doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.01.031

不同通风方式日光温室微环境模拟与作物蒸腾研究

万　敏　杨　魏　刘竹青　徐晨曦　刘　东
（中国农业大学水利与土木工程学院，北京 100083）

摘要：日光温室后墙蓄热降低了通风降温效率，高温会刺激植物水分蒸腾，降低水资源利用率。本文以北京市通州区日光温室为研究对象，在原有的上、下通风口基础上，增设后墙通风口。基于 DO 辐射模型、组分输运模型和多孔介质模型建立了日光温室的计算流体力学（CFD）模型，探究了不同通风方式下温室微环境状况，并结合作物蒸腾模型分析获得了作物蒸腾特征。结果表明，气温变化会直接影响作物蒸腾强度，两者空间分布特征一致。中午温室高温，开启后墙、下通风口，较原来开启上、下通风口，气流走向相似，因减少部分蓄热墙体，降温效率提高 5.7%，蒸腾量下降 0.020 mm/h，开启后墙、上、下通风口，蒸腾量较原来下降 0.005 mm/h。开启后墙、上通风口，由于两通风口靠近一侧且距离作物较远，只能形成北侧局部降温，降温效率下降 10.3%，除湿效率较原来提高 5.7%，蒸腾量升高 0.035 mm/h。此外，在通风口组合中，将靠下的通风口设置在迎风方向，可减少外界来风能量、动量损失，以提高通风降温效率。研究结果可为日光温室微环境调节提供参考。

关键词：日光温室微环境；计算流体力学；通风方式；作物蒸腾
中图分类号：S625　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2024)01-0328-11　　**OSID**：

Microenvironment Simulation and Crop Transpiration Analysis of Solar Greenhouse with Different Ventilation Modes

WAN Min　YANG Wei　LIU Zhuqing　XU Chenxi　LIU Dong
(*College of Water Resources and Civil Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: The heat storage of back wall of the solar greenhouse reduces efficiency of ventilation and cooling. High temperature will stimulate plant water transpiration and reduce the utilization rate of water resources. Taking Beijing Tongzhou solar greenhouse as the research object, on the basis of the original upper and lower vents, the rear wall vents were added. Based on DO radiation model, component transport model and porous medium model, a computational fluid dynamics (CFD) model of solar greenhouse was established. The microenvironment of greenhouse under different ventilation modes was explored, and the transpiration characteristics of crops were obtained by combining crop transpiration model analysis. The results showed that the change of temperature would directly affect the intensity of crop transpiration, and the spatial distribution characteristics of the two were consistent. The high temperature of the greenhouse at noon, the opening of the back wall and the lower vent, compared with the original opening of the upper and lower vent, the airflow trend was similar, due to the reduction of part of the heat storage wall, the cooling efficiency was increased by 5.7%, and the transpiration was decreased by 0.020 mm/h, the opening of the back wall, the upper and lower vent, the transpiration was decreased by 0.005 mm/h. After opening the back wall and the upper vent, because the two vents were close to one side and far away from the crop, only the north side can be partially cooled, the cooling efficiency was reduced by 10.3%, the dehumidification efficiency was increased by 5.7%, and the transpiration was increased by 0.035 mm/h. In addition, in the combination of vents, the lower vent was set in the windward direction, which can reduce the energy and momentum loss of the external wind and improve the ventilation cooling efficiency. The results provided a reference for the regulation of microenvironment in solar greenhouse.

Key words: solar greenhouse microenvironment; computational fluid dynamics; ventilation mode; crop transpiration

收稿日期：2023-06-22　修回日期：2023-08-09
基金项目：国家自然科学基金项目(52179093)
作者简介：万敏(1999—)，女，硕士生，主要从事日光温室数值计算研究，E-mail：2930757210@qq.com
通信作者：杨魏(1982—)，男，教授，博士生导师，主要从事水利机械优化设计与水利机械流动理论研究，E-mail：wyang@cau.edu.cn

0　引言

日光温室是我国北方地区特有的温室类型，具有造价低、运行费用少、保温性好、效益高等特点[1]。温室微环境是指为满足温室内植物生长需求，所提供特定的温度、湿度、光照等条件。日光温室最显著的结构特征是后墙，后墙是影响温室内微环境差异的主要因素之一[2]。白天，温室后墙吸收并储存太阳辐射，夜间，在室内释放。夏季，后墙成为热源，造成热量堆积，为温室通风降温带来困难。高温会刺激植物水分蒸腾，加快水分的流失速度，导致作物失水加剧，这会给作物带来较大的水分压力，影响其生长发育。通过在日光温室后墙设置通风口，可为温室降温探索更优的通风方式。

计算流体力学（CFD）是分析温室室内空气流动和优化温室通风结构的有效工具。GOSMAN 等[3]在 1980 年首次将 CFD 运用于二维通风模拟。BAILLE 等[4]建立了蒸腾速率随气候变化的预测模型。佟国红等[5]用 CFD 方法模拟日光温室温度环境，属于国内较早的探索。近年来，基于 CFD 的温室温度湿度模拟[6-9]、自然通风方式[10-14]、墙体保温材料选择[15-17]等研究不断推进。此外，作物蒸腾是土壤-植物-大气连续体水分运移的一个重要环节，作物水分蒸腾过程是作物本身不同器官和所在环境相互作用、反馈影响的结果[18]，蒸腾过程取决于植物代谢、基质水分有效性和气候蒸腾需求[19]。温室的作物种植密度较高，在进行灌溉时，传统的均匀灌溉不仅浪费大量水资源，而且容易造成局部过湿，影响作物生长。因此，了解温室内作物蒸腾的空间分布特征，有助于采取精准灌溉的策略，根据作物的不同位置和生长状态给予适量水分和营养，从而提高水分利用效率和作物产量。同时，合理的灌溉策略也可以降低温室湿度，减少病害发生。

本文拟采用 DO 辐射模型、组分运输方程、多孔介质模型来建立大气-温室-作物的 CFD 数值模型，探究不同通风方式下的温室微环境状况，并结合温室内外热量平衡式、蒸腾计算式分析作物蒸腾空间分布特征，以期为日光温室降温除湿、作物灌溉提供理论依据。

1　试验设计

1.1　试验温室

试验温室位于北京市中国农业大学通州实验站（39°09′N，116°66′E），该温室坐北朝南，东西走向，长 74 m，跨度 8 m，后墙高 2.7 m，后坡长 2.3 m。温室共开设上、下两处通风口，通风口开度 0.2 m，覆膜材料为透明塑料 PE 膜，采用镀锌铁结构支撑，厚度约为 0.1 mm，后墙由 0.3 m 的砖墙和 0.15 m 的保温苯板组成，后坡是 0.15 m 的保温苯板。温室通风口处配备有 32 目防虫网。种植作物为红颜草莓，株高 0.14 m，株径 2.9 mm，叶面积指数 1.3，试验期处于草莓现蕾开花期，白天适宜生长温度 20 ~ 26℃，空气相对湿度不超过 60%。草莓栽培方式为：垄高 50 cm，垄面宽 40 cm，底宽60 cm，株距 20 cm。灌溉模式为一管两行滴灌。日光温室剖面如图 1 所示。

