DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.12.040

单栋塑料温室内温度场 CFD 三维稳态模拟*

郝飞麟[1]　沈明卫[2]　张　雅[3]

(1.浙江树人大学生物与环境工程学院,杭州 310015;2.浙江大学生物系统工程与食品科学学院,杭州 310058;
3.杭州市农业科学研究院蔬菜科学研究所,杭州 310024)

【摘要】 为分析单栋塑料温室内的温度场分布情况,建立了包括温室内外空间、室内作物和土壤层等的温室环境几何模型,在分析太阳辐射及各部分热交换的基础上,对单栋塑料温室内的温度场进行了 3-D 稳态模拟。热辐射传递过程采用蒙特卡罗法模拟,将室内作物简化为连续固体换热模型并采用剪应力输运模型表述空气紊流。结果显示:模型预测值均高于实测值,绝对误差均小于 2.2℃,平均相对误差为 6.7%。气流对温室内温度和均匀性影响较大,温室进风口侧的温度低于出风口侧。作物简化为连续固体的假设用于室内空气部分的温度预测具有一定的可行性,但预测值会高一些。

关键词:单栋塑料温室　温度场　CFD 模拟

中图分类号:S625.5+1　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2012)12-0222-07

3-D Steady Simulation of Temperature Pattern Inside Single Plastic Greenhouse Using CFD

Hao Feilin[1]　Shen Mingwei[2]　Zhang Ya[3]

(1. *College of Biology and Environmental Engineering*, *Zhejiang Shuren University*, *Hangzhou* 310015, *China*
2. *School of Biosystems Engineering and Food Science*, *Zhejiang University*, *Hangzhou* 310058, *China*
3. *Research Institute of Vegetable Cultivation*, *Hangzhou Agricultural Academy*, *Hangzhou* 310024, *China*)

Abstract

To explore the temperature distribution in the simple plastic greenhouse of south China, a model was established including component of inner and outer space, inside plant and soil layer, etc. Based on analysis of solar radiation and heat exchange between different components, 3-D steady simulation of temperature distribution was carried out in greenhouse. The Monte Carlo model was adopted in thermal radiation and transfer process, shear stress transport (SST) model was used in air turbulence analysis, and the crop was simplified as continuum. The result showed that the value of simulation was a bit higher than that of the measurement. The absolute error was below 2.2℃ and relative error was 6.7%. The airflow had an obvious effect on temperature distribution and fluctuation, and the temperature of inlet side was lower than that of outlet side. It seems feasible to consider the crop as continuum in simulation model in this case, while the simulation value showed a bit higher.

Key words　Simple plastic greenhouse, Temperature field, CFD simulation

引言

计算流体动力学(CFD)技术用于温室环境研究已有 20 多年[1~2],越来越多的应用表明其在通风、传热传质等涉及有流体参与的、复杂质能交换关系精确求解的适用性和优越性[1~4]。温室环境系统涉

收稿日期:2012-01-04　修回日期:2012-02-21
*国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(516001-H41209)
作者简介:郝飞麟,高级工程师,主要从事环境工程研究,E-mail:haofeilin@qq.com
通讯作者:沈明卫,副教授,主要从事设施农业研究,E-mail:shenhao@zju.edu.cn

及因素较多且耦合性较强，目前以温室通风研究居多且比较成熟。而对温室环境管理最重要的因子：温度和湿度的研究则相对较少[1]，尤其是针对我国南方应用较多的单栋塑料温室，仍然处于探索阶段。

由于温室热环境中需要考虑的因素多且过程比较复杂，Boulard 等采用边界条件（已知边界温度或热流量）来简化太阳辐射过程和地热损失分析[3,5~7]，Majdoubi 等采用经验公式或宏观能量平衡方程的自定义函数来简化热量传递过程[8]，Fidaros 采用了离散坐标法（DO）模拟太阳辐射等[9~11]，以上研究大都在换热构件的组成和各构件之间换热、特别是热辐射换热方面作了较大简化。

