

日光温室地基温度场数学模型及试验分析

白义奎^{1,2}, 李天来¹, 张文基³

(1. 沈阳农业大学 园艺学院, 辽宁 沈阳 110886; 2. 沈阳农业大学 水利学院, 辽宁 沈阳 110886;
3. 沈阳农业大学 信息与电气化学院, 辽宁 沈阳 110866)

摘要: 地面作为温室维护结构的一部分, 其温度低会影响温室内作物的正常生长, 尤其是前底脚部位这种现象更加明显, 加强这部分的保温至关重要。在对辽沈 I 型日光温室前底脚温度分布试验分析的基础上, 建立了温室地基稳态传热的数学模型, 给出了解析解, 并在此分析的基础上, 利用 ANSYS 热分析软件对未设防寒沟和设置防寒沟 2 种情况进行了有限元分析。结果表明: 在温室前底脚沿地基深度方向设置防寒沟具有良好的保温效果, 可以提高温室内土壤温度, 对提高基础附近的土壤温度尤为明显。

关键词: 日光温室; 防寒沟; 土壤温度; 数学模型
中图分类号: S 625.3; TU 261 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0009(2010)13-0049-05

节能日光温室以其特殊的围护结构, 区别于连栋温室, 在冬季寒冷季节不加热或在极端条件下少量加热即可进行越冬生产, 并且以其经济、实用, 得到了广泛的应用, 发展非常迅速。国内外许多专家、学者对温室的热环境进行了系统的理论研究和试验研究^[1-14], 在分析影响日光温室热环境的诸因素中, 关于墙体、后坡、前坡等对日光温室热环境影响进行了较为深入的研究, 但对温室周边地下横向传热对日光温室热环境的影响研究较少。随着对日光温室围护结构研究的深入, 如采取多层异质保温墙体、新型覆盖材料^[15, 810], 使得地面横向传热占总传热的比例及其对日光温室热环境的影响越来越大。地面是建筑围护结构的组成部分。我国北方地区, 在地面不做保温处理的情况下, 外围护结构附近地面表面温度较中心部位低 3~4℃。日光温室长度大、跨度小, 沿基础周边区域的面积占的比例大, 这部分区域的地温低, 影响作物的正常生长。因此, 加强基础部分的保温, 改善这部分区域的温度环境, 对温室生产具有现实意义。通过试验和理论分析, 建立了温室地基温度场数学模型并给出了解析解, 在分析温度场规律的基础上进行了防寒沟设计; 并利用 ANSYS 热分析软件对设计

结果进行了分析, 初步讨论了防寒沟对日光温室土壤温度及热环境的影响因素, 以期对日光温室围护结构地下保温设计提供依据, 同时也为大型连栋温室围护结构地下保温设计提供借鉴。

1 温室地基温度场及数学模型

温室地基温度场的形成和变化, 是个较复杂的热物理过程。从温室的建成到生产, 对应着热量进、出变化的各个阶段, 温度场也呈现不同的特征。

在日光温室正常生产阶段, 形成较为稳定的温度场。此时传至基础的热量与基础和土壤传至室外空气的热量相互平衡。此时的状态是温室正常使用过程中的状态, 该试验是以此温度场分析的。

1.1 温室地基温度场数学模型

室内地面温度与室外大地表面温度是决定温度场的 2 个主要温度边界条件。这 2 个边界值是变化的。室外大地表面温度变化幅度很小, 通常认为是恒定的。室内温度变化值与距离外围护结构基础的距离成函数关系。

地热对温度场的影响也是很大的。它的影响程度取决于地温的高低。随深度的增加, 地温渐趋稳定, 到一定深度后为一恒定值, 以此时的深度作为下面边界的界限, 地温值为边界温度值。