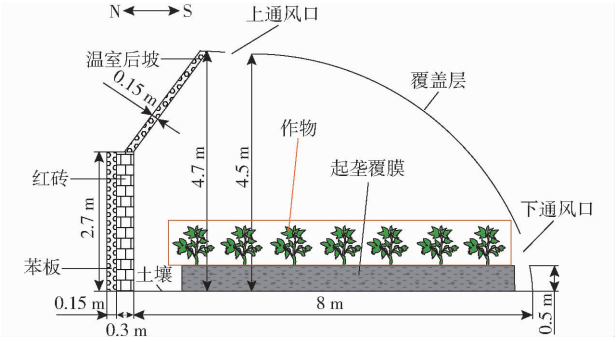

图 1　温室剖面图

Fig. 1　Greenhouse profile

1.2　试验方法

试验测试时间为 2022 年 10 月 22—29 日（选取晴天、阴天两种典型天气）。首先，测量温室基本尺寸和作物形态参数，了解温室外部形状、墙体材料、地面、植被和管理模式。然后，进行试验场地设计和仪器调试，采集数据。温室共设上下两处通风口，在试验期间，晴天，08:00—09:00 打开上通风口进行除湿，10:30—12:00 继续打开下通风口进行降温，18:00—18:30 关闭所有通风口，通风开度 40 cm；阴天，10:30—12:00 打开上通风口除湿，13:00—14:00 关闭上通风口进行保温，通风开度 10 cm。

在温室内均匀布置 14 个监测点，监测点主要分布在作物区，测点布置如图 2 所示。监测点 1 ~ 14 通过 COS-03 型温湿度记录仪监测温室空间点的温湿度，每 10 min 记录一次。监测点 P15、P16 通过 RS-WS-SC-2 型土壤速测仪监测室外土壤温度、含水率。监测点 M15 通过 TES-1332 型太阳光照度计监测室内太阳照度。监测点 M16 通过 TESTO-425 型风速测量仪监测距离地面 1.5 m 处的风速，每 1 s 记录一次。温室外的气象数据可通过室外空间气象站 M17 获得，地表温度和四周围护结构温度采用 TESTO-830-S1 型红外测温仪测量。由于温室东西走向长，考虑到不同时刻太阳照射角不同，因此分段测量墙体温度，以减小试验误差。各试验仪器相关参数如表 1 所示。

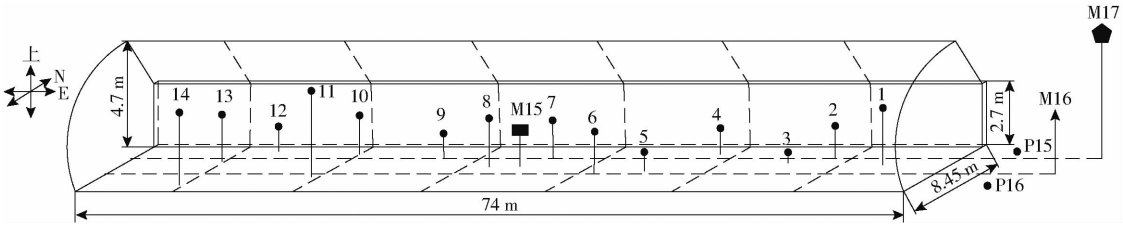

图 2 测点布置图

Fig. 2 Measuring point layout

表 1 试验仪器相关参数

Tab. 1 Test instrument related parameters

仪器/工具	型号	测量范围	精度	分辨率
温湿度记录仪	COS－03	温度：－20～60℃ 相对湿度：0～95%	温度：±0.1℃ 相对湿度：±2%	
干湿度计	272－A	－10～50℃	0.5℃	
太阳光照度计	TES－1332	0.1～2.0×10^5 lx	±5%	0.1 lx
风速测量仪	TESTO－425	0～30 m/s	0.1 m/s	0.01 m/s
土壤速测仪	RS－WS－SC－2	温度：－40～80℃ 含水率：0～100%	温度：±0.5℃ 含水率：±0.25%	温度：0.1℃ 含水率：0.1%
红外测温枪	TESTO－830－S1	－30～350℃	±1.5℃	0.1℃
卷尺		0～5 m	0.1 mm	
支架		0～2.1 m	0.1 mm	

1.3 试验分析

图 3 表示试验期间温室内外相关气象参数的变化情况，根据各种天气状况与太阳辐射照度的关系[20]，将 10 月 23 日确定为晴天，10 月 29 日确定为阴天，可以看到温度和相对湿度呈负相关，晴天室内外温度在 12：30—13：00 达到最高，室外平均气温 16℃，平均相对湿度 40%，室内由于后墙、土壤、地膜等吸热，日均气温 27℃，在 12：00 太阳照度达到最大值，而后慢慢降低。阴天温室内外湿度高，室外平均气温 13℃，平均相对湿度 70%，室内日均气温

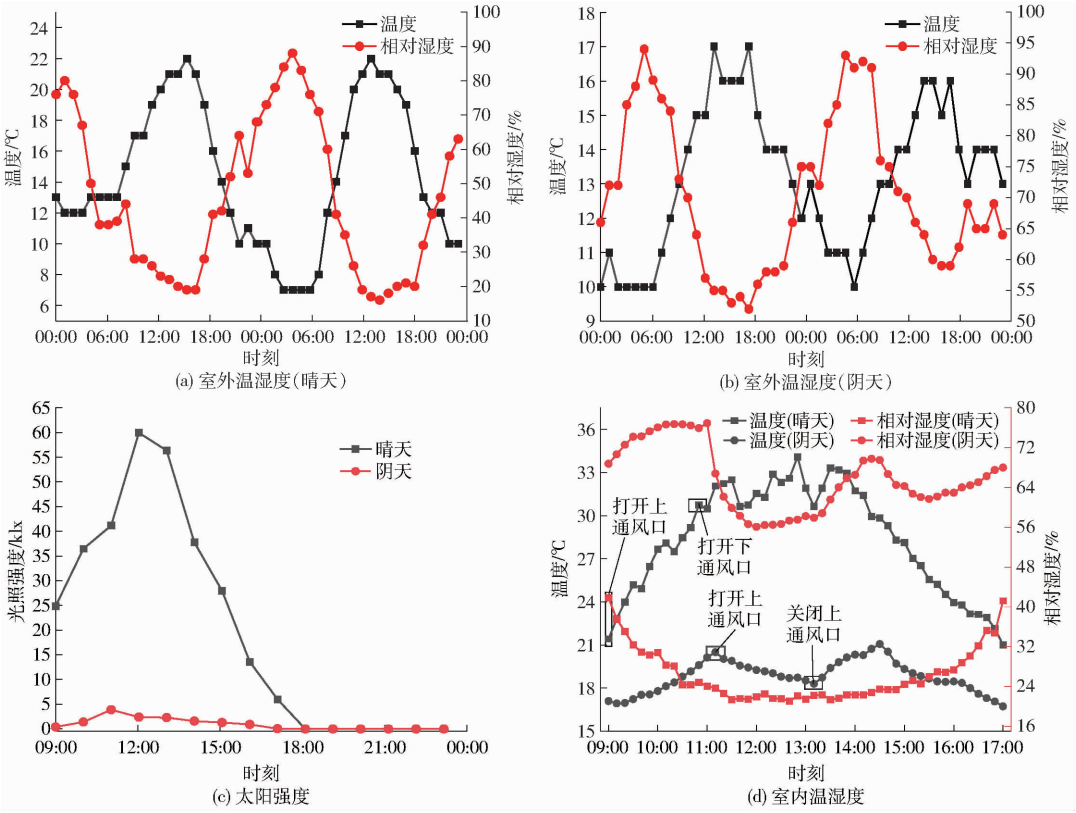

图 3 气象变化图

Fig. 3 Meteorological change maps

18℃，阴天太阳照度小，温室内温湿度受开窗影响大。试验期间，晴天 11:15 室内温度 30℃，因此打开上下通风口进行降温，阴天 11:10 室内相对湿度 72%，温室需要进行通风除湿，但考虑到室外温度低，因此只打开了上通风口，13:13，室内相对湿度 57%，温度 19℃，为防止温室内温度越来越低，需要关闭上通风口进行保温。