本文在全面构建温室系统换热模型的基础上，考虑包括各构件之间传导、对流、辐射的热交换过程，探索我国南方单栋塑料温室内的温度场模拟和预测方法。

1　几何模型

试验选取位于杭州市农业科学研究院农场内的典型单栋塑料温室为研究对象（长 × 宽 × 高为 25.0 m × 7.0 m × 4.0 m），如图 1 所示。温室屋脊呈东西走向，配两个侧窗和一个顶窗，室内栽有结果前期的番茄，共 3 垄，每垄的高度实测平均为 1.23 m，宽度平均 1.5 m，行间距平均 0.6 m。计算分析区域包含与温室接触的一部分外部空间、温室覆盖材料和土壤层，外部空间尺寸（长 × 宽 × 高为 175.0 m × 49.0 m × 16.0 m），大于按照流体力学理论推荐的外部尺寸[1,12]；温室覆盖材料为 LDPE，厚度为 0.12 mm；土壤层厚度采用预试验的方法，取土壤温度开始随时间变化小于 1.0℃的深度，简化为单独的土壤层，

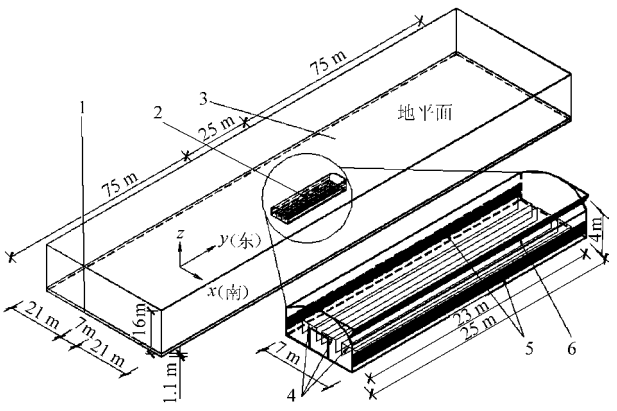

图 1　温室计算几何模型

Fig. 1　Schematic view of simulated greenhouse

1. 温室下部土壤　2. 单栋塑料温室　3. 温室外部计算域　4. 番茄植株　5. 侧窗　6. 顶窗

试验周的测量值为 1.1 m，不再按温度分层。这样可以较全面地考虑由热压、温室下风向侧湍流引起的通风变化，同时也可包含温室与地面的辐射、对流换热过程。

模拟中网格划分采用非结构化四面体网格，结构界面处、结构壁面处、进出口处采用加密处理，以适应精细分析，整个模型共划分网格 4 018 454 个，其中温室结构的网格为 1 103 255 个。网格质量检验使用程序自带的网格统计功能，其 3 项指标（Orthog. Angle，Exp. Factor 和 Aspect Ratio）均合格，优质比例分别为 88%、90% 和 100%。

2　理论模型

CFD 模拟理论是基于 N－S 方程的一系列方程组，涵盖了温室环境系统各部分的能量输入输出过程，对应于前述温室环境系统的几何模型，各部分之间的热交换类型如表 1 所示。

表 1　温室环境系统组成各部分之间的热交换类型

Tab. 1　Heat exchange type between different components of greenhouse environment system

环境组成	太阳	周围大气	覆盖材料	室内空气	室内作物	下部土壤
太阳		辐射	辐射	辐射	辐射	辐射
周围大气	辐射		辐射、对流	辐射、对流	辐射、对流	辐射、对流
覆盖材料	辐射	辐射、对流		辐射、对流	辐射	辐射
室内空气	辐射	辐射、对流	辐射、对流		辐射、对流	辐射、对流
室内作物	辐射	辐射	辐射	辐射、对流		辐射、传导
下部土壤	辐射	辐射、对流	辐射	辐射、对流	辐射、传导	

2.1　太阳辐射

太阳辐射为散射光线与直射光线的组合，其直射光线的入射角为[13]

$$\begin{cases}\cos\theta = \sin\varphi\sin\delta + \cos\varphi\cos\delta\cos h \\ \cos\alpha = (\sin\delta - \sin\varphi\cos\theta)/(\cos\varphi\sin\theta)\end{cases} \quad (1)$$

其中　$\sin\delta = 0.397\,95\cos(0.985\,63(N - 173))$

式中　θ、α——太阳天顶角和方位角，(°)

φ——当地纬度，试验场所 GPS 实测为 30.272°N

δ——太阳赤纬，(°)

N——计算时的天数,从 1 月 1 日算起

h——时角,正午为 0,一天变化 2π,[- π, π]对应 0:00 ~ 24:00

太阳辐射的强度(辐射通量密度,W/m^2)用太阳辐射仪测量,其中散射光线占总辐射的量估计为 31%[13]。

2.2 热辐射

温室环境系统各组成部分的热辐射可以用黑体的全频段积分辐出度近似表示[14]

$$E_b(T) = n^2\sigma T^4 \tag{2}$$

式中 n——物体材料的折射率

σ——斯特藩-玻尔兹曼常数,取 5.669 6 × 10^{-8} W/(m^2·K^4)