地温温度场与温室的几何形状密切相关。温室长、宽比较小时, 温度场为三维。丁德文在对采暖建筑地基融区及温度场问题的研究提出: 在同一条件下, 二维温度场与三维温度场之间存在一定的关系, 这种关系与房屋的长、宽比有关, 根据实测, 确定的关系表达式为 $K = \frac{\eta}{\sqrt{1+\eta^2}}$, η 为建筑物长、宽比, 因此确定的二维温度场再

第一作者简介: 白义奎(1968-), 男, 博士, 教授, 现从事设施环境资源工程方面研究工作。E-mail: baiyikui@163.com。
通讯作者: 李天来(1955-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 现从事设施园艺及蔬菜生理生态的研究和教学工作。
基金项目: “十一五”国家科技支撑计划重点资助项目(2008BADA6B05); 中国博士后科学基金特别资助项目(200801395)。
收稿日期: 2010-04-06

乘以系数 K , 即可化为三维温度场^[17]。对于温室长、宽比一般大于 10, 系数 $K \approx 1$, 可取温度场为二维。取中心横断面为研究体, 以中心点为坐标原点, x, y 轴分别沿水平和垂直方向。在无内热源情况下, 建立如下数学模型:

$$\frac{\partial T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \quad (1),$$

边界条件:

$$T = \theta^n, y = 0, -\infty < x < -a, a < x < \infty \quad (2),$$

$$x = \theta(x), y = 0, -a \leq x \leq a \quad (3),$$

$$T = T_c, y = H, -\infty < x < \infty \quad (4).$$

式中 a —温室半宽(包括外墙厚), m; H —地温恒定的深度, m; θ^n —室外地表平均温度, $^{\circ}\text{C}$; T_c —地温温度, $^{\circ}\text{C}$; $\theta(x)$ —室内地面表面温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

1.2 温室地基温度场数学模型解析解

在国内、外以往研究中, 一般 $\theta(x)$ 取为常量。但对跨度和净高较大等情况失真较大。实践指出, $\theta(x)$ 用二次曲线逼近是恰当的。即:

$$\theta(x) = A + Bx + Cx^2 \quad (5),$$

式中 A, B, C 均为常数, 分别为:

$$A = \theta_0, B = \frac{\theta_0 + \theta_{-a}}{2a}, C = \frac{\theta_0 + \theta_{-a} - 2\theta}{2a^2} \quad (6),$$

式中 θ_0, θ_a 和 θ_{-a} 分别为室中心和两墙处地面温度。对定解问题进行求解, 得地基温度场的分布式为:

$$T = \theta^n - \frac{\theta^n - T_c}{H} \cdot y + \frac{y}{\pi} \left[(A - \theta^n + Bx + Cx^2 - Cy^2) \times \frac{1}{y} (\arctg \frac{a-x}{y} - \arctg \frac{-(a+x)}{y}) + \frac{B+2Cx}{2} \times \ln \frac{(a-x)^2 + y^2}{(a+x)^2 + y^2} + 2aC \right] \quad (7).$$

此式是按照室内、外地面温度计算的, 在实际应用时, 若只给出室内、外的气温, 还应考虑表面热阻问题。

若取土壤的传热系数为 λ , 地面的表面换热系数为 a (室内地面的换热阻比室外稍大, 计算时取同一值, 对计算结果影响很小, 可以忽略不计), 则将表面换热阻可以折算成土壤的相当厚度:

$$d = \frac{\lambda}{a} \quad (8),$$

则只须将原坐标系原点向上平移 d , 取新坐标轴 $Y = 0$ 边界条件变为:

$$T = T_{in}, Y = 0, -a \leq x \leq a \quad (9),$$

$$T = T_{out}, Y = 0, -\infty < x < -a, a < x < \infty \quad (10).$$

式中 T_{in} —室内气温, $^{\circ}\text{C}$; T_{out} —室外气温, $^{\circ}\text{C}$ 。

方程(2)、(3)用(9)、(10)代替后重解微分方程(1)得:

$$T = T_{out} + \frac{T_{in} + T_{out}}{\pi} (\arctg \frac{a-x}{y} - \arctg \frac{-(a+x)}{y}) + gy \quad (11).$$