2　数值计算方法

2.1　计算域和网格划分

为减少周围不定因素干扰，在温室外设 108 m × 40 m × 222 m 的空气域。室内包括温室、砖墙、保温板和作物。以温室东北角为原点(0,0,0)，温室正西方向为 Z 轴正向，温室正南方向为 X 轴正向，高度向上为 Y 轴正向，在 Workbench 2020R2 Design Modeler 中建立三维实体模型。为提高通风降温效率，在通州温室已具有上、下通风口的基础上，增设后墙通风口，尺寸和上下通风口一致。如图 4 所示，设置 4 种通风方式：开启上、下通风口；开启后墙、上通风口；开启后墙、下通风口；开启后墙、上、下通风口。此外，设置南风、北风、东风 3 种不同风向。

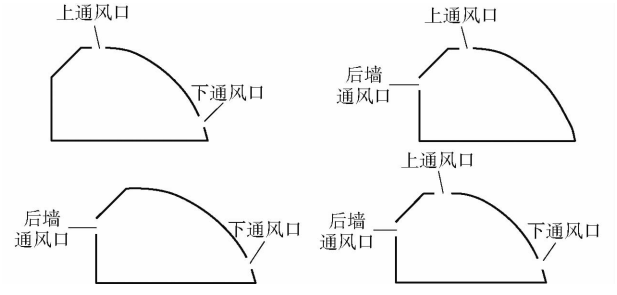

图 4　4 种通风方式

Fig. 4　Four ventilation methods

网格划分总体思路是：在温室内布置足够的网格，以捕捉主要的流动结构，而在温室外的空气区域，由于流态相对简单，因此可以布置粗一些的网格。利用 Mesh 将计算域划分为四面体网格，空气区域单位尺寸与温室区域单位尺寸之比为 10:1，对作物、后墙、后坡进行扫掠，网格如图 5 所示。作物建模时应满足 2 个假设：①各株作物间不存在异质性。②草莓株高低，不考虑叶片层的形状交错。在流场梯度变化较大的通风口进行局部网格加密，以便捕获更详细的流场特征，共生成网格约 3.3×10^6，节点数约 6.8×10^5，平均网格质量 0.847 7，平均网格扭曲度 0.221 1，网格无关性验证如图 6 所示。

2.2　CFD 模型

2.2.1　控制方程与墙体热平衡

假设近壁处气体流动符合标准壁面函数，温室

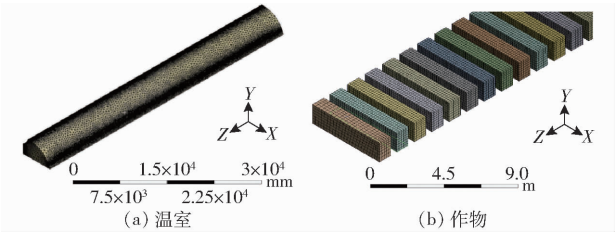

图 5　三维网格划分

Fig. 5　Three dimensional mesh generation

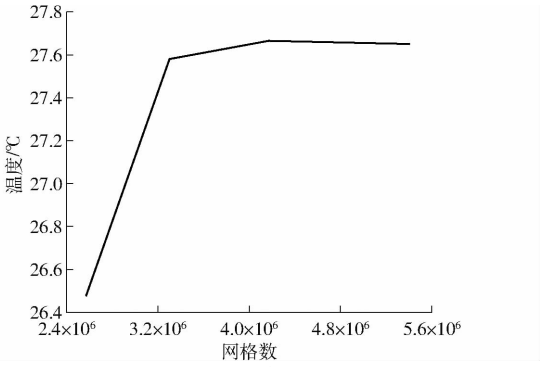

图 6　网格无关性分析

Fig. 6　Grid independence verification

在自然通风过程中的室内气流为湍流，数值计算采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型，控制方程包括质量守恒方程、动量守恒方程、k(湍动能)方程和 ε(耗散率)方程，这些方程都可以写成通用形式[21]

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t}+\mathrm{div}(\rho\nu\phi)=\mathrm{div}(\Gamma\mathrm{grad}\phi)+S \quad (1)$$

式中　ϕ——通用变量

ρ——流体密度，kg/m^3

ν——流体速度，m/s

Γ——广义扩散系数

S——广义源项

墙体热平衡是室内砖墙吸收太阳辐射，通过保温板减少热量流失从而储存起来的状态。假设保温板与砖墙之间不存在热阻，因此，壁面温度和热通量在界面处是连续的[22]，则

$$T_i=T_{i+1} \quad (i=1,2,\cdots,N-1) \quad (2)$$

$$\lambda_i\frac{\partial T_i}{\partial x_i}=\lambda_{i+1}\frac{\partial T_{i+1}}{\partial x_{i+1}} \quad (i=1,2,\cdots,N-1) \quad (3)$$

式中　N——墙体层数

T——内墙温度，℃

λ——不同墙体材料导热系数，W/(m·K)

墙体的三维非稳态导热微分方程为[22]

$$\frac{\partial^2 T_i}{\partial x_i^2}+\frac{\partial^2 T_i}{\partial y_i^2}+\frac{\partial^2 T_i}{\partial z_i^2}=\frac{1}{a_i}\frac{\partial T_i}{\partial t} \quad (i=1,2,\cdots,N) \quad (4)$$

其中

$$a=\frac{\lambda}{c_p\rho} \quad (5)$$

式中　a——墙体热扩散系数，m/s

c_p——比热容，J/(kg·K)

2.2.2 辐射模型与组分运输模型

太阳辐射是研究温室湿热分布、影响作物蒸腾的重要因素,在模拟过程中应该考虑室内与室外的辐射传热过程,选择太阳射线跟踪法来加载太阳模型。加载离散坐标 DO 辐射模型,计算温室覆盖层、屋顶和墙体的辐射和对流耦合交换,该模型求解有限个离散立体角的辐射传递方程(RTE),每个角都与全球笛卡尔系统中固定的矢量方向相关,而不是添加额外的热源[23-25]。采用射线示踪法(Solar ray tracing)添加时间、经纬度及天气状况,DO 模型可写作

$$\frac{\mathrm{d}I_\lambda}{\mathrm{d}S}+(\alpha_\lambda+\sigma_{\lambda,d})I_\lambda=\alpha_\lambda n^2 I_{\lambda,T}+\frac{\sigma_{\lambda,d}}{4\pi}\int_{\Omega=0}^{4\pi} I_\lambda^*\varphi_\lambda^*\,\mathrm{d}\Omega^* \tag{6}$$

式中 $\frac{\mathrm{d}I_\lambda}{\mathrm{d}S}$——通过单位厚度的彩色亮度

$(\alpha_\lambda+\sigma_{\lambda,d})I_\lambda$——外散射和吸收引起的辐射衰减

$\alpha_\lambda n^2 I_{\lambda,T}$——每单位厚度获得的排放亮度增益

$\frac{\sigma_{\lambda,d}}{4\pi}\int_{\Omega=0}^{4\pi} I_\lambda^*\varphi_\lambda^*\,\mathrm{d}\Omega^*$——扩散亮度增益

空气是大气-温室-作物之间进行热传递和能量交换的媒介,温室内的空气主要是由水蒸气和干空气组成的混合气体。自然通风过程中,室内湿空气随气流流动与室外环境不断进行对流和扩散,数值计算时假设温室内外空气含水率趋于稳定状态。加载 Species Transport,添加 H_2O(蒸汽)并设置其质量分数,组分输运守恒方程[26]为

$$\sum S_S=0 \tag{7}$$

$$\frac{\partial(\rho C_S)}{\partial t}+\mathrm{div}(\rho\boldsymbol{u}C_s)=\mathrm{div}(D_S\mathrm{grad}(\rho C_S))+S_S \tag{8}$$