T——物体的绝对温度,K

通过空间任意面的辐射热流为

$$q^R(\boldsymbol{r},\boldsymbol{n}) = \iint_0^\infty (\boldsymbol{s},\boldsymbol{n}) I_\nu(\boldsymbol{r},\boldsymbol{s})\,\mathrm{d}\Omega_s\,\mathrm{d}\nu \tag{3}$$

式中 $\boldsymbol{r}$、$\boldsymbol{n}$、$\boldsymbol{s}$——参考坐标系下的位置向量、法向量和方向向量

I_ν——随面位置和方向变化的辐射强度,W/m^2

ν——辐射(电磁波)频率,Hz

Ω_s——空间物体角度,rad

计算时,假定各参与换热的物体均为灰体,即其辐射发射、发射、吸收强度与入射辐射的频率无关。当辐射(电磁波)通过由两物体接触产生的交界面时,电磁波发生折射和反射,界面反射率为[14]

$$\rho_r = \frac{1}{2}\left[\frac{\tan^2(\theta_{r1}-\theta_{r2})}{\tan^2(\theta_{r1}+\theta_{r2})} + \frac{\sin^2(\theta_{r1}-\theta_{r2})}{\sin^2(\theta_{r1}+\theta_{r2})}\right] \tag{4}$$

式中 θ_{r1}、θ_{r2}——电磁波在物质 1、2 中的反射角(对应入射角和折射角)

热辐射(电磁波)在温室系统中的传播过程(透射、吸收、反射)十分复杂,精确的辐射传输方程(RTE)的详细表达和计算十分困难,多采用近似计算方法[1,9,12,14],由于有与固体(温室覆盖层、土壤等)的辐射换热,ANSYS CFX 软件的离散坐标(DO)法求解不再适用[14],本文采用蒙特卡罗(Monte Carlo)方法进行近似求解,可以达到与 DO 相当或更高的精度[14],该方法在光子跟踪中已广泛使用[15~18]。

2.3 对流换热和热传导

温室内栽培作物与室内空气的对流换热有别于由温差驱动的对流换热过程,由于存在呼吸与蒸腾,其热交换包含显热 Q_S 与潜热 Q_L 两部分[1,8],显热交换类似对流换热,可采用对流换热模型进行分析;潜热交换是作物自身调节温度的相变换热,本文采用源项处理,即

$$Q_S = \rho_a c_p L_L \frac{T_v - T_i}{r_a} \tag{5}$$

$$Q_L = \rho_a L_v Le^{\frac{1}{3}} L_L \frac{w_v - w_i}{r_a + r_s} \tag{6}$$

式中 ρ_a——空气密度,取 1.225 kg/m^3

c_p——空气定压比热容,取 1 006.7 J/(kg·K)

L_L——作物的叶面积指数,实际测量为 2.76, m^2/m^3

T_v、T_i——作物大叶温度和作物附近室内空气温度,本文用作物平均温度和室内空气平均温度代替,K

r_a——作物空气阻力,用文献[8]附录推荐的公式计算,s/m

L_v——水的汽化潜热,取 2.401 MJ/kg

Le——路易斯数(Lewis number),取 0.86

w_v、w_i——室内近作物区域空气当前温度下的饱和含水量和实际含水量,取实际测量值,kg/kg

r_s——作物叶片的气孔阻力,用文献[8]附录推荐的公式计算,s/m

热传导存在于土壤、温室覆盖层内部、温室下部土壤、温室覆盖层和作物根系,温室覆盖层与下部土壤接触面较小,其热传导可以忽略,室内作物根系与土壤的热传导过程复杂,相关研究也未述及,本文将其简化为土壤的导热率。

2.4 紊流模型

杭州夏季风速在试验周现场实测值为 0.5 ~ 2.2 m/s 之间,相对于尺寸较大的温室计算域,雷诺数较低,前人的研究多采用高雷诺数的 $k-\varepsilon$ 方程描述[1,12],本文采用同属涡粘度模型(eddy-viscosity models)类的剪应力输运模型(shear stress transport,简称 SST)[14],它是 $k-\varepsilon$ 和 $k-\omega$ 紊流模型的结合和改进,在预测流体与壁面的分离和低雷诺数近壁面流动方面有明显的优势[14],即

