

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2023.02.007

自然通风下大棚群内部热湿环境分布特性模拟分析

赵福云^{1,2}, 谭志成¹, 陈皓¹, 姚奕合¹

(1. 湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007; 2. 武汉大学 动力与机械工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 为研究多塑料温室大棚群内部热、湿环境因子的相互影响与分布情况, 利用数值模拟软件, 在考虑温室内部水汽传输、作物蒸腾作用、太阳辐射等情况下, 结合多孔介质模型、DO辐射模型以及组分运输模型建立了对应数值模型, 在自然通风条件下进行了模拟并对作物蒸腾量进行了验证。验证结果显示模拟值与实验值误差在15%以内, 数值模型可信。采用此模型进行了模拟, 结果表明: 1号大棚对空气流动的阻碍使得2号以及3号大棚内空气流速降低, 导致空气中携带的水汽以及热量在2号以及3号大棚内部空间扩散, 2号及3号大棚内作物蒸腾受到抑制, 其内部作物表面温度逐渐升高, 3号大棚内作物表面温度升高最为明显, 最高处达到了309.5 K。

关键词: 温室环境; 塑料大棚; CFD; 自然通风

中图分类号: S625

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2023)02-0044-06

引文格式: 赵福云, 谭志成, 陈皓, 等. 自然通风下大棚群内部热湿环境分布特性模拟分析[J]. 湖南工业大学学报, 2023, 37(2): 44-49.

Simulation Analysis of Distribution Characteristics of Heat and Humidity Environment in Greenhouses Under Natural Ventilation

ZHAO Fuyun^{1,2}, TAN Zhicheng¹, CHEN Hao¹, YAO Yihe¹

(1. College of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;

2. School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In view of a study on the interaction and distribution of thermal and humid environmental factors in the multi-plastic greenhouse group, a corresponding numerical model has thus been established by using the numerical simulation software. In consideration of water and gas transmission, crop transpiration and solar radiation in the greenhouse, also combined with the porous medium model, DO radiation model and component transport model, a simulation has been carried out under natural ventilation conditions with crop transpiration verified. The validation results show that the error between the simulation value and the experimental value is within 15%, verifying the credibility of the numerical model. The results of a simulation by adopting this model show that the air flow velocity in No. 2 and No. 3 greenhouses is reduced due to the obstruction of air flow in No. 1 greenhouse, which leads to the diffusion of moisture and heat carried in the air in No. 2 and No. 3 greenhouses. The transpiration of crops in No. 2 and No. 3 greenhouses is inhibited, with the surface temperature of crops in No. 2 and No. 3 greenhouses gradually increased. The surface temperature of crops in No. 3 greenhouse increases most significantly, reaching a maximum of 309.5 K at the highest point.

Keywords: greenhouse environment; plastic greenhouse group; CFD; natural ventilation

收稿日期: 2022-04-05

作者简介: 赵福云(1977-), 男, 湖南株洲人, 湖南工业大学教授, 博士, 博士生导师, 主要研究方向为建筑通风, 流动传热, 温室环境控制和计算流体力学, E-mail: 1065093523@qq.com

1 研究背景

温室农业是一种节能、高效、低成本的现代农业方式,为我国农业建设、实现农民收入增长做出了巨大的贡献。中国南方地区温室主要以塑料大棚型温室为主,简易单体拱棚在南方地区较为多见。而随着温室农业进一步向规模化发展,在建造塑料大棚中呈现出多塑料大棚群的温室群落型特点,这种形式可以充分利用土壤、气候和生物潜力,提高土壤利用率,高效地获得优质农产品。由于温室作物的生长状况不仅取决于作物品种本身的质量,更与温室内部环境因子的适宜程度息息相关。因此,了解温室内部环境因子的分布特点对提高温室生产效益具有重要意义。