式中 C_S——组分 S 体积浓度

D_S——组分扩散系数

$\boldsymbol{u}$——流体速度矢量

S_S——系统内部单位时间内单位体积通过化学反应产生的该组分的质量,即生产率

2.2.3 多孔介质模型

将作物设置为多孔介质,多孔介质是由固体骨架和骨架间充满的流体组成的多项物体,且流体可以是气体,也可以是液体[27-28]。多孔介质的相关参数主要有孔隙率 ε_1、渗透率、粘性阻力系数 K_d、惯性阻力系数 C_2。

$$\varepsilon_1=\frac{V_f}{V} \tag{9}$$

$$C_2=\frac{3.5(1-\varepsilon_1)}{d\varepsilon_1^2} \tag{10}$$

$$K_d=\frac{150(1-\varepsilon_1)^2}{d^2\varepsilon_1^3} \tag{11}$$

式中 V_f——流体所占的空间体积,m^3

V——多孔介质总体积,m^3

d——代表性单元体平均直径,m

在动量方程中以源项表示对空气运动的阻力,则

$$S_\Phi=-\frac{\rho_a C_f}{K^{0.5}}v_w^2=-\rho_a L_{AD}C_d v_w^2 \tag{12}$$

式中 ρ_a——空气密度,kg/m^3

L_{AD}——叶面积密度,m^2/m^3

C_d——阻力系数,取 0.32

v_w——风速,m/s

K——多孔介质的渗透系数

C_f——非线性动量损失系数

2.2.4 蒸腾量计算

根据 FAO56 手册,充分供水条件下,单作物系数法计算作物蒸腾量

$$ET=k_c ET_0 \tag{13}$$

式中 k_c——作物系数

ET_0——参考作物蒸腾量,mm/d

设施作物蒸腾量是精准灌溉的基础[29]。自然通风下,温室中空气动力阻力 $r_a=109.40$ s/m,参考广泛用于温室作物蒸腾计算的 ET_0 修正式[30],根据文献[31]研究,温室中空气动力阻力 $r_a=295$ s/m,$ET_0(F)$ 方程为

$$ET_0=\frac{0.408\Delta(R_n-G)+\gamma\frac{1\,713}{T+273}V_{PD}}{\Delta+1.64\gamma} \tag{14}$$

$$ET_0(F)=\frac{0.408\Delta(R_n-G)+\gamma\frac{628}{T+273}V_{PD}}{1+1.24\gamma} \tag{15}$$

式中 R_n——净辐射,$MJ/(m^2\cdot d)$

G——地面热通量,$MJ/(m^2\cdot d)$

γ——湿度计常数,kPa/K

V_{PD}——饱和水汽压差,kPa

T——空气温度,℃

Δ——饱和水汽压随温度变化曲线斜率,kPa/K

根据文献[32]得

$$\Delta=4\,158.6\times\frac{0.610\,7\mathrm{e}^{\frac{17.74T}{T+239}}}{(T+239)^2} \tag{16}$$

饱和水汽压差 V_{PD} 可以表现为温度与相对湿度

的函数关系[33]

$$V_{PD}=0.610\,78\mathrm{e}^{17.269T/(T+237.3)}(1-R_H) \quad (17)$$

式中　R_H——相对湿度，%

根据 FAO56 手册及文献[34]确定草莓的作物系数 k_c 为

$$k_c=k_{c\text{-table}}+0.04(u_2-2)-0.04(R_{H\min}-45)+\left(\frac{h}{3}\right)^{0.3} \quad (18)$$

式中　$k_{c\text{-table}}$——查表所得系数，开花现蕾期草莓取 0.85

u_2——2 m 高处风速，m/s

$R_{H\min}$——日最低相对湿度，%

h——生育期内作物平均最大高度，m

滴灌条件下温室番茄 k_c 与叶面积指数 LAI 关系式[35]为

$$k_c=0.153\,3LAI+0.549\,7 \quad (19)$$

2.3　边界条件

根据 2022 年 10 月 23 日（晴天）12:00、10 月 29 日（阴天）12:00 的实测数据确定模型边界和初始条件。10 月 23 日中午，太阳辐射 60 klx，室外温度 21℃，室外相对湿度 27%，土壤含水率 29.2%，西北风，0.5 m/s，上、下通风口都打开。10 月 29 日中午，太阳辐射 3 klx，室外温度 16℃，室外相对湿度 67%，土壤含水率 26.1%，南风，0.25 m/s，只开上通风口。

在三维模型中，顶域表面设置为对称面（Symmetry），底域被定义为另一个与地面相对应的防滑墙，东南面为速度入口（Velocity inlet），西北面为压力出口（Pressure outlet），温室覆盖面为半透明壁面（Semi-transparent），地面及四周围护结构为壁面边界（Wall），温室内通风口设置为内部（Interior）边界条件，有关材料热物理性能如表 2 所示。

表 2　材料的热物理性能

Tab. 2　Thermophysical properties of materials

材料	密度/(kg·m^{-3})	导热系数/(W·m^{-1}·K^{-1})	比热容/(J·kg^{-1}·K^{-1})	折射率	吸收系数	散射系数
空气	1.18	0.024 2	1 006.43	1.00	0	0
土壤	1 900	2.0	2 200	1.92	0.5	1
作物	970	0.2	3 060	1.50	0.9	0
红砖	1 965	0.793	1 118	1.20	0.6	0
苯板	9	0.032	1 246	1.10	0.3	0
PE 膜	923	0.38	2 300	1.52	0.2	0.3

2.4　计算策略

通过 Fluent 进行计算求解，采用标准壁面函数，二阶迎风离散方案，采用 SIMPLE 算法对压力动量和速度动量耦合进行离散。能量方程的残差收敛准则小于 10^{-6}，连续性方程和 $k-\varepsilon$ 方程的残差收敛准则小于 10^{-3}。计算时间步长为 1 s，计算方式选用稳态 250 步 + 非稳态 2 000 步，其中非稳态中的一步迭代计算 5 次，数值计算结果通过 Fluent Post 和 Tecplot 进行后处理分析。

3　结果和分析

3.1　模型检验

为检验 CFD 模型的可靠性，选择自然通风下 1 个典型晴天（10 月 23 日），1 个典型阴天（10 月 29 日），试验数据与模拟值进行比较，结果如图 7 所示。

10 月 23 日，温度模拟值和实测值相对误差 2%，单个测量点最高相差 1.6℃，标准差为 1.3℃；相对湿度模拟值和实测值相对误差 5.9%，单个测量点最高相差 1.8%，标准差为 1.3%。10 月 29 日，温度模拟值和实测值相对误差 0.5%，单个测量点最高相差 0.7℃，标准差为 0.4℃；相对湿度模拟值