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{k3}}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + P_k - \beta'\rho k\omega +$$

$$P_{kb}\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j\omega) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{k3}}\right)\frac{\partial\omega}{\partial x_j}\right] +$$

$$2(1-F_1)\rho\frac{1}{\sigma_{\omega2}\omega}\frac{\partial k}{\partial x_j}\frac{\partial\omega}{\partial x_j} + \alpha_3\frac{\omega}{k}P_k - \beta_3\rho\omega^2 + P_{\omega b} \tag{7}$$

式中 k、ω、μ_t、μ——紊流动能、紊流频率、紊流粘度和动力粘度

F_1——混合函数

U_j——j 方向的流体速度

σ_{k3}、β'、$\sigma_{\omega 2}$、α_3、β_3——模型混合常数，取值与 F_1 有关

P_k、P_{kb}、$P_{\omega b}$——中间变量，表示由粘性力产生的紊流动能和浮力对 ε、ω 方程的影响

2.5　室内栽培作物的热交换

温室通风研究时多将室内作物简化为网状体，用以突出其对气流阻碍的主导作用，宏观的换热研究多将其简化成大叶或小叶经验模型，突出其与室内空气的对流换热的主要特征[1,12]。但在模拟过程中，网状体的假设很难将室内作物与温室其他组成部分之间的辐射换热包含在理论模型之内，鉴于此，本文将室内作物简化为连续固体，同时考虑其对流和辐射换热过程。实际田间测试表明，侧边两垄作物只有周边第一排植株根部可检测到小于 0.3 m/s 的气流流速（使用 CSAT3 型风速仪）。

3　温室温度场的 CFD 模拟与分析讨论

模拟采用 ANSYS CFX12.1 进行，一些气象参数如大气温度、室内外相对湿度、风速、太阳总辐射、地温等取自 2011 年 6 月 27 日现场试验时的 PC－3 型气象站、PC－2GL 型辐射仪和土壤温度计等的测量值。大气温度在计算域高度方向上取定值，室外风速在高度方向上按对数规律分布[5]，风向为南偏西 15°，太阳辐射分直射和散射两部分，直射部分角度按式(1)计算，方向向量为[0.305　0.952　0.759]。模拟的一些主要设置和参数取值如表 2 所示。

表 2　模拟参数设置和取值

Tab.2　Value settings of some parameters and model

项目	参数设置和取值
温室覆盖材料	密度 900 kg/m^3；定压比热容 2 550 J/(kg·K)；导热率 0.29 W/(m·K)；折射率 1.7；吸收率 0.1；反射率 0.1
温室下部土壤	密度 1 600 kg/m^3；定压比热容 2 200 J/(kg·K)；导热率 0.80 W/(m·K)；折射率 1.92；吸收率 0.88；反射率 0.12
室内作物番茄	与空气混合后密度 560 kg/m^3；定压比热容 2 100 J/(kg·K)；导热率 0.19 W/(m·K)；折射率 2.77；吸收率 0.45；反射率 0.1
室内室外空气	密度 1.225 kg/m^3；定压比热容 1 006.7 J/(kg·K)；导热率 0.024 W/(m·K)；折射率 1.0；吸收率 0.15；反射率 0
环境参数	气温 27.8℃；大气压强 101 325 Pa；土壤深层温度 20.8℃；太阳辐射强度 0.57 MJ/m^2；离地 10 m 处风速 1.79 m/s；室内空气平均相对湿度 86%
模拟模型	空气：N－S 方程，SST 紊流，Density Difference Model 浮力，Monte Carlo Model 换热；其他：Monte Carlo 模型，补充换热模型
求解方法	有限体积法，全隐式多网格耦合求解；高分辨率，双精度
收敛准则	RMS，1.0×10^{-4}
迭代参数	步长 1 s；步数：573

注：环境参数为 8:00 的实测数据；为便于与气象部门辐射值对照，太阳辐射强度为 W/m^{2}的换算值。

模拟前，在 2011 年 6 月 20～30 日进行了现场试验，在温室 3 垄作物距地面 0.2 m、1.4 m 处吊装两层自记录 ZDR－F20 型温湿度传感器，每层沿屋脊长度方向均布 3 套，3 垄 2 层共 18 套（S111～S113，S121～S123，S131～S133，S211～S213，S221～S223，S231～S233），分别进行温湿度采集，完成后将数据导入计算机与模拟结果对照。模拟预测值与实测值的数据对比如表 3 所示。