目前,国内外学者对温室内部环境做了相关研究。T. Boulard 等^[1]利用流体力学计算软件模拟了一种隧道型温室大棚内部气候及作物的蒸腾量,在对模拟结果进行实验验证后预测了温室内成熟生菜作物的蒸腾量;M. Kacira 等^[2]研究了风诱导通风条件下,温室通风结构、作物存在和外部风速对温室和作物冠层区通风速率和气流模式的影响,得出作物冠层通风受不同通风结构引起的内部气流模式的影响显著;M. Kacira 等^[3]还利用 CFD 软件研究了多跨度、锯齿形温室的自然通风率和气流模式进行了预测,得出最大和最可接受的通风率是通过在所有多跨度截面上结合使用迎风侧通风孔和背风屋顶通风孔获得的。G. Papadakis 等^[4]利用理论模型结合气体示踪法研究了不同室外风速以及开窗面积下温室通风流量变化的规律,研究结果表明通风量随不同风速以及开窗面积变化显著。方慧等^[5]研究了日光温室热压风压耦合作用下的室内通风流量影响机理,发现在总通风流量下,当室外风速大于 2.5 m/s 时,可忽略热压的影响。程秀花等^[6]以栽种了番茄的两连栋温室大棚为研究对象,利用 Fluent 软件对作物蒸腾、土壤蒸发与大棚内外环境因子间的关系进行了分析,得出温室背风侧的温、湿度均略高于温室迎风侧,但作物区内的温、湿度分布比较均匀,作物以及土壤的蒸发作用对室内温、湿度分布有影响。

从相关文献可以看出,研究者大多着手于独栋温室内部的环境因子与外界环境之间的关系,但较少有研究自然条件下外界环境对温室大棚群内部环境的影响。在研究温室内部环境因子分布与内外环境相互影响方面,CFD 软件能较为快速精确地得出内部环境因子的分布情况,这大大节约了人工和时间成本。

本文以塑料温室大棚群为研究对象,采用 Fluent 软件,在自然通风条件下对等间距温室大棚群内部环

境因子分布及作物区环境进行稳态模拟,研究温室大棚群热、湿环境因子间的相互影响和分布特点。

2 模型建立

2.1 几何模型

选取对象为 3 栋南方小型拱型塑料大棚(标号为 1、2、3),大棚为南北走向,沿 X 轴方向排布,各大棚间隔 1.6 m。每栋拱型大棚尺寸为 16 m(长)×5 m(宽)×2.4 m(顶高),肩高 80 cm,两侧通风口宽 60 cm,通风口下缘离地高度为 20 cm。考虑到每个塑料大棚内作物对内部环境的影响,将大棚内的作物简化为 3 列 14 m(长)×0.7 m(宽)×0.5 m(高)的各同性多孔介质区域,外侧作物区域边缘距离大棚通风口 50 cm,距离大棚南北面 1 m,每个多孔介质区域间隔 95 cm。如图 1 所示。

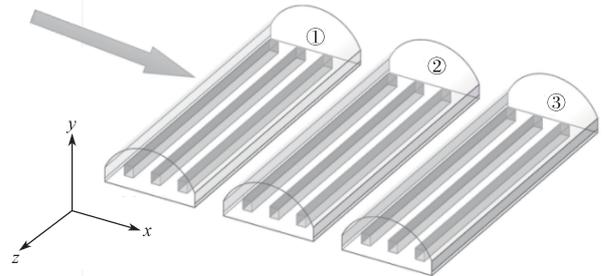


图 1 塑料大棚群模型

Fig. 1 Plastic greenhouse group model

2.2 作物多孔介质模型

将作物区域假定为各向同性多孔介质,当流体流过该区域时,其动力学形式可由 Darsey-Forchheimer 方程描述,其中多孔介质的阻力为

$$S_{\phi} = - \left[\left(\frac{\mu}{k} \right) u + \left(\frac{C_F}{k^{0.5}} \right) u^2 \right]. \quad (1)$$