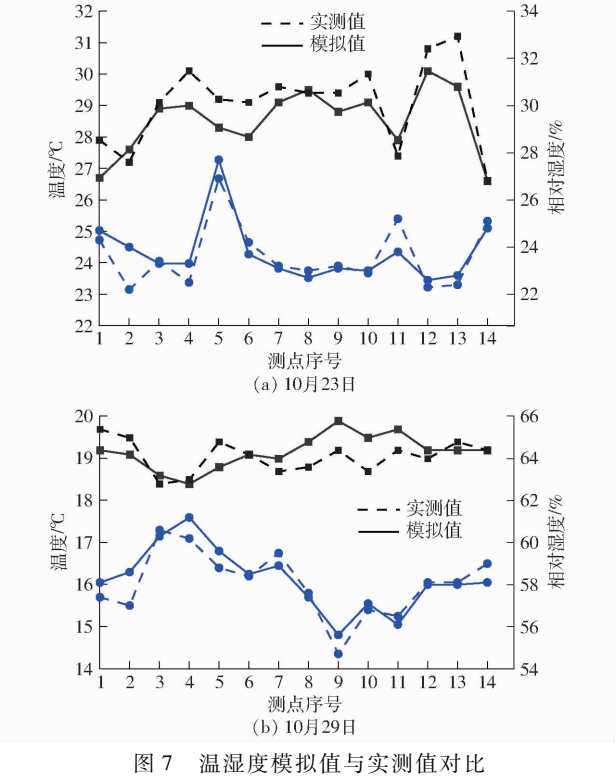

图 7　温湿度模拟值与实测值对比

Fig. 7　Comparisons of simulated and experimental values

和实测值相对误差 0.3%，单个测量点相对湿度最高相差 1.65%。总体上看，实测值与模拟值吻合良好，说明所建 CFD 模型有效，可以准确模拟温室内温湿度变化。

根据王淼[36]对北方日光温室内外气象要素、作物种植生长状况及作物蒸腾的分析，结合本文中蒸腾计算模型，对作物蒸腾进行模拟。如图 8 所示，模拟时间是 12 月 16—25 日，时刻是 12:00，其中，基于 ET_0 公式计算的 ET 结果与实测值的相关系数为 0.95，基于 $ET_0(F)$ 公式计算的 $ET(F)$ 结果与实测值的相关系数为 0.97，因此在后续蒸腾计算中采用 $ET_0(F)$ 公式。

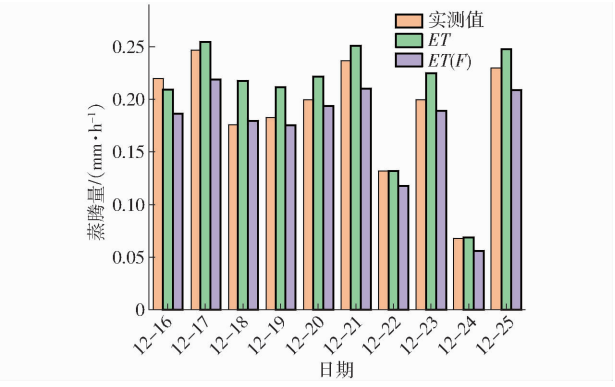

图 8 蒸腾量模拟值与实测值对比

Fig. 8 Comparison of simulated and measured values of transpiration

3.2 温室湿热环境及作物蒸腾分析

3.2.1 气流速度

不同通风方式会形成不同的室内气流轨迹和速度，如图 9 所示。外界冷空气进入温室，由于其密度大，开始下沉。通风口间面积小，气流速度快。开启上、下通风口时，空气由下通风口进、上通风口出，各截面分布规律相同。4 种通风方式下，由于作物的惯性阻力，作物区风速小，除开启上、下通风口，其余通风方式温室各截面均出现了明显涡流。图 10 为开启后墙、上通风口的日光温室在面对不同方向来风时气流场的变化，各通风口处都会有内外气体交换，但当通风稳定后，由于外界气流密度大，易下沉，主要从后墙通风口进，温室内部空气温度高，易上浮，从上通风口出。

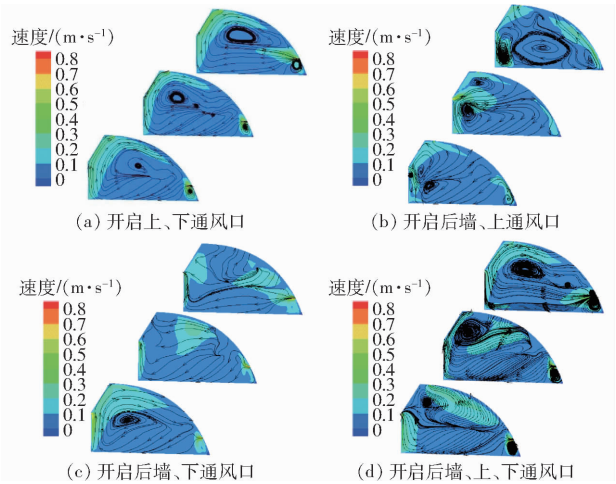

图 9 速度分布云图(从上至下分别是 Z 为 12、38、65 m 截面)

Fig. 9 Velocity distribution nephograms

3.2.2 温室内温湿度分布

温度主要受太阳辐射和通风调节的影响，太阳辐射是室内温度升高的主要原因，通风可以及时排出热空气，保证室内气温适宜。选取 3 种通风方式下 Z 为 12、38、65 m 处的温度云图进行分析，如图 11 所示，砖墙的比热容比空气小，导热系数比空气大，因此温室后墙内壁温度最高。开启上、下通风口，室内温度受气流轨迹影响，东西分布均匀，作物区北侧温度达 29℃，说明仅开启上、下通风口，后墙产生的热量无法及时排放。开启后墙、上通风口及 3 个通风口全开，易形成涡流，室内外空气交换不及时，温度仍高。说明增加后墙通风口不一定能提高降温速率，若两通风口靠近一侧，且通风口远离作物冠层，只能带来一侧局部降温，且降温效率更低。3 个通风口打开，由于通风面积增加，其降温效率有所提高，但形成涡流较多，比开启后墙、下通风口效率更低。开启后墙、上通风口时，东侧温度高于西侧，此时温度分布主要受太阳辐射影响，较开启上、下通风口，降温效率下降 10.3%。开启后墙、下通风口，整体温度最低，较开启上、下通风口，降温效率提高 5.7%。说明将上通风口换为后墙通风，可以减少部分墙体的热量堆积，减少涡流，从而提高作物

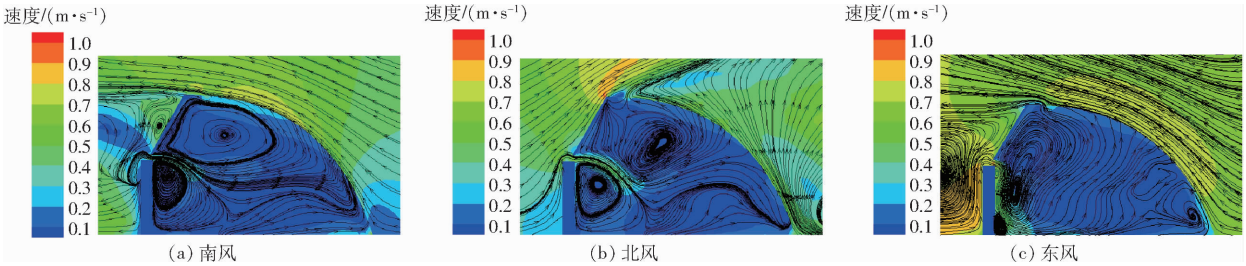

图 10 速度分布云图(Z = 37 m)

Fig. 10 Velocity distribution nephograms(Z = 37 m)

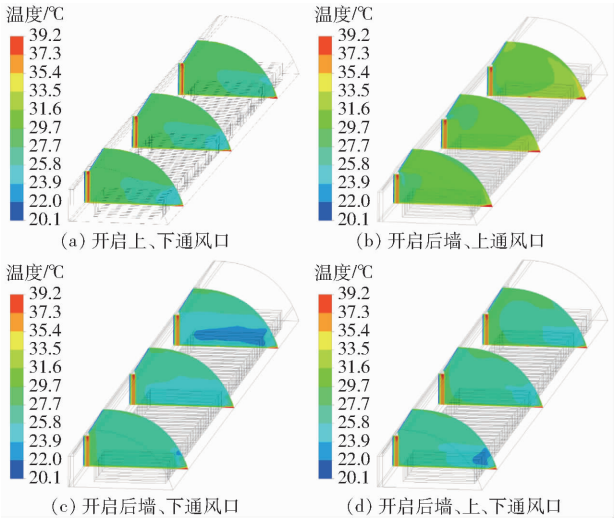

图 11　温度分布云图(从上至下分别是 Z 为 12、38、65 m 截面)