图 2 为考虑包括辐射之后的两个截面的空气流速向量。图 2a 表示温室中部横截面上的流速矢量。图中可以看到比较明显的环流运动：气流从南边侧窗和顶窗流入，沿温室空间从北部侧窗流出，风速有所提高，带走温室内的部分热量；同时，气流受温室形状和室内作物影响，产生几个明显的小环流：作物之间、作物与温室壁面之间、温室北侧肩部和中间作物冠层的上部区域。由于外界风速较小，温室内部

表 3　温室内温度实测值与理论模拟值的对比

Tab.3　Simulated and measured temperature inside greenhouse　　℃

测量点	S111	S112	S113	S121	S122	S123	S131	S132	S133
模拟值	30.8	30.2	30.2	32.6	32.9	32.2	30.2	30.0	30.3
测量值	29.1	28.5	28.4	31.4	30.7	30.7	28.1	28.0	28.1
测量点	S211	S212	S213	S221	S222	S223	S231	S232	S233
模拟值	33.2	34.3	32.6	33.7	33.7	32.6	29.9	30.6	30.9
测量值	31.0	32.5	30.7	31.5	32.3	31.0	28.7	30.3	30.4

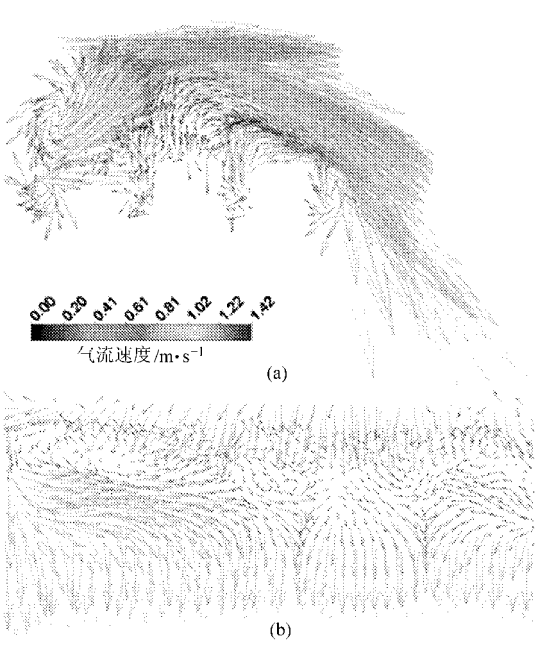

图 2 温室内典型截面上的风速矢量图

Fig. 2 Schematic view of wind flow vector in typical section of greenhouse

(a) 温室中部横截面 (b) 温室距地 1.4 m 高的水平截面

紊流发生部位较少,整体比较平顺。图 2b 为温室内距地面 1.4 m 高度水平截面上的气流矢量(温室内栽培作物顶部区域),上部为南,下部为北。可以看出绝大部分气流从南进风口流入,比较平稳地从北部出风口流出,流入时在第 1 垄作物上部产生较小的紊流,在中间垄作物上部产生稍强的纵向流动。温室内流场整体的均匀性较好。图 3 为温室内距地面1.4 m高处水平截面上的净热辐射强度,上部为温室进风口侧。可以看出,整体辐射比较平均,局部有随机、不规则的高辐射点(特别是出风口侧),可能是由于室内空气紊流引起的局部高温区域引起的。