式中: μ 为空气动力黏度; k 为渗透率; C_F 为非线性动量损失系数; u 为所在区域空气流速。

在通风条件下,作物对空气流动产生的拖拽效应而产生的动量汇,可用动量源项表示,其阻力可用如下公式^[8]表示:

$$S_{\phi} = -LC_D u^2. \quad (2)$$

式中: L 为叶片面积密度; C_D 为冠层阻力系数。

忽略式(1)的一次项,由式(1)(2)可推出:

$$\frac{C_F}{\sqrt{k}} = LC_D. \quad (3)$$

2.3 作物蒸腾模型

作物的蒸腾作用^[9]对大棚内部环境的影响不可忽略。作物覆盖区域的每个网格可被视为体积热源边界条件^[10]。根据作物多孔介质区域之间的热量交换,

可将作物区域的热通量划分为与空气间的对流通量和潜热通量, 并以其表面温度以及空气相关参数为特征参数。其关系如下:

$$R_n - \frac{\rho c_p L_{ai} (T_1 - T_a)}{r_a} - L_{ai} \rho \lambda \frac{w_f - w_a}{r_a - r_s} = 0, \quad (4)$$

式中: R_n 为辐射通量; c_p 为恒压比热容; r_a 为叶片空气动力阻力; r_s 为叶片气孔阻力; L_{ai} 为叶面积指数; T_1 、 T_a 分别为叶片以及空气温度; w_f 、 w_a 分别为叶片和空气绝对湿度; ρ 为空气密度; λ 为水的潜热量。

当内部空气流速 $u < 0.1$ m/s 时, 可用 G. S. Campbell^[11] 公式:

$$r_a = 840 \left(\frac{d}{|T_1 - T_a|} \right)^{0.25}; \quad (5)$$

当内部空气流速 $u > 0.1$ m/s, 则有

$$r_a = 220 \frac{d^{0.2}}{u^{0.8}}. \quad (6)$$

式(5)(6)中 d 为叶片特征长度。

叶片气孔阻力 r_s 可通过叶片气孔阻力法计算:

$$r_s = \frac{200(31 + s_g) [1 + 0.016(T_a - 16.4)^2]}{6.7 + s_g}. \quad (7)$$

式中 s_g 为整体太阳辐射。

式(4)中的第二项与第三项为作物的显热项与潜热项, 使用 Fluent 中用户自定义函数加载到作物区域。

2.4 数值模型

为避免模型中人为加载的边界条件改变计算模型中空气的流动状态, 加入外部计算域以消除这种影响。计算域尺寸为 52 m(长) × 46 m(宽) × 10 m(高), 大棚通风口距离外部计算域边界 20 m, 侧面距离计算外域 15 m。综合考虑模拟精度以及大棚的拱型结构, 对模型采用四面体网格划分。

3 材料物性与边界条件

3.1 材料物性

CFD 大棚模型材料物性参数如表 1 所示。

表 1 CFD 大棚模型材料物性参数

Table 1 Physical parameters of CFD greenhouse model materials

类别	密度 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	比热 / ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	导热系数 / ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	吸收 系数
薄膜	900	2 550	0.29	0.1
土壤	1 600	2 200	0.8	0.88
作物区域	700	60	0.173	0.06
空气	1.225	1 006.4	0.024	0.19
水汽	0.554 2	Piecewise-polynomial	0.026 1	-

3.2 边界条件

由于计算域内大棚结构影响及作物对空气流动的阻力作用, 可认为计算域内空气流动属于湍流流动, 因此选用 Realizable $k-\varepsilon$ 模型。假设壁面处空气流动符合近壁面标准函数, 将大棚壁面设置为半透明边界条件, 开启 DO 辐射模型并采用太阳光线追踪法, 输入湖南某地区的地理位置坐标(北纬 $27^\circ 03' 05''$, 东经 $113^\circ 01' 03''$, 东八区), 并使用 7 月 21 日 13 点的日照辐射条件, 内部发射率设为 0.7, 外部发射率为 0.8。将计算域内的空气看作干空气与水汽的混合物, 水汽与干空气仅发生单相扩散过程, 该过程可用 Fluent 中组分运输模型描述, 具体边界条件如表 2 所示。

表 2 计算域主要边界条件设置

Table 2 Setting of main boundary conditions of calculation domain

位置	边界	温度 /K	速度 /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	水汽质量分数
进口	速度入口	305.15	1	0.025 kg/kg
出口	压力出口	305.15		
大棚外地面	wall	305.15		地面温度下空气中水汽饱和质量分数
大棚内地面	wall	308.15		地面温度下空气中水汽饱和质量分数
大棚壁面	半透明边界			

