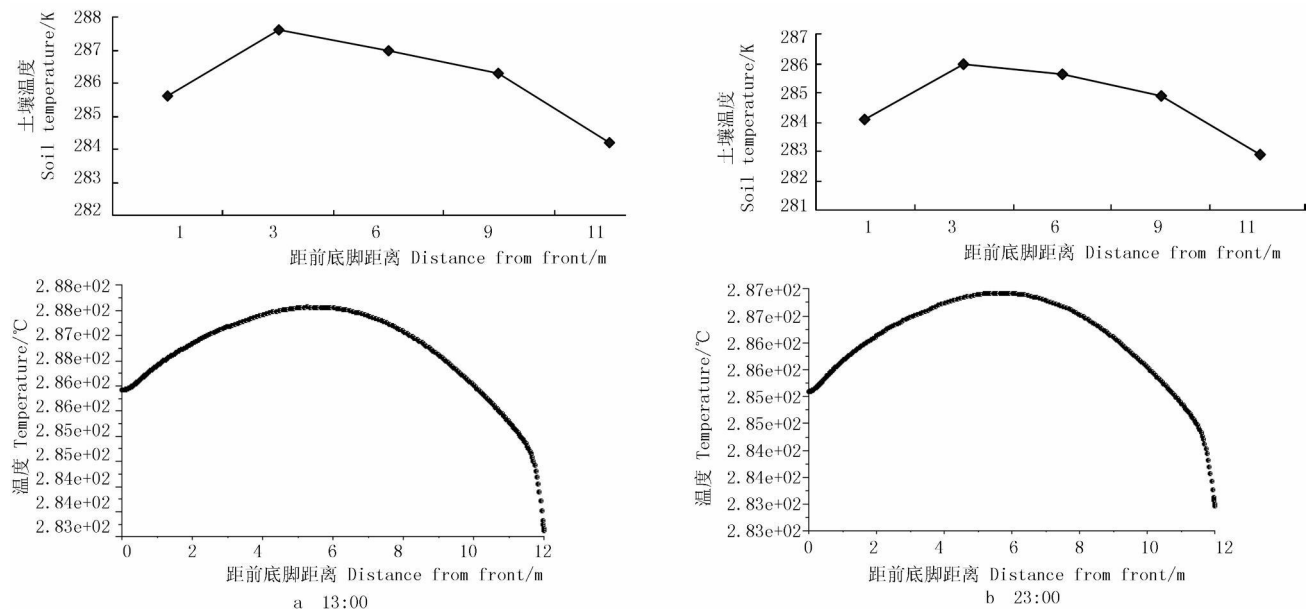


图3 阴天0.2 m土壤温度测试值(上图)和模拟值(下图)

Fig. 3 Measured(top)and simulated(bottom)soil temperatures of 0.2 m on the cloudy day

温度低,尤其是跨中以北土壤温度降幅较大。跨中温度测试值与距前底脚1 m的测试值相差1.1℃、与距北墙1 m的测试值相差3.4℃;跨中温度模拟值与距前底脚1 m的模拟值相差1.0℃、与距北墙1 m的模拟值相差2.5℃。模拟显示0.2 m深土壤温度和中部温度相比,温度降幅为2℃的点距北墙只有1.7 m。

2.2 阴天土壤温度分布边际效应

2月21日(阴天)土壤0.2 m深温度在13:00和23:00的测试值及模拟值如图3所示。

图3a中的0.2 m土壤温度模拟值与测试值从量值看,温度差值均在1.5℃以内,误差相对值平均近1.0℃,误差绝对值平均为7.8%;从温度分布趋势看,模拟值和测试值变化趋势相同,跨度中间温度高、南北端温度低,跨中以北土壤温度降幅较大,跨中温度测试值与距前底脚1 m的测试值相差1.1℃、与距北墙1 m的测试值相差2.4℃;跨中温度模拟值与距前底脚1 m的模拟值相差1.1℃、与距北墙1 m的模拟值相差2.3℃。模拟显示0.2 m深土壤温度在距北墙0.5 m处有明显边际界点,此处温度与中部温度相比下降3.0℃;和中部温度相比,温度降幅为2℃的点距北墙1.4 m。

图3b中的0.2 m土壤温度模拟值与测试值的温度从量值上看,除11 m温度测点外,温度差值在2.0℃以内;从温度分布趋势上看,均呈现出跨度中间温度高、南北两端温度低,跨中以北土壤温度降幅较大。模拟显示0.2 m深土壤温度在距北墙0.5 m处有明显边际界点,此处温度与中部温度相比下降2.7℃;和中部温度相比,温度降幅为2℃的点距北墙1.1 m。

3 结论与讨论

以室外的气候条件(温度、湿度、风速、太阳辐射)以及温室内地中1 m深土壤的温度为边界条件模拟得到的晴天及阴天土壤温度分布与测试值相比吻合较好,0.2 m深土壤温度呈现温室中部温度高、两端低,且中部以北温降较大的特点。2月20日(晴天)0.2 m深土壤跨中与距前底脚1 m处的温度差值在1.5℃以内,而与北墙1 m处的温度差值在3.0℃左右。2月21日(阴天)0.2 m深土壤跨中与距前底脚1 m处的温度差值依然在1.5℃以内,但与北墙1 m处的温度差值在2.5℃左右,与晴天相比阴天土壤温度分布均匀性略好。