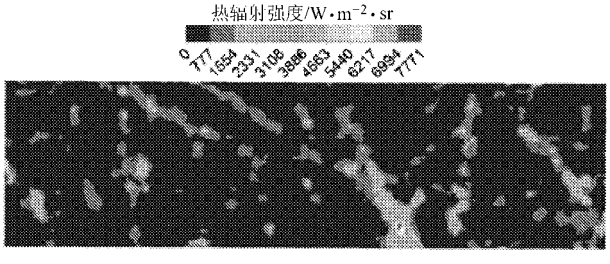

图 3 温室内距地 1.4 m 水平截面上的热辐射

Fig. 3 Heat radiation intensity in horizontal section 1.4 m above the ground

图 4 为温室内几个典型横截面上的温度分布图,温室左侧为南,设有侧窗和顶窗,温室右侧为北,仅设有侧窗。对照图 2 中的气流运动情况,可以看出,在气流运动产生紊流的区域温度会相对高一些。在作物栽培区域的温度差别比较明显,靠近进风口一侧温度较低,而靠近出风口一侧温度较高,这是气流将室内产生的热量向出风口侧夹带的结果。受其影响,出风口侧的地面温度亦升高,高于进风口侧和温室室内地面温度。对比 3 个截面的温度分布情况可以发现,温室上部温度高于下部,出风口侧两作物生长区域出现相对较高的温度。从模拟的数据发现:温室内空气的温度变化幅度为 22.84 ~ 41.84℃,平均温度为 30.64℃。图 4 中 3 个截面上的温度分布差异主要体现在温室内栽培作物区及温室中部空间,图 4a 在图 4b、图 4c 的上风向(外界风速为南偏西 15°),图 4c 在图 4b、图 4a 的下风向,这导致处在上风向的温室作物生长区域出现一定范围的高温(通风情况相对较差),下风向的截面由于气流对热量的推动,也在作物生长区域出现高温区域。总体上看,温室通风效果十分重要,不但可以降低室内温度,而且对室内温度的均匀性产生重要的影响。图 5 为温度分布情况的另一个侧面,分别为室内距

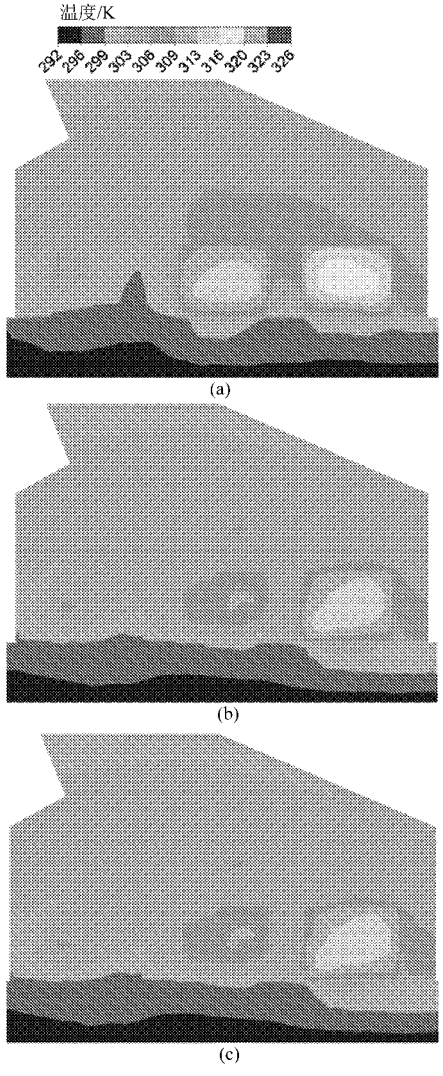

图 4 温室内典型横截面上的温度分布情况

Fig. 4 Temperature contour of some typical sections in greenhouse

(a) 距温室西部山墙 5.0 m 横截面 (b) 温室中部横截面 (c) 距温室东部山墙 5.0 m 横截面

地面高度为 1.0 m(作物冠层区域)、1.4 m 和 2.4 m 3 个水平截面上的温度云图,每张图的上部为南,下部为北。图 5a 表示作物冠层中的一个平面,可以看出由南向北温度逐渐升高和作物区温度略高于间隔空间空气区域的温度分布特征。