$$\text{式中 } g = \frac{T_c - T_{out}}{H}.$$

2 基础保温设计及基于 ANSYS 热分析

2.1 基础保温设计

以上分析表明, 温室内的地面温度分布是不均匀的(图1)。靠近外围护结构边缘部位的温度低, 向内温度逐渐提高。为了保证温室作物正常生长, 这就要求采取一定的保温措施, 尤其是靠近外围护结构的基础部位。地基对于一般建筑来说, 可以通过在室内附加一层不同厚度高强保温材料, 以达到保温和使地面温度均匀的目的。对于温室来说, 采用这种方法是不可行的。因此必须寻求新的解决方法。在温室外围护结构四周设置防寒沟, 即沿温室四周设置沿深度方向的保温材料, 可以达到与在室内设置水平保温材料相同的效果。以温室前底脚为例, 基础及基础保温做法见图2。

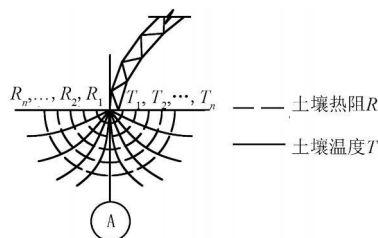


图1 温室地基内外温度分布

注 $T_1 < T_2 < \dots < T_n$, $R_1 < R_2 < \dots < R_n$ 。

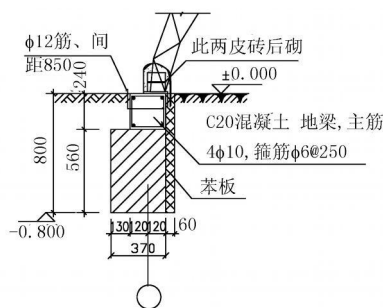


图2 防寒沟

2.2 基于 ANSYS 热分析

2.2.1 温室地基温度场基于 ANSYS 热分析的基本假定 (1)土壤是渗透、均匀和各向同性的; (2)土壤和基础之间的传热完全是热传导, 各表面之间的接触热阻忽略不计; (3)分析时取温室内、外的平均温度; (4)温室内、外土壤表面换热系数分别取 $5.8, 23.3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ^[20,21]; (5)材料热特性见表^[20-21]; (6)见图3上表面满足第3类边界条件, 即与土壤相接触流体介质的温度和换热系数已知; 下、左、右表面满足第1类边界条件, 即边界上的温度函数已知, 且为常数, 即此边界为绝热面, 见图3。

表 1 材料的热特性

序号	材料名称	导热系数/ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
1	土壤(粘土)	1. 300
2	混凝土(碎石)	1. 280
3	粘土砖基础	0. 814
4	苯板	0. 040

2.2.2 ANSYS 热分析 (1)模型建立: 创建的几何模型、有限元模型及施加荷载图如图 3、4、5 所示。图 3 中几何模型坐标见表 2。(2)结果分析: 利用 ANSYS 热分析结果彩色云图分别见图 6、7。分析时的室内、外温度分别取后文 3 中的试验结果, 即室内、外温度分别为 15. 44、-10. 68℃。由图 6、7 可以看出, 沿基础深度方向增加保温层后, 温度分布发生明显变化, 尤其在靠近基