模拟显示0.2 m深土壤温度在距北墙0.5 m处有明显边际界点,从界点开始温度发生急剧下降,晴天13:00和23:00界点温度与中部温度相比均下降3.2℃;阴天13:00界点温度与中部温度相比下降3.0℃,23:00下降值为2.7℃。若以与中部温度相比降幅2℃的点作为参考距离,则晴天13:00该点距北墙2.5 m,23:00该点距北墙1.7 m;阴天13:00该点距北墙1.4 m,23:00该点距北墙1.1 m,可见参考点随时间及天气均发生变化。通常认为温室的最南端的土壤与外界交换热量多,这也在孙治强等^[7]研究中得到证明,因此生产实践中通常在温室的南底脚设置防寒沟,阻止室内土壤中的横向热量流失。该研究的试验温室在温室南底脚设置防寒沟后,结果表明沿温室跨度与跨中土壤温度相差较大的点位于温室的北部,这种温度分布现象所蕴涵的传热机理需进一步探讨。另外,由于该研究只是探讨了2月下旬2 d的土壤温度分布,对于冬季其它时期的土壤温度分布有

待进一步研究。

参考文献

- [1] 陈端生, 郑海山, 刘步洲. 日光温室气象环境综合研究—墙体、覆盖物热效应研究初报[J]. 农业工程学报, 1990, 6(2): 77-81.
- [2] BAI Yi-kui, LIU Wen-he, WANG Tie-liang, et al. Experimental research on environment and heat preservation effect of solar greenhouse type Liaoshen I[J]. 农业工程学报, 2003, 19(5): 191-196.
- [3] 白青, 张亚红, 刘佳梅. 日光温室土质墙体温度与室内气温的测定分析[J]. 西北农业学报, 2009, 18(6): 332-337.
- [4] 董海虎, 李青松, 谭秀兰, 等. 吐鲁番盆地节能日光温室地温变化特征及应用[J]. 新疆农业科学, 2009, 46(4): 800-804.
- [5] 杨建军, 邹志荣, 张智, 等. 西北地区日光温室土墙厚度及其保温性的优化[J]. 农业工程学报, 2009, 25(8): 180-185.

- [6] 王娜, 陈青云, 高丽红, 等. 蕻春型日光温室温湿度特性的比较[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2008, 26(5): 432-435.
- [7] 孙治强, 孙丽, 王谦, 等. 日光温室土壤温度环境边际效应[J]. 农业工程学报, 2009, 25(5): 150-155.
- [8] Versteeg H K, Malaksekera W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics [M]. England: Longman Group Ltd London, 1995.
- [9] Tong G, Christopher D M, Li B. Numerical modelling of temperature variations in a Chinese solar greenhouse [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2009, 68(1): 129-139.
- [10] 佟国红, 李天来, 王铁良, 等. 大跨度日光温室室内微气候环境测试分析[J]. 华中农业大学学报, 2004(增刊): 67-73.
- [11] 佟国红, 李保明, Christopher D M, 等. 用 CFD 方法模拟日光温室温度环境初探[J]. 农业工程学报, 2007, 23(7): 178-185.

Numerical Modeling of Marginal Effect on Soil Temperature Distribution in a Chinese Solar Greenhouse

TONG Guo-hong, WANG Tie-liang, BAI Yi-kui, LIU Wen-he, YU Wei, ZHAO Rong-fei
(College of Water Conservancy, Shenyang Agricultural University, Shenyang, Liaoning 110866)

Abstract: Soil temperatures inside a Chinese solar greenhouse was predicted using Computational Fluid Dynamics(CFD) to indicate the soil temperature distribution marginal effect along span. The soil temperatures on February.20(sunny day) and February.21(cloudy day) were predicted and compared with measured values. The results showed that the soil temperatures on the surface and at 0.2 m deep were high in the middle and low at two sides with the temperature difference between the middle and 1 m away from the north side two times of that between the middle and 1 m away from the south side; The simulation results for soil temperature at 0.2 m deep also indicated that a sharp decrease occurred from 0.5 m away from the north side with the temperature difference 3.0 °C compared with the middle, and that the temperature difference of 2 °C occurred at the point 2.5 m away from north side at 13:00 and 1.7 m away from north side at 23:00 on the clear day with the point 1.4 m away from north side at 13:00 and 1.1 m away from north side at 23:00 on the cloudy day. The detailed information for the soil temperature distribution at margin was informed by the numerical simulation to improve construction design.

Key words: solar greenhouse; soil temperature; marginal effect; numerical simulation

自然界存在转基因现象吗？

在自然界中广泛存在自发的转基因现象，譬如植物界的异花授粉、天然杂交以及农杆菌天然转基因系统等等。

异花授粉植物的群体是来源不同、遗传性不同的两性细胞结合而产生异质结合子所繁衍的后代。异花授粉普遍发生于高等植物所有的科。

天然杂种优势的应用是把已选出的个体或系统在隔离的田间种在一起，使之相互自由进行杂交。一般应

用于紫花苜蓿等可进行无性繁殖的多年生作物。

农杆菌天然转基因系统：农杆菌是普遍存在于土壤中的一种革兰氏阴性细菌，它能在自然条件下趋化性地感染大多数双子叶植物的受伤部位，并诱导产生冠瘿瘤或发状根。根癌农杆菌和发根农杆菌的细胞中有一段 T-DNA，农杆菌通过侵染植物伤口进入细胞后，可将 T-DNA 插入到植物基因中。因此，农杆菌是一种天然的植物遗传转化系统。