4 网格无关性验证与模型验证

4.1 网格无关性验证

为了确保模拟结果的精度同时保证节约计算资源, 选取了粗网格(380万)、中等网格(490万)、精细网格(650万)3种不同网格数量进行模拟, 以反映不同网格数量下1号大棚内沿高度方向速度的变化情况, 如图2所示。可以看出粗网格与精细网格模拟误差较大, 而中等网格与精细网格模拟结果误差较小, 因此可以认为中等数量的网格可以在节约计算资源的条件下满足模拟结果的准确性。

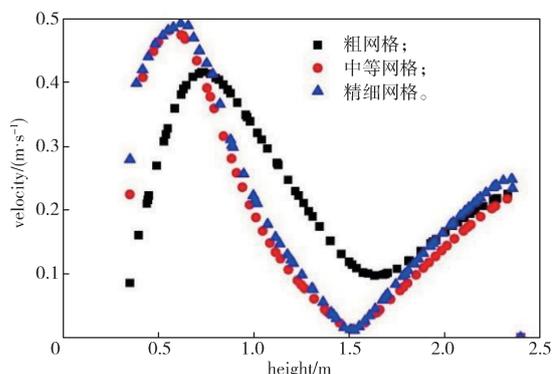


图 2 网格无关性验证结果

Fig. 2 Mesh independence verification

4.2 模型验证

为了验证数值模拟的真实性与可靠性, 将初步模拟结果中作物冠层区域8个监控点的作物蒸腾量与 T. Boulard^[1] 所做的实验结果进行对比, 得到图3所示结果。由图3可以看出模拟结果与实验结果变化趋势一致且误差较小, 最大误差控制在15%以内。由此可得出模拟结果能较为真实地反映出温室内部环境情况, 建立的数值模型有效。

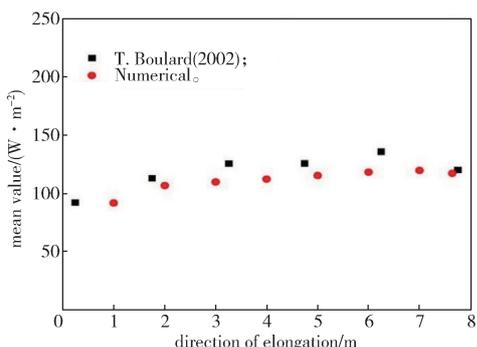
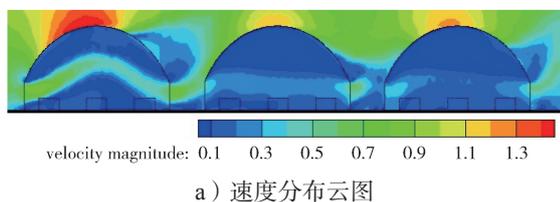


图3 数值模型验证

Fig. 3 Numerical model validation

5 模拟结果与分析

取大棚 Z=-8 m 处剖面速度云图、水汽质量分数云图、温度云图, 以及各大棚内部沿高度方向的速度、水汽质量分数、温度点线图进行分析, 结果如图4、图5所示。由图4a可知, 外界气流进入1号大棚内部后, 气流从作物冠层上方流过, 然后速度降低; 2号及3号大棚内部气流速度则相对较小。由图5a可以看出, 在垂直方向上, 2号大棚内气流流速在0~0.5 m的作物高度内呈升高趋势, 1号与3号大棚内气流流速在同高度内则呈现先增后降的趋势。上述现象产生的原因是空气流经通风口进入1号大棚时, 因初始流速较快, 空气在流经作物区域时, 作物冠层对气流的拖拽以及阻挡使气流抬高, 空气在作物上方区域流过。2、3号大棚内空气流速的降低则是由于1号大棚对气流的阻碍以及棚内作物的阻力拖拽, 空气到达2、3号大棚内部时流速降低; 而流入3号大棚内的气流又因2号大棚内作物冠层的拖拽效应使空气流速进一步降低, 这时在地面热压主导作用下, 3号大棚内作物生长高度范围内空气流速出现先增后减的现象。