础附近, 地表温度明显高于不设置保温的情况, 且温度高的区域加大。

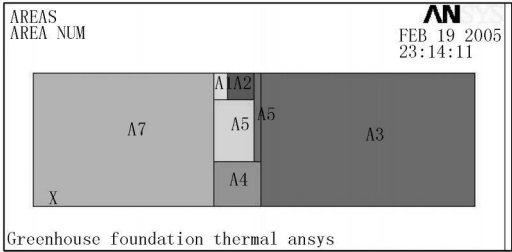


图 3 几何模型

注: 图中: A1、A3、A4、A7 为土壤; A2 为混凝土; A5 为苯板(不考虑基础保温时为土壤); A6 为粘土砖基础。

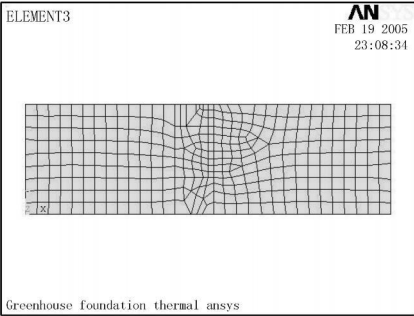


图 4 有限元模型

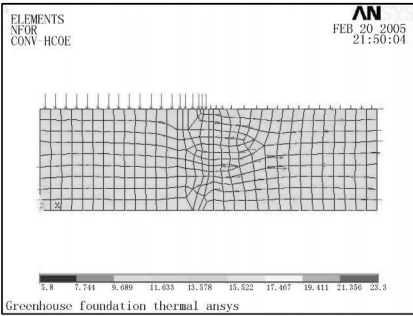


图 5 荷载图

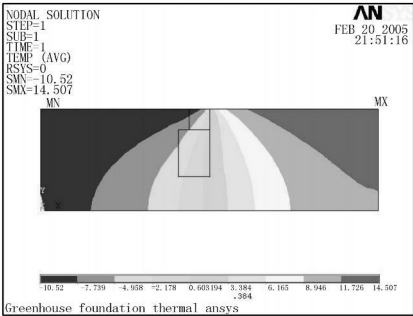


图 6 不设保温时温室地基内外温度分布

表 2 几何模型坐标

区域	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
左下 X 坐标	1.63	1.76	2.06	1.63	2.00	1.63	0.00
角点 Y 坐标	0.96	0.96	0.00	0.00	0.40	0.40	0.00
右上 X 坐标	1.76	2.00	4.00	2.06	2.06	2.00	1.63
角点 Y 坐标	1.20	1.20	1.20	0.40	1.20	0.96	1.20

水平投影 1.5 m; 后墙及山墙采用 240 mm 砖墙+120 聚苯板+240 mm 砖墙, 顶高 2.2 m; 在前底脚设置防寒沟, 采用 60 mm 厚苯板、埋深 800 mm, 设于基础内侧。具体做法见图 2。

3.2 测试方法

测试采用 WJK-III 型温室环境监测仪, 温度精度为 $\pm 0.2\%$ 。共布置 8 个温度测点, 测点平面布置如图 8 所示。其中: 测点 1 布置 3 个温度探头, -0.20、-0.40、-0.80 m, 编号为 1-2、1-3、1-4; 测点 2 布置 3 个温度探头, -0.20、-0.40、-0.80 m, 编号为 1-5、1-6、1-7; 测点 3 布置 1 个温度探头, 1.00 m, 编号为 1-1; 测点 4 布置 1 个温度探头, 1.00 m, 编号为 1-8。以上测点 1、测点 2 均为地温, 测点 3、测点 4 分别为室内外气温。

3.3 测试结果

测试时每 10 min 采集 1 次数据, 由计算机逐时记录。在数据分析时, 选取了 2 月 8 日 12: 00 至 2 月 9 日 12: 00(为晴天)每隔 30 min 数据进行分析。温室前底脚内外地温测试结果见图 9。各测点的日平均温度、最高温度及最低温度见表 3。结果分析表明, 在温室的前底脚处-0.8 m 的温度变化基本处于稳定状态, 而-0.2、-0.4 m 处的变化幅度较大; 沿深度-0.8、-0.4、-0.2 m, 前底脚相同深度的平均温差分别为 7.42、10.81、14.06℃。