Fig. 11　Temperature distribution clouds (From top to bottom were Z = 12 m, 38 m, 65 m cross section)

区的通风降温速率,此时作物区受东侧作物对气流的削弱作用,温度东侧低西侧高。

图 12 为 4 种通风方式分别在通风口开启 2、30 min 的相对湿度分布,随着外界气流进入温室,温室内的相对湿度会逐渐下降。通风 2 min 时,室内相对湿度空间分布相差较大,开启上、下通风口及开启后墙、上通风口除湿效果较好,整体展现出进风口相对湿度低,靠近薄膜处相对湿度高的趋势。当通风 30 min 时,温室内外相对湿度差异减小,开启后墙、上通风口除湿效果最好且更均匀,较开启上、下通风口,降温效率提高 5.7%。其余 3 种通风方式相对湿度分布基本一致,整体展现出当空气中含水率一致,温度越高,相对湿度越低的趋势。

图 13 为当开启后墙、上通风口时,温室在 3 种不同风向下的温度分布云图,可以看出北风下的温度最低,这是由于对后墙通风口而言,北风属于迎风方向,而南风、东风在流进后墙通风口前,要流经日光温室,且外界风向与温室进风方向相反,此过程会

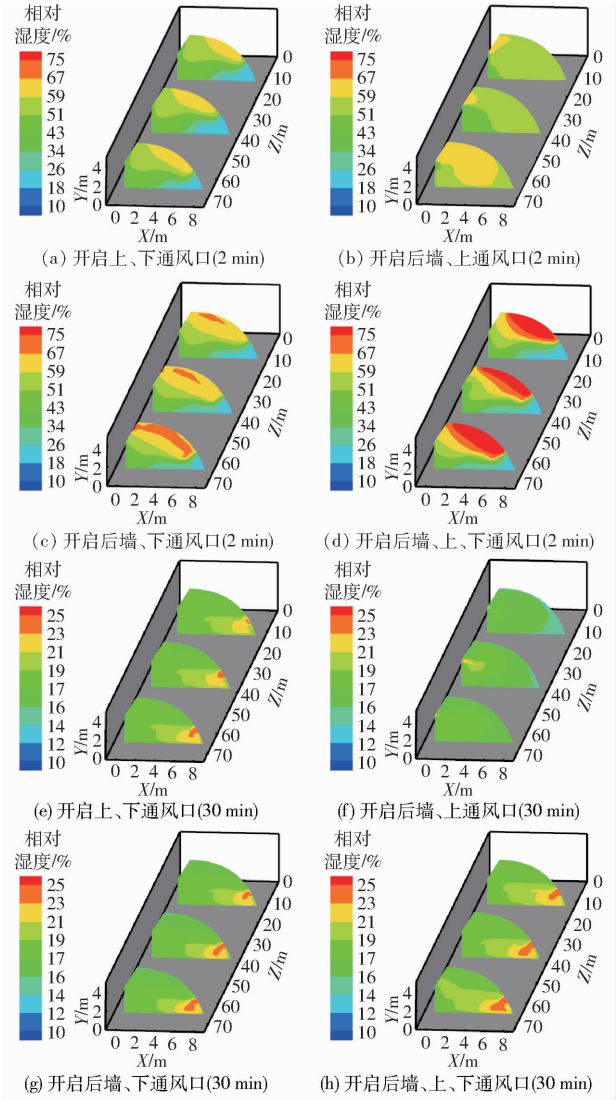

图 12　相对湿度分布云图

Fig. 12　Humidity distribution clouds

造成能量和动量损失,以致于降温效果差。2 种通风口的组合中,可以选择将靠下的通风口开在迎风方向,以增加温室通风量,提高通风降温效率。

3.2.3　作物蒸腾分析

蒸腾是指作物内部水分从根部经过植物的导管系统,流向叶片,然后通过气孔从叶片释放到大气中

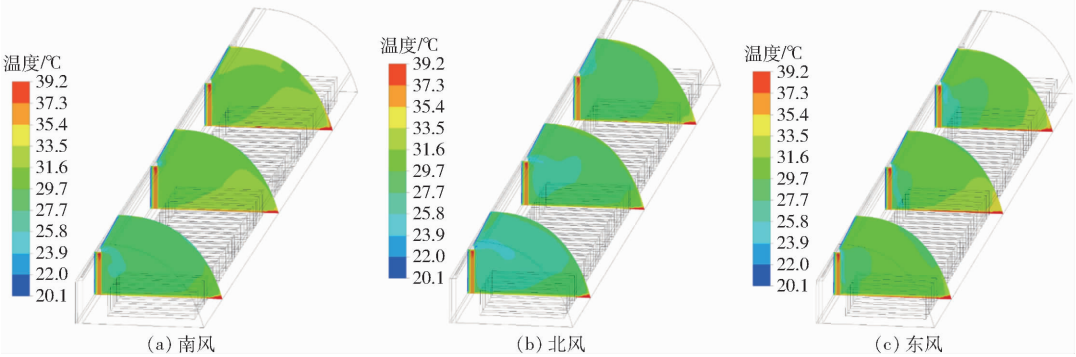

图 13　3 种风向下温度分布云图 (从上至下分别是 Z 为 12、38、65 m 截面)

Fig. 13　Temperature distribution cloud diagrams in three wind directions (From top to bottom were Z = 12 m, 38 m, 65 m cross section)

的过程。蒸腾受太阳辐射、温度、相对湿度、土壤含水率等多种因素制约，其中太阳辐射与经纬度位置、时间、天气状况有关。图 14 为不同通风方式下作物蒸腾量的空间分布图，开启上、下通风口及开启后墙、上、下通风口分布趋势相似，以开启上、下通风口为参照，开启后墙、下通风口作物蒸腾量低 0.02 mm/h，开启后墙、上通风口作物蒸腾量高 0.035 mm/h，增开后墙通风口，蒸腾量下降 0.005 mm/h。为进一步分析作物蒸腾量变化，选取 Z 为 12、38、65 m 作物区蒸腾云图进行分析，如图 15 所示，地面将光能几乎全转变为热量，且地面热量不能像空气一样产生对流，地面积累热量多，温度高，作物蒸腾强。开启上、下通风口及开启后墙、上、下通风口作物蒸腾东西分布较均匀，受气流影响，北侧高于南侧，开启后墙、上通风口作物蒸腾受太阳辐射影响，由东侧向西侧递减，开启后墙、下通风口蒸腾变化沿着风向递增。