a) 速度分布云图

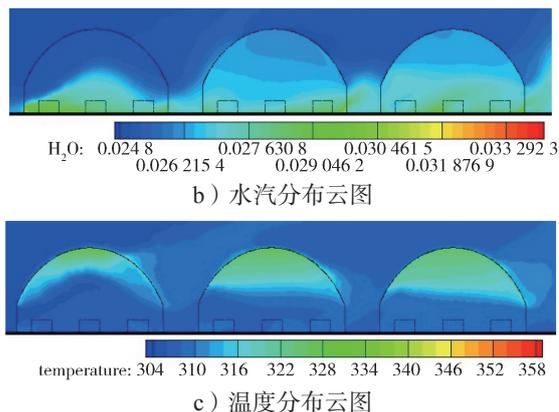
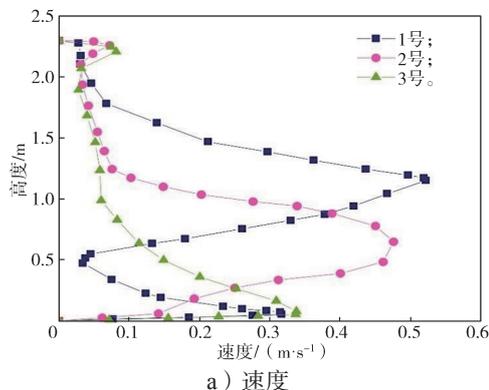
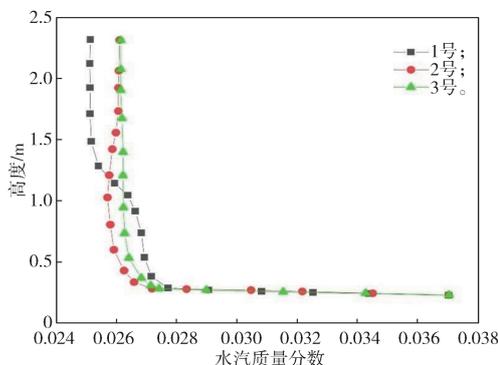


图4 Z=-8 m 截面处分布云图

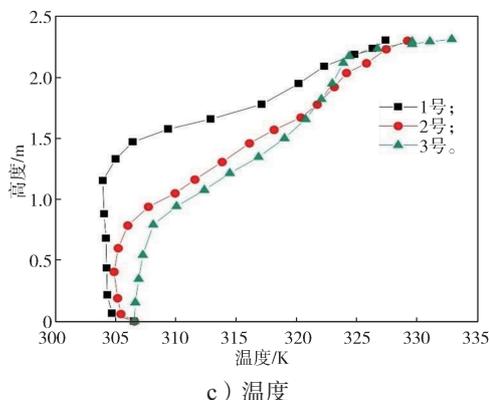
Fig. 4 Distribution cloud maps with Z=-8 m section



a) 速度



b) 水汽质量分数



c) 温度

图5 沿高度方向大棚内部速度、水汽质量分数、温度变化曲线

Fig. 5 Internal velocity, water vapor mass fraction and temperature changes of the greenhouse along the height direction

图 4b 为大棚群 $Z=-8$ m 处水汽质量分数分布云图, 图 5b 为大棚垂直高度上水汽质量分数分布点线图。从图 4b 可以看出, 1 号大棚与 2 号大棚内部水汽主要分布在作物区域所在空间, 但 2 号大棚内部水汽已出现向上部区域扩散的趋势; 3 号大棚内作物所在空间也分布着较高质量分数的水汽, 质量分数在 $0.29\sim 0.31$ kg/kg 之间, 其上部空间水汽质量分数较外部环境中的水汽质量分数高 0.031 kg/kg 左右, 整个内部空间水汽扩散明显。从图 5b 中可以看出在作物生长高度内, 1 号大棚作物区域内的水汽质量分数要高于 2 号以及 3 号大棚, 在离地 1 m 高度以上, 2 号以及 3 号大棚内的水汽质量分数则明显高于 1 号大棚。出现以上现象的原因, 是由于 1 号大棚内较快的气流流速阻碍了水汽向上部空间扩散, 其作物区域内的水汽滞留时间很短, 能及时被气流带走、扩散至大棚外部; 而 2 号以及 3 号大棚由于作物冠层区域空气流速较低, 导致作物区域的水汽不能及时被空气带走, 水汽在大棚内部的滞留时间延长, 致使水汽向大棚上部空间扩散。