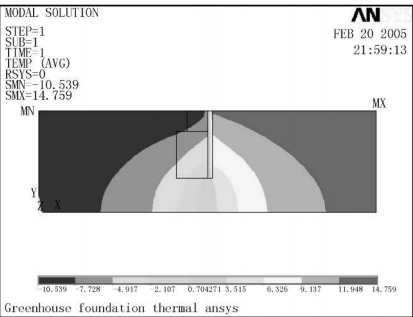


图 7 设保温时温室地基内外温度分布

3 试验研究

3.1 试验温室简介

测试于 2002 年 1 月 30 日至 2 月 9 日在辽宁省辽中县城郊乡蔬菜生产基地辽沈 I 型日光温室进行, 温室种植作物为扇贝西葫芦等, 测试期间温室未加温。辽沈 I 型日光温室的平面图如图 8。该温室东西长 89.49 m, 跨度为 8.24 m(净跨度为 7.40 m); 温室脊高 3.5 m, 后坡

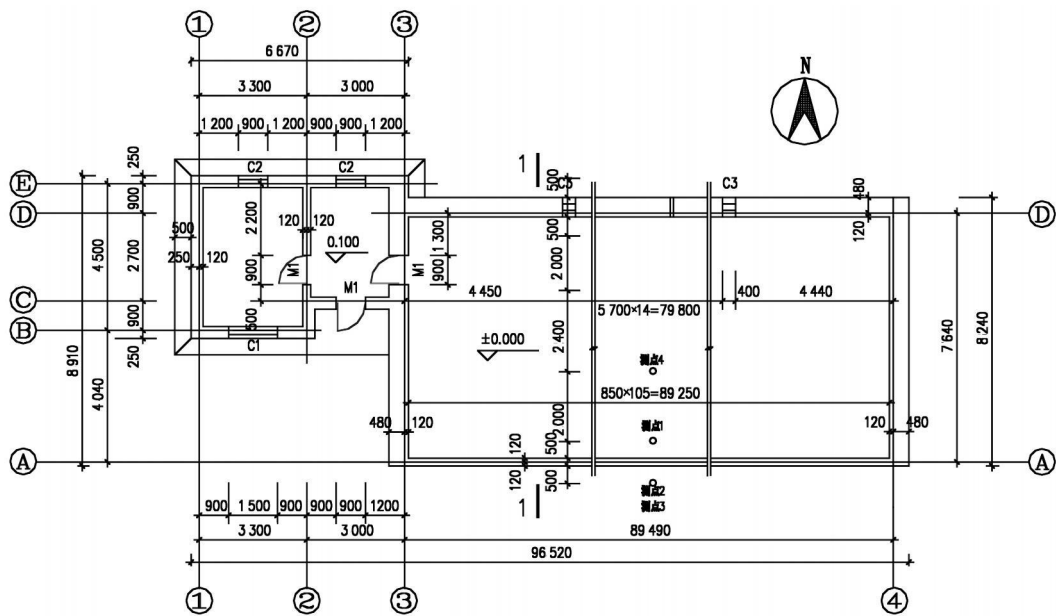


图8 辽沈I型日光温室平面图及测点布置

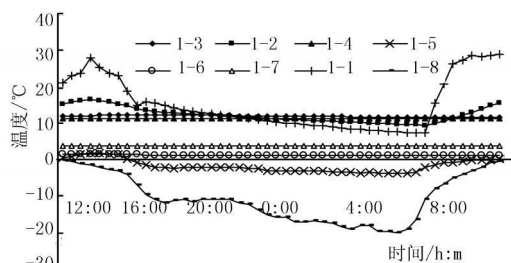


图9 温室前底脚内外地温变化规律

表3 不同测点的日平均温度、最高及最低温度

	测点							
	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	1-7	1-8
平均温度	15.44	12.40	12.03	11.30	-1.66	1.22	3.88	-10.68
最高温度	29.30	16.80	12.30	11.30	2.00	1.50	3.90	-0.20
最低温度	7.50	9.60	11.60	11.30	-3.60	1.10	3.80	-20.00

3.4 结果分析比较

表3结果显示,温室内距前底脚0.5 m,深度-0.8、-0.4、-0.2 m的平均温度分别为11.30、12.03、12.40℃,图7中相同位置的温度分别为11.01、12.89、13.82℃。