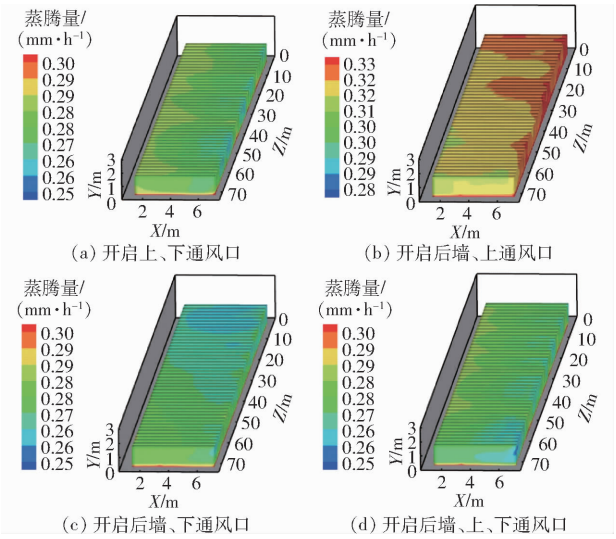

图 14 作物蒸腾量空间分布

Fig. 14 Transpiration distribution clouds

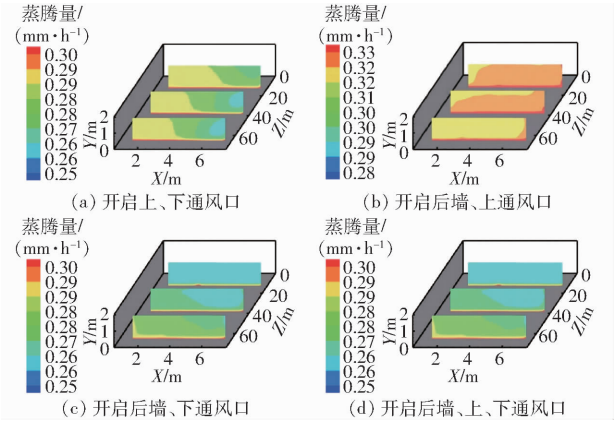

图 15 蒸腾量截面分布图

Fig. 15 Transpiration distribution cross sections

4 种不同通风方式下，选择作物区不同空间点的蒸腾量进行比较，如图 16 所示。开启后墙、上通风口蒸腾量最高，其余 3 种通风方式作物蒸腾量走向相似，说明上通风口和后墙通风口对温室整体环境影响趋势也相似。

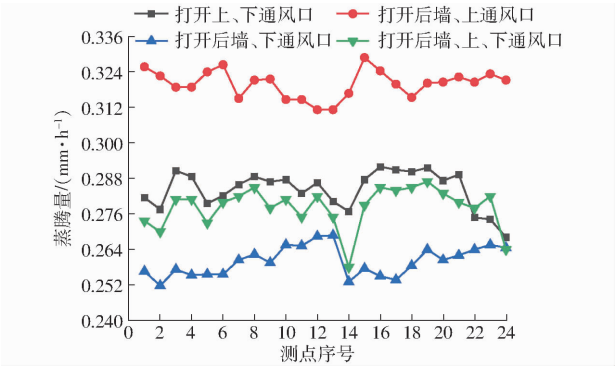

图 16 不同测点蒸腾量

Fig. 16 Transpiration value of different measuring points

4 讨论

利用 DO 辐射模型、组分运输方程和多孔介质模型建立了大气-温室-作物的 CFD 数值模拟模型，并对模拟结果与实测值进行了对比。结果显示，模拟值与实测值的温度最大误差为 1.6℃，平均相对误差为 2%；相对湿度最大误差为 1.3%，平均相对误差为 3.1%；蒸腾量最大误差为 0.04 mm/h，二者吻合良好。

研究 4 种通风方式下温室微环境和作物蒸腾特征后发现：开启后墙和下通风口的组合整体降低温室温度效果最好。外界气流通过下通风口进入温室与地面热空气形成对流，使作物区的南侧降温；室内热流通过后墙通风口流出，形成作物区的北侧降温，并减少了涡流的生成。相比之下，开启后墙和上通风口的组合由于两通风口距离较近，形成对流，降温效率较低，但除湿效果较好。因此，在考虑通风降温时，为减少能量和动量的损失，建议将进风口设置在迎风方向。

为了更具体地了解日光温室的相对湿度变化，比较了通风 2 min 和 30 min 的相对湿度变化。结果显示，2 min 时室内外相对湿度和室内相对湿度的空间分布差异明显，通风口附近的相对湿度较低。而在 30 min 时，4 种通风方式的相对湿度差异逐渐减小，并趋近于室外相对湿度。只有开启后墙和上通风口的组合受室内较高温度的影响，相对湿度较低。因此，对于需要除湿但不需要降温的温室，建议选择开启后墙和上通风口的方式。

在计算作物蒸腾量时，本文基于参考作物蒸发蒸腾公式 ET_0 和 $ET_0(F)$ 进行了比较，结果表明，$ET_0(F)$ 具有更高的精度，特别适用于温室内风速极低的条件。在后续的蒸腾分析中，4 种通风方式下，作物蒸腾的空间分布趋势与温度基本一致。此时，

温室内的相对湿度分布较均匀，风速较低，因此气温的变化直接影响作物蒸腾的强度和空间分布。开启后墙和上通风口的组合导致最高的蒸腾量，这是因为在自然通风条件下，温室内风速非常低，通风通过影响温度和相对湿度间接影响作物蒸腾。这种情况下，室内热量无法及时排出，导致环境温度升高，进而加快水分的蒸发速度，使作物失去水分更快，促使蒸腾速率增加，不利于作物生长。因此，开启后墙和上通风口的组合不能有效降低温室温度，反而会加强蒸腾作用。

5　结论

（1）通过添加墙体传热方程、作物多孔介质模型、在温室外设置空气域等方法可以让数值模拟更接近试验状态，从而减小试验与数值模拟之间的误差，结合作物蒸腾模型可建立基于 CFD 的作物蒸腾计算和分析方法。

（2）日光温室处于高温状态，开启后墙、下通风口，较原来开启上、下通风口，气流规律一致，因减少部分蓄热墙体，降温效率提高 5.7%；开启后墙、上通风口，由于两通风口靠近一侧且距离作物较远，只能形成北侧局部降温，降温效率下降 10.3%，除湿效率较原来提高 5.7%。

（3）作物蒸腾与温室中太阳辐射、温度、相对湿度密切相关，4 种通风方式下，作物蒸腾空间分布特征与温度一致。开启上、下通风口，作物蒸腾东西均匀分布，增开后墙通风口，蒸腾量下降 0.005 mm/h，开启后墙、下通风口，蒸腾量较原来开启上、下通风口下降 0.020 mm/h，呈现沿风向递增的空间分布特征。开启后墙、上通风口，蒸腾量较原来上升 0.035 mm/h，受太阳辐射影响，呈现东高西低的分布特征。

参　考　文　献

[1] 梁浩，方慧，杨其长，等. 日光温室后墙蓄放热帘增温效果的性能测试[J]. 农业工程学报，2013，29(12)：187－193.
LIANG Hao，FANG Hui，YANG Qichang，et al. Performance test on the warming effect of heat storage and release curtain on the back wall of solar greenhouse[J]. Transactions of the CSAE，2013，29(12)：187－193.(in Chinese)

[2] HE X L，WANG J，GUO S R，et al. Ventilation optimization of solar greenhouse with removable back walls based on CFD[J]. Computers and Electronics in Agriculture，2018，149：16－25.

[3] GOSMAN A D，NIELSEN P V，RESTIVO A，et al. The flow properties of rooms with small ventilation openings[J]. Journal of Fluids Engineering-transactions of the ASME，1980，102(3)：316－323.

[4] BAILLE M，BAILLE A，LAURY J C. A simplified model for predicting evapotranspiration rate of nine ornamental species *vs* climate factors and leaf area[J]. Scientia Horticulturae，1994，59(3)：217－232.