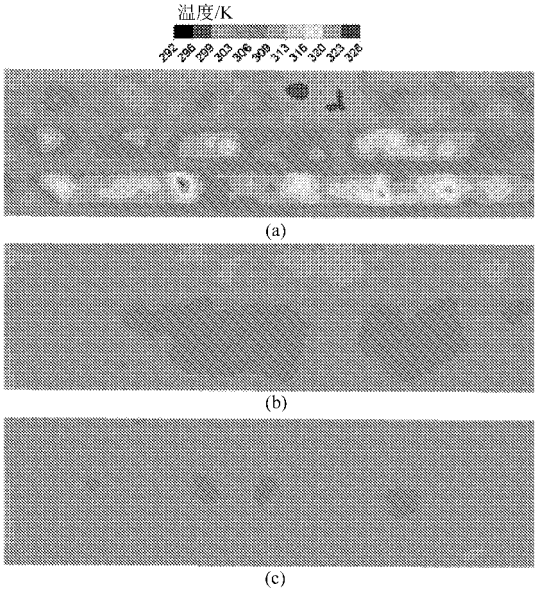

图 5　温室内典型水平截面上的温度分布情况

Fig. 5　Temperature contour of some typical sections

(a) 距地 1.0 m 水平截面　(b) 距地 1.4 m 水平截面　(c) 距地 2.4 m 水平截面

表 3 所列为温室内 18 个测点的模拟值与实测值的对照,总体上模拟值较实测值高,模拟的绝对误差均小于 2.2℃,平均相对误差 6.7%。这可能是模拟中将作物简化为连续固体模型后,采用源项处理方法分析作物的显热和潜热时没有充分考虑室内空气内水的蒸发和作物自身温度调节的潜力,而导致模拟值偏高。同时也显示作物垄之间的间隔空间温度略高于栽培区域的特点,这些体现了简化模型的局限性,显示出开发合适作物以及作物与空气热交换模型的必要性。

4　结论

(1) 在分析温室环境各组成部分之间热传递内容和过程的基础上,利用 CFD 手段对温室内的温度场预测进行了探索,结果显示,通风对温室内的温度和温度分布的均匀性影响较大,具体表现为进风口附近温度低,出风口附近温度高。

(2) 探索了利用蒙特卡罗法跟踪热辐射的传递过程,并尝试了将温室内栽培作物简化为连续固体模型进行换热考虑,紊流模型采用 SST 模型,模型的预测值与实测对比,预测值均高于实测值,其余绝对误差均小于 2.2℃,平均相对误差 6.7%,表明利用 CFD 对温室内温度场进行预测有一定的可行性。

参　考　文　献

1　Pierre-Emmanuel Bournet, Thierry Boulard. Effect of ventilation configuration on the distributed climate of greenhouse: a review of experimental and CFD studies[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 74(2): 195 ~ 217.

2　Franco A, Valera D L, Pena A, et al. Aerodynamic analysis and CFD simulation of several cellulose evaporative cooling pads used in Mediterranean greenhouse[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2011, 76(2): 218 ~ 230.

3　Boulard T, Roy J C, Fatnassi H, et al. Computer fluid dynamics prediction of climate and fungal spore transfer in a rose greenhouse[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 74(2):280 ~ 292.

4　丁为民,王小昌,李毅念,等. 温室环境控制与温室模拟模型研究现状分析[J]. 农业机械学报,2009, 40(5):162 ~ 168.
Ding Weimin, Wang Xiaochan, Li Yinian, et al. Review on environmental control and simulation models for greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(5):162 ~ 168. (in Chinese)

5　Francisco Domingo Molina-Aiz, Diego Luis Valera, Antonio Jesús Alvarez, et al. Measurement and simulation of climate inside Almeria-type greenhouse using computational fluid dynamics[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2004, 125:33 ~ 51.

6　Kittas C, Bartzanas T. Greenhouse microclimate and dehumidification effectiveness under different ventilator configurations [J]. Building and Environment, 2007, 42(10):3 774 ~ 3 784.

7　Teitel M, Ziskind G, Liran O, et al. Effect of wind direction on greenhouse ventilation rate, airflow patterns and temperatue distribution[J]. Biosystems Engineering, 2008, 101(3):351 ~ 369.

8　Majdoubi H, Boulard T, Fatnassi H, et al. Airflow and microclimate patterns in a one-hectare Canary type greenhouse: an experimental and CFD assisted study[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2009, 149(6 ~ 7):1 050 ~ 1 062.

9　Fidaros D K, Baxenanou C A, Bartzanas T, et al. Numerical simulation of thermal behavior of a ventilated arc greenhouse during a solar day[J]. Renewable Energy, 2010, 35(7):1 380 ~ 1 386.

10　程秀花,毛罕平,伍德林,等. 玻璃温室自然通风热环境时空分布数值模拟[J]. 农业机械学报,2009, 40(6):179 ~ 183.
Cheng Xiuhua, Mao Hanping, Wu Delin, et al. Numerical simulation of thermal profiles in spatial and temporal field for natural ventilated glasshouse[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery[J]. 2009, 40(6):179 ~ 183. (in Chinese)

11 吴飞青,张立彬,胥芳,等. 机械通风条件下玻璃温室热环境数值模拟[J]. 农业机械学报,2010, 41(1):153 ~ 158.
Wu Feiqing, Zhang Libin, Xu Fang, et al. Numerical simulation of the thermal environmental in a mechanically ventilated greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(1):153 ~ 158. (in Chinese)

12 Tomas Norton, Da-Wen Sun, Jim Grant, et al. Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the modeling and design of ventilation systems in the agricultural industry: a review[J]. Bioresource Technology, 2007, 98(12):2 386 ~ 2 414.