4 结论与讨论

4.1 结论

建立了温室地基温度场稳态数学模型,并给出了解析解;在数学模型分析的基础上,进行了基础保温设计,并利用ANSYS热分析软件对在基础内侧设置防寒沟保温和不设置防寒沟的温度场分布进行了分析。结果表明,在温室前底脚设置防寒沟可以明显提高温室内土壤的温度,尤其对提高靠近温室基础附近土壤温度,为作物正常生长提供了适宜的温度环境;设置防寒沟的试验

结果,与理论分析结果具有较好的吻合度;理论分析值在-0.8 m处略低于实测值,而在-0.4、-0.2 m处高于实测值。

4.2 影响试验结果因素分析

采用非稳态分析十分复杂,该试验的分析是建立在稳态分析的基础上,虽与实际情况存在一定的偏差,但在分析时取边界的平均温度进行分析,可以在一定程度消除对结果的影响;土壤含水率对土壤的热特性会产生影响,含水率越高其传热系数越大。该试验在分析时采用常数的形式,对分析结果会产生影响。

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] 亢树华,戴雅东,房思强,等.日光温室优型结构的研究[J].农业工程学报,1996(增):30-35.
[3] 陈端生.中国节能型日光温室建筑与环境研究进展[J].农业工程学报,1994,10(1):123-128.
[4] 周长吉.日光温室的结构优化[J].农业工程学报,1996,12(增刊):23-29.
[5] 周长吉.铝箔保温幕保温性能测试分析[J].农业工程学报,1999,15(3):191-195.
[6] 王树忠.北京节能型日光温室结构及性能[J].中国蔬菜,1995(3):37-40.
[7] 佟国红,王铁良,白义奎,等.日光温室墙体传热特性的研究[J].农业工程学报,2003,19(3):186-189.
[8] 白义奎,王铁良,李天来,等.铝箔聚苯板空心墙体保温性能理论研究[J].农业工程学报,2003,19(3):190-195.
[9] 白义奎,王铁良,姜传军,等.外墙聚苯板复合墙体在日光温室中的应用[J].房材与应用,2002(1):24-27.
[10] 白义奎,王铁良,刘文合,等.东北型节能日光温室—辽沈I型日光温室节能设计试验研究[J].节能技术,2002(1):23-26.

设施番茄应用熊蜂授粉综合技术

杨 甫, 徐希莲, 王凤鹤

(北京市农林科学院 农业科技信息研究所 北京 100097)

中图分类号:S 641.2;S 62 文献标识码:B
文章编号: 1001—0009(2010)13—0053—02

番茄栽培面积占我国蔬菜面积的 15%左右。近年来, 设施番茄发展很快, 实现了周年栽培。番茄花期 均采用人工蘸花、机械振动等方法来保证坐果率和产量, 虽有一定的效果, 但存在明显弊端。如人工激素蘸花, 不但费工费时, 增加劳动强度, 而且常常难以把握最佳的授粉时机, 易造成畸形果, 授粉后果实品质、口感较差 还会造成激素残留而污染果品; 机械振动则易造成

番茄茎秆损伤而引发病害。利用熊蜂为番茄授粉 可有效地解决上述问题, 熊蜂授粉后, 果实个体大, 畸形果少, 色泽好, 成熟早, 口感好。山东省的陈泮江等试验结果表明, 熊蜂授粉能明显提高番茄的品质和商品性, 增产率达到 13.5%~15.3%, 300 m² 温室增值 966~1 478 元; 内蒙古的李笑硕等利用熊蜂为番茄授粉, 结果显示, 增产 16.4%, 果实圆整, 无空心果; 王凤鹤等从 1999 年起, 对熊蜂授粉技术分别在北京顺义、河北徐水等进行试验示范, 每 667 m² 番茄平均增产 10%~30%, 增收 1 000 元以上。目前, 应用熊蜂为番茄授粉技术已在北京、河北、山东、辽宁等省市推广。