[5] 佟国红，李保明，DAVID M Christopher，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.
TONG Guohong，LI Baoming，DAVID M Christopher，et al. Preliminary study on simulation of temperature environment in solar greenhouse by CFD method[J]. Transactions of the CSAE，2007，23(7)：178－185.(in Chinese)

[6] 孙树鹏，董朝阳，黎贞发，等. 基于 CFD 的不同环境温度下日光温室内部温度变化研究[J]. 天津农业科学，2020，26(10)：43－47.
SUN Shupeng，DONG Chaoyang，LI Zhenfa，et al. Study on the internal temperature change of solar greenhouse under different ambient temperatures based on CFD[J]. Tianjin Agricultural Sciences，2020，26(10)：43－47.(in Chinese)

[7] 王志斌. 日光温室中土壤-空气换热器作用下热湿环境的研究[D]. 太原：太原理工大学，2018.
WANG Zhibin. Study on the thermal and humid environment under the action of soil－air heat exchanger in solar greenhouse[D]. Taiyuan：Taiyuan University of Technology，2018.(in Chinese)

[8] 钞锦龙，杨朔，赵德一，等. 不同光照强度对温室大棚温湿环境的影响[J]. 浙江农业科学，2022，63(3)：517－523.
CHAO Jinlong，YANG Shuo，ZHAO Deyi，et al. Effects of different light intensities on the temperature and humidity environment of greenhouses[J]. Zhejiang Agricultural Science，2022，63(3)：517－523.(in Chinese)

[9] 赵融盛. 不同通风条件对塑料温室气流及温湿度的影响[D]. 杨凌：西北农林科技大学，2021.
ZHAO Rongsheng. Effects of different ventilation conditions on airflow，temperature and humidity in plastic greenhouses[D]. Yangling：Northwest A&F University，2021.(in Chinese)

[10] 严露露. 不同自然通风方式对日光温室环境及番茄生长的影响[D]. 杨凌：西北农林科技大学，2020.
YAN Lulu. Effects of different natural ventilation methods on greenhouse environment and tomato growth[D]. Yangling：Northwest A&F University，2020.(in Chinese)

[11] 薛晓萍，宿文. 基于 CFD 的自然通风对日光温室湿度分布模拟分析[J]. 海洋气象学报，2019，39(4)：90－96.
XUE Xiaoping，SU Wen. Simulation analysis of natural ventilation on humidity distribution in solar greenhouse based on CFD[J]. Journal of Marine Meteorology，2019，39(4)：90－96.(in Chinese)

[12] 魏东东. 日光温室热环境数值模拟与通风特性研究[D]. 郑州：河南农业大学，2022.
WEI Dongdong. Numerical simulation of thermal environment and ventilation characteristics of solar greenhouse[D]. Zhengzhou：Henan Agricultural University，2022.(in Chinese)

[13] KIM R, HONNG S, LEE I, et al. Evaluation of wind pressure acting on multi-span greenhouses using CFD technique, Part 2: application of the CFD model[J]. Biosystems Engineering, 2017, 164: 257 - 280.
[14] ZHANG G, FU Z, YANG M, et al. Nonlinear simulation for coupling modeling of air humidity and vent opening in Chinese solar greenhouse based on CFD[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 162: 337 - 347.
[15] 赵淑梅, 庄云飞, 郑可欣, 等. 日光温室空气对流蓄热中空墙体热性能试验[J]. 农业工程学报, 2018,34(4): 223 - 231.
ZHAO Shumei, ZHUANG Yunfei, ZHENG Kexin, et al. Thermal performance test of air convection heat storage hollow wall in solar greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2018,34(4): 223 - 231. (in Chinese)
[16] 王昊天. 两种新型材料后墙日光温室在杨凌地区的应用效果研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2020.
WANG Haotian. Study on the application effect of two new materials rear wall solar greenhouse in Yangling area[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2020. (in Chinese)
[17] 许红军,曹晏飞,李彦荣,等. 基于 CFD 的日光温室墙体蓄热层厚度的确定[J]. 农业工程学报,2019,35(4):175 - 184.
XU Hongjun, CAO Yanfei, LI Yanrong, et al. Determination of the thickness of heat storage layer of solar greenhouse wall based on CFD[J]. Transactions of the CSAE, 2019,35(4): 175 - 184. (in Chinese)
[18] BOULARD T, ROY J, POUILLARD J, et al. Modelling of micrometeorology, canopy transpiration and photosynthesis in a closed greenhouse using computational fluid dynamics[J]. Biosystems Engineering, 2017,158: 110 - 133.
[19] ALI H B, BOURNET P E, CANNAVO P, et al. Development of a CFD crop submodel for simulating microclimate and transpiration of ornamental plants grown in a greenhouse under water restriction[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018,149: 26 - 40.
[20] 姚万祥,李峥嵘,李翠, 等. 各种天气状况下太阳辐射照度与太阳光照度关系[J]. 同济大学学报(自然科学版),2013, 41(5):784 - 787.
YAO Wanxiang, LI Zhengrong, LI Cui, et al. Relationship between solar irradiance and solar illuminance under various weather conditions[J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2013,41(5): 784 - 787. (in Chinese)
[21] WANG Fujun. Computational fluid dynamics analysis: principle and application of CFD software[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
[22] TONG G, CHRISTOPHER D M, ZHAO R, et al. Effect of location and distribution of insulation layers on the dynamic thermal performance of Chinese solar greenhouse walls[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2014,30(3): 457 - 469.
[23] 张芳, 方慧, 杨其长, 等. 基于 CFD 模型的大跨度温室自然通风热环境模拟[J]. 中国农业气象, 2017,38(4): 221 - 229.
ZHANG Fang, FANG Hui, YANG Qichang, et al. Natural ventilation thermal environment simulation of large-span greenhouse based on CFD model[J]. China Agricultural Meteorology, 2017,38(4): 221 - 229. (in Chinese)
[24] 崔宁博,李奇临,李艳灵,等. 南方湿润地区太阳总辐射估算模型筛选[J]. 排灌机械工程学报,2022,40(7):693 - 700.
CUI Ningbo, LI Qilin, LI Yanling, et al. Screening of estimation models for total solar radiation in humid regions of southern China[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2022,40(7):693 - 700. (in Chinese)
[25] 张艺璇,崔宁博,冯禹,等. 西北地区地表太阳总辐射计算模型适用性评价[J]. 排灌机械工程学报,2019,37(6):545 - 552.
ZHANG Yixuan, CUI Ningbo, FENG Yu, et al. Applicability evaluation of surface total solar radiation calculation model in Northwest China[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2019,37(6):545 - 552. (in Chinese)
[26] 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): 173 - 190.
[27] 五十六. 日光温室内水热耦合环境的试验研究与数值模拟[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2015.
WU Shiliu. Experimental study and numerical simulation of hydrothermal coupling environment in solar greenhouse[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2015. (in Chinese)
[28] 卢佳骏. 草莓高架基质栽培的基质水分扩散和草莓生理特性及滴灌控制系统研究[D]. 镇江:江苏大学,2016.
LU Jiajun. Study on substrate water diffusion and strawberry physiological characteristics and drip irrigation control system in strawberry elevated substrate cultivation[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016. (in Chinese)
[29] 李迷,闫浩芳,张川,等. 设施作物蒸腾蒸发模型的研究现状及存在问题[J/OL]. 排灌机械工程学报:1 - 9[2024 - 01 - 05]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20221201.1030.002.thml.
LI Mi, YAN Haofang, ZHANG Chuan, et al. Research status and existing problems of facility crop evapotranspiration model [J/OL]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering: 1 - 9[2024 - 01 - 05]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20221201.1030.002.thml. (in Chinese)
[30] 赵明雨, 姚名泽, 李波, 等. 日光温室作物腾发量估算模型的研究综述[J]. 节水灌溉,2023(4):73 - 81.
ZHAO Mingyu, YAO Mingze, LI Bo, et al. Review on estimation model of crop evapotranspiration in solar greenhouse[J]. Water Saving Irrigation, 2023(4): 73 - 81. (in Chinese)
[31] FERNÁNDEZ M D, BONACHELA S, ORGAZ F, et al. Measurement and estimation of plastic greenhouse reference evapotranspiration in a Mediterranean calimate[J]. Irrigation Science, 2010, 28:497 - 509.
[32] GOUDRIAAN J, VAN LAAR H H. Modeling protential crop growth processes: textbook with excercises[M]. Dordrecht: Kluwer A cademic Publishers,1994.

(下转第 349 页)