13 李万彪. 大气物理——热力学与辐射基础[M]. 北京:北京大学出版社,2010.

14 ANSYS Inc. ANSYS CFX manual [M]. Pittsburgh: ANSYS Inc., 2009.

15 吴真,贺俊芳,吴登科,等. 蒙特卡罗模拟光通过大气后的时间分布[J]. 强激光与粒子束,2011, 23(3):779 ~ 782.
Wu Zhen, He Junfang, Wu Dengke, et al. Simulation of transmitted light through atmosphere by Monte Carlo method[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(3):779 ~ 782. (in Chinese)

16 陈炎,张勤昭,曹树良. 温度体动网格方法的旋转变形能力[J]. 排灌机械工程学报, 2012, 30(4): 447 ~ 451.
Chen Yan, Zhang Qinzhao, Cao Shuliang. Rotational deformability of temperature analogy method[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012, 30(4): 447 ~ 451. (in Chinese)

17 王新坤,李红. 我国温室的研究现状与发展趋势[J]. 排灌机械工程学报,2010,28(2): 179 ~ 184.
Wang Xinkun, Li Hong. Current research status and development trend of greenhouse in China[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010, 28(2): 179 ~ 184. (in Chinese)

18 王新坤,许颖,高世凯,等. 基于多孔毛管的温室热风采暖[J]. 排灌机械工程学报,2011,29(5):451 ~ 454.
Wang Xinkun, Xu Ying, Gao Shikai, et al. Greenhouse hot blast heating based on porous pipes[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 29(5): 451 ~ 454. (in Chinese)

(上接第 221 页)

9 李海霞. 植物微弱电波信号的研究[D]. 北京:中国计量学院,2006.

10 王忠义,陈端生,黄岚. 利用人工神经网络建立植物电信号与环境因子关系[J]. 农业工程学报,2001,17(3):142 ~ 145.
Wang Zhongyi, Chen Duansheng, Huang Lan. Relationship between plant physiological signal and environment by using artificial neural network[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2001, 17(3): 142 ~ 145. (in Chinese)

11 关海鸥,许少华,谭峰. 基于遗传模糊神经网络的植物病斑区域图像分割模型[J]. 农业机械学报,2010,41(12): 163 ~ 167.
Guan Haiou, Xu Shaohua, Tan Feng. Image segmentation model of plant lesion based on genetic algorithm and fuzzy neural network[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(12): 163 ~ 167. (in Chinese)

12 黄林, 贺鹏, 王经民. 基于概率神经网络和分形的植物叶片机器识别研究[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2008,36(9):212 ~ 218.
Huang Lin, He Peng, Wang Jingmin. Leaf recognition for plant based on probabilistic neural networks and fractal[J]. Journal of Northwest A&F University: Nat. Sci. Ed., 2008, 36(9): 212 ~ 218. (in Chinese)

13 张贤达. 现代信号处理[M]. 北京:清华大学出版社,2002:378 ~ 380.

14 张德丰. MATLAB 小波分析[M]. 北京:机械工业出版社,2009:158 ~ 160.

15 Lid Q, Pedrycz W, Pizzin J. Fuzzy wavelet packet based feature extraction method and its application to biomedical signal classification [J]. IEEE Transactions on Bio-medical Engineering, 2005, 52(6):1 132 ~ 1 139.

16 王佩丽,彭敏放,杨易旻. 应用模糊最优小波包和 LS - SVM 的模拟电路诊断[J]. 仪器仪表学报,2010,31(6):1 282 ~ 1 288.
Wang Peili, Peng Minfang, Yang Yimin. Analog circuit diagnosis using fuzzy-rule based optimal wavelet packet and LS - SVM[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(6): 1 282 ~ 1 288. (in Chinese)

17 张德丰. MATLAB 神经网络应用设计[M]. 北京:机械工业出版社,2009:259 ~ 277.

18 袁寿其,黄萍,骆寅,等. 基于小波包分解的离心泵关死点流动状态[J]. 排灌机械工程学报,2011,29(4):282 ~ 286.
Yuan Shouqi, Huang Ping, Luo Yin, et al. Flow analysis based on wavelet packet decomposition for centrifugal pumps at shut-off condition[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 29(4): 282 ~ 286. (in Chinese)