熊蜂个体大, 浑身绒毛, 耐低温, 趋光性差(不会像蜜蜂那样向上飞撞棚膜), 嗅觉不发达(可上访番茄等有异味的作物), 番茄开花后, 熊蜂可在花粉数量最多, 活力最强时授粉, 使大量的花粉落到柱头上, 实现受精, 从而保证果实发育, 但熊蜂在设施棚室内受到空间狭小, 空气流动差, 昼夜温差大, 湿度大及食物来源短缺等条件限制, 为使熊蜂达到最佳的授粉效果, 下面将利用熊蜂为设施番茄授粉的相关应用技术介绍如下。

- 1 授粉前
 - 1.1 提前组织授粉蜂群
- 熊蜂可实现人工周年繁育, 周期为 60 d 左右, 只有

第一作者简介: 杨甫(1982-), 女, 本科, 助理研究员, 现主要从事授粉蜂种授粉研究与推广工作。E-mail: yangpu1982830@126.com。
基金项目: 北京市科委资助项目(Z09090501040904—5); 北京市自然科学基金资助项目(60072008); 北京市农林科学院资助项目。
收稿日期: 2010—03—26

[1] 亢树华. 鞍山日光温室的沿革和改进[J]. 农业工程学报, 1990 6(2): 101-102.

[12] 郭慧卿, 李振海, 张振武. 日光温室北墙构造与室内温度环境的关系[J]. 沈阳农业大学学报, 1995(2): 193-199.

[13] 郭慧卿, 李振海, 张振武. 日光温室温度环境动态模拟[J]. 沈阳农业大学学报, 1994(4): 438-443.

[14] 刘珩, 陈南特. 电热温室土壤温度场计算[J]. 北京农业工程大学学报, 1992(1): 40-44.

[15] 金伟良, 叶甲淳, 严家焱, 等. 新型墙体材料节能建筑热工性能测试与分析[J]. 新型建筑材料, 2002(2): 16-18.

[16] 郑其俊. 绝热材料的发展与应用[J]. 新型建筑材料, 2002(6): 44-47.

[17] 丁德文. 采暖建筑地基基础及温度场中几个问题的讨论[J]. 兰州大学学报, 1982(3): 12-14.

[18] 唐兴伦, 范群波, 张朝晖, 等. ANSYS 工程应用教程—热与电磁学篇[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2003: 3-56.

[19] 王果强. 实用工程数值模拟技术及其在 ANSYS 上的实践[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1999: 1-76, 166-188.

[20] 哈尔滨建筑工程学院. 供热工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1989.

[21] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.

Experimental Analysis and Mathematical Model on Temperature Field of the Solar Greenhouse's Foundation

BAI Yi-kui^{1,2}, LI Tian-lai¹, ZHANG Wen-ji³

(1. College of Horticulture, Shenyang Agricultural University, Shenyang, Liaoning 110886; 2. College of Water Conservancy, Shenyang Agricultural University, Shenyang, Liaoning 110886; 3. Inforation and Electrification, Shenyang Agricultural University, Shenyang, Liaoning 110886)

Abstract: Ground is a part of protection structure as solar greenhouse. Low temperature of soil to can influence normal growth of crop in the greenhouse, especially, the phenomenon in the fore foot was obvious. Therefore, it is important to strengthen heat preservation in design. On the basis of the experiment analysis about distributing of temperature in the fore foot of greenhouse type Liaoshen-I, constitute the mathematical model and had an analytical solution on steady-state heat transfer. And, soil temperature changes in solar greenhouse with cold-proof ditch and without cold-proof ditch in the fore foot were studied by finite element analysis through ANSYS software. The result showed the changes of soil temperature in different depths are prominent between inside and outside greenhouse with cold-proof ditch and without cold-proof ditch in the fore foot, and particularly obvious to improve soil temperature near the foundation.

Key words: solar greenhouse; cold-proof ditch; soil temperature; mathematical model