图 4c 为大棚群 $Z=-8$ m 处剖面温度分布云图, 图 5c 为大棚内部垂直方向上温度分布点线图。从云图中可以看出, 1 号大棚内顶部区域及其附近空间的空气温度较高, 最高温度为 328 K, 作物区域的空气温度较低, 顶部区域与作物区域平均温差在 20 K 左右, 在进风口附近处空气温度则在 306 K 以下。2 号大棚上部空间温度较高, 高温区域范围较 1 号大棚有所扩大, 作物区内的平均温度较 1 号大棚内作物区域的平均温度升高 1 K 左右。3 号大棚作物区域的平均温度则达到了 312 K, 较 1 号大棚同区域内的平均温度高了 4 K 左右, 且高温区域范围进一步扩大。由图 5c 可看出, 在高度方向上, 1、2、3 号大棚内部的空气温度都逐渐升高, 但可明显看出 2 号与 3 号大棚在高度上的温度梯度大于 1 号大棚, 且 3 号大棚内温度上升最快。出现上述现象的原因是由于 1 号大棚内部作物冠层区域空气流速较快, 其内部产生的热量可及时被空气携带至外部, 而 2 号以及 3 号大棚作物冠层空气流速较慢, 其内部产生的热量在棚内滞留, 不能被及时带走, 且 2、3 号大棚还承接 1 号大棚内被空气携带过来的热量, 从而出现热量积累扩散, 致使作物区域的温度逐渐升高。

图 6 为大棚群内作物区域内的作物显热量 (a)、潜热量 (b)、作物区域温度云图 (c) (显热量与潜热量的单位为 W/m^2)。由图 6a、6b 可以看出, 沿着空气的流动方向, 大棚内作物的显热量与潜热量逐渐降低, 而在 3 号大棚内, 作物的显热量最低, 潜热量

也较 1、2 号大棚内作物的潜热量降低明显。图 6c 中, 作物表面温度则随着空气流动方向逐渐升高, 温度最高处出现在 3 号大棚内靠近出风口处的作物冠层区域, 约为 309.5 K。导致以上现象的原因是由于作物的显热是通过作物表面与空气的对流换热来达成, 经前文对大棚内部空气流动状态以及温度分布分析可知, 1 号大棚内的空气流速较大, 作物区域的温度较低, 作物与空气之间的对流通量明显, 因而显热量较大, 与之相反, 2、3 号大棚作物的显热量则逐渐降低。作物的潜热量跟空气的温度以及水汽质量分数有关。由前文分析可知, 3 号大棚内部作物区域温度较高且水汽滞留时间较长, 内部扩散明显, 作物的蒸腾作用受到抑制, 作物表面的热量难以散发, 从而导致作物表面温度逐渐升高, 而这也解释了图 6c 中大棚内作物区域的温度随空气流动方向增大的现象。

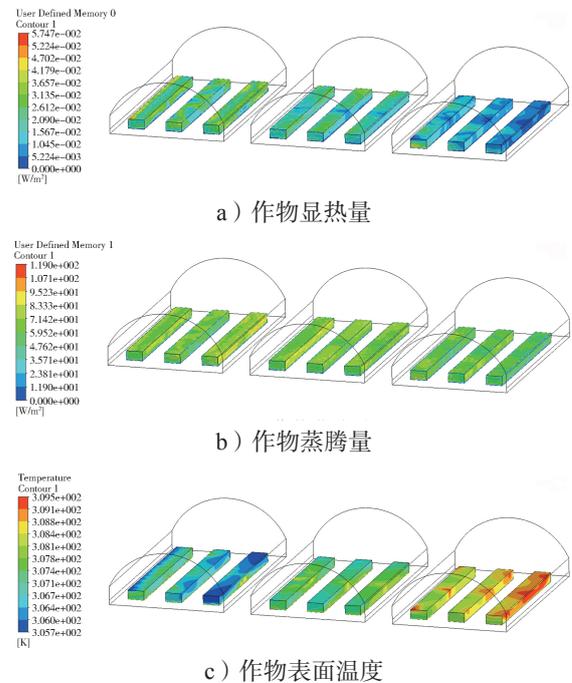


图 6 作物显热量、蒸腾量及表面温度云图

Fig. 6 Cloud maps of crop sensible heat, transpiration and surface temperature

6 结论

1) 1 号大棚内产生的热量以及水汽被空气携带进入 2 号以及 3 号大棚内部, 2 号及 3 号大棚内部的热量与水汽难以被空气带走稀释, 导致 2 号及 3 号大棚内产生了水汽与热量的积累, 从而使得 2 号以及 3 号大棚内作物区域的空气温度较高, 尤其是 3 号大棚内, 该现象更为显著。

2) 各大棚内作物的显热量与潜热量都随空气流动方向逐渐降低, 3 号大棚内作物的平均显热量最低,

潜热量也明显降低。

3) 3号大棚内作物的蒸腾作用受到抑制, 导致作物表面产生的热量难以散发, 使得大棚内作物表面温度显著升高, 最高处达 309.5 K。

参考文献:

- [1] BOULARD T, WANG S. Experimental and Numerical Studies on the Heterogeneity of Crop Transpiration in a Plastic Tunnel[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2002, 34(1/2/3): 173-190.
- [2] KACIRA M, SASE S, OKUSHIMA L. Optimization of Vent Configuration by Evaluating Greenhouse and Plant Canopy Ventilation Rates Under Wind-Induced Ventilation[J]. *Transactions of the ASAE*, 2004, 47(6): 2059-2067.
- [3] KACIRA M, SHORT T H, STOWELL R R. A CFD Evaluation of Naturally Ventilated, Multi-Span, Sawtooth Greenhouses[J]. *Transactions of the ASAE*, 1998, 41(3): 833-836.
- [4] PAPADAKIS G, MERMIER M, MENESES J F, et al. Measurement and Analysis of Air Exchange Rates in a Greenhouse with Continuous Roof and Side Openings[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1996, 63(3): 219-227.
- [5] 方 慧, 杨其长, 张 义, 等. 日光温室热压风压耦合自然通风流量的模拟 [J]. *中国农业气象*, 2016, 37(5): 531-537.
FANG Hui, YANG Qichang, ZHANG Yi, et al. Simulation on Ventilation Flux of Solar Greenhouse Based on the Coupling Between Stack and Wind Effects[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2016, 37(5): 531-537.
- [6] 程秀花, 毛罕平, 伍德林, 等. 栽有番茄的玻璃温室 内气流场分布 CFD 数值模拟 [J]. *江苏大学学报 (自然科学版)*, 2010, 31(5): 510-514.
CHENG Xiuhua, MAO Hanping, WU Delin, et al. CFD Simulations of Airflow Distributions Inside Glasshouse with Tomato Crops[J]. *Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition)*, 2010, 31(5): 510-514.
- [7] 李先庭, 李晓锋, 彦启森. 一种求解湿空气温度和相对湿度的 CFD 算法 [J]. *暖通空调*, 2000, 30(2): 66-68.
LI Xianting, LI Xiaofeng, YAN Qisen. CFD Algorithm for Wet Air Temperature and Relative Humidity Calculation[J]. *Journal of HV & AC*, 2000, 30(2): 66-68.
- [8] WILSON J D. Numerical Studies of Flow Through a Windbreak[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1985, 21(2): 119-154.
- [9] XU K, GUO X, HE J M, et al. A Study on Temperature Spatial Distribution of a Greenhouse Under Solar Load with Considering Crop Transpiration and Optical Effects[J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 254: 115277.
- [10] WANG S, BOULARD T. Predicting the Microclimate in a Naturally Ventilated Plastic House in a Mediterranean Climate[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 2000, 75(1): 27-38.
- [11] CAMPBELL G S. *An Introduction to Environmental Biophysics*[M]. New York: Springer, 1977: 159.

(责任编辑: 申 剑)