

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. CFD simulation of humidity distribution in solar greenhouse under natural ventilation[J]. Journal of Marine Meteorology, 2019, 39(4): 90-96. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2019.04.011. (in Chinese)

## 基于 CFD 的自然通风对日光温室湿度分布模拟分析

薛晓萍<sup>1</sup>, 宿文<sup>2</sup>

(1. 山东省气候中心, 山东 济南 250031; 2. 武城县气象局, 山东 武城 253300)

**摘要:** 以济南日光温室为研究对象, 基于试验观测数据, 采用计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 模拟技术, 利用  $\kappa-\varepsilon$  湍流模型和离散坐标 (DO) 辐射模型, 模拟自然通风条件下日光温室内空气相对湿度分布。结果表明: CFD 能够较好地模拟自然通风条件下温室内湿度变化特征, 湿度模拟值与实测值平均误差为 5.5%; 低风速条件下, 自然通风降湿能力弱, 温室内湿度呈现明显的下高上低的垂直分布, 随着风速增大, 降湿效果明显提高, 温室内湿度呈现北侧湿度高南侧湿度低的分布特征; 风向为温室自然通风降湿的主要动力因素, 对降湿效果影响较大, 风向为与温室建造走向一致的偏东风时, 温室内湿度低且分布均匀, 降湿效率高, 北风时, 温室内湿度空间差异大, 降湿效果差。该研究可以为日光温室的结构优化设计和环境调控提供科学依据。

**关键词:** 日光温室; 自然通风; 风速风向; 湿度; CFD 模拟

**中图分类号:** P49 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2019)04-0090-07

DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2019.04.011

## CFD simulation of humidity distribution in solar greenhouse under natural ventilation

XUE Xiaoping<sup>1</sup>, SU Wen<sup>2</sup>

(1. Shandong Climate Center, Jinan 250031, China; 2. Wucheng Meteorological Bureau, Wucheng 253300, China)

**Abstract** The CFD (computational fluid dynamics) simulation technique has been utilized based on the experimental observation data of solar greenhouse in Jinan. The humidity distribution in the observed solar greenhouses under natural ventilation is simulated based on the standard  $\kappa-\varepsilon$  turbulence model and the DO (discrete ordinates) radiation model. The results are as follows. 1) The CFD numerical technique can perform a satisfactory simulation of the humidity variation in solar greenhouse under natural ventilation. The average error between the simulated and observed humidity is 5.5%. 2) The humidity in greenhouse shows a distinguished vertical distribution (high humidity in the lower layer and lower humidity in the upper layer) due to weak dehumidifying ability of natural ventilation under low wind speed condition; the dehumidifying effect obviously improves with wind speed increasing and the humidity presents a distribution of higher level in the northern part and lower level in the southern part. 3) The wind direction is the major dynamic factor regarding the greenhouse ventilation and has a strong impact on dehumidification. When it is easterly wind in the same direction with the greenhouse, the humidity is low and distributed evenly in the greenhouse with higher dehumidification efficiency. When it is north wind,

收稿日期: 2019-10-16; 修订日期: 2019-11-02

基金项目: 十三五山东重大气象工程项目 (鲁发改农经[2017]97号); 山东省 2013 年度农业重大应用技术创新项目 (新型双屋面日光温室及高效种植模式研究)

作者简介: 薛晓萍, 女, 博士, 研究员级高级工程师, 主要从事农业气象监测预报预警研究与服务工作, xypdhy@163.com。

the humidity has significant spatial difference and leads to lower dehumidification efficiency. This analysis can be a scientific reference for structural optimization and environment management of solar greenhouse.

**Key words** solar greenhouse; natural ventilation; wind direction and speed; humidity; CFD simulation

## 引言

节能型日光温室是我国设施种植业主要设施之一,主要用于冬季蔬菜反季节种植,能够在温室外 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 且不加温条件下生产黄瓜、番茄等喜温蔬菜<sup>[1-2]</sup>。设施种植业的发展,有效解决了北方地区冬季蔬菜供应难的问题,同时也助推了乡村振兴。由于生产上普遍使用的日光温室设施水平相对简陋,温室内环境控制能力差,其生产受天气条件影响较大,温室内高湿是其主要小气候特征之一,严重影响了蔬菜的产量和品质<sup>[3-4]</sup>,另外,温室高湿度环境极易导致病害发生、蔓延,由此将诱发食品安全问题。关于温室小气候调控,自然通风由于其维护方便、节省能耗,是温室环境调控主要方式<sup>[5-9]</sup>,可有效促进温室内、外环境之间以及作物与环境之间质热交换,从而调节温室内温、湿度等小气候要素处于能满足作物生长需要的最佳状态<sup>[10-13]</sup>。

在温室小气候调控过程中,自然通风量为可控变量,直接影响着温室内气流模式、温湿度空间分布等。近年来,基于统计、能量平衡方法对日光温室小气候模拟研究较多<sup>[14-16]</sup>,由于温室内湿、热环境存在高度耦合性,大部分研究集中在对热环境的模拟。利用 CFD 方法对日光温室气流场和湿热环境的模拟显示,模拟结果与试验观测有较高的吻合

度<sup>[17-20]</sup>,表明 CFD 方法在日光温室小气候环境动态模拟与预测领域具有较好的开发利用前景。但迄今为止,关于自然通风对节能型日光温室湿度时空分布影响机理的研究未见报道,严重制约了日光温室结构的优化与小气候调控技术发展,从而影响了产量与品质的提升。

本文以日光温室为研究对象,采用 CFD 模拟方法,针对济南地区冬季主导风向和风速,模拟自然通风对温室内空气相对湿度影响特征,以期对日光温室湿度调控以及设施结构改进提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 日光温室的物理模型

选取山东省农业科学院试验基地日光温室为研究对象,温室东西走向,坐北朝南,节能型钢架结构,跨度 10 m,长度 60 m,脊高 4.5 m,室内种植番茄。采光面采用厚度为 0.6 mm 的聚乙烯无滴膜。通风口为温室顶部 2.0 m $\times$ 0.8 m 扒缝式。

以试验用温室实际尺寸为物理模型,在不影响计算精度基础上,综合利用前人研究成果,采取了系列假设,主要包括假定覆盖层温度分布均匀,作物蒸腾和土壤蒸发影响可忽略不计,温室内墙传热系数视为固定值。简化后的温室物理模型如图 1 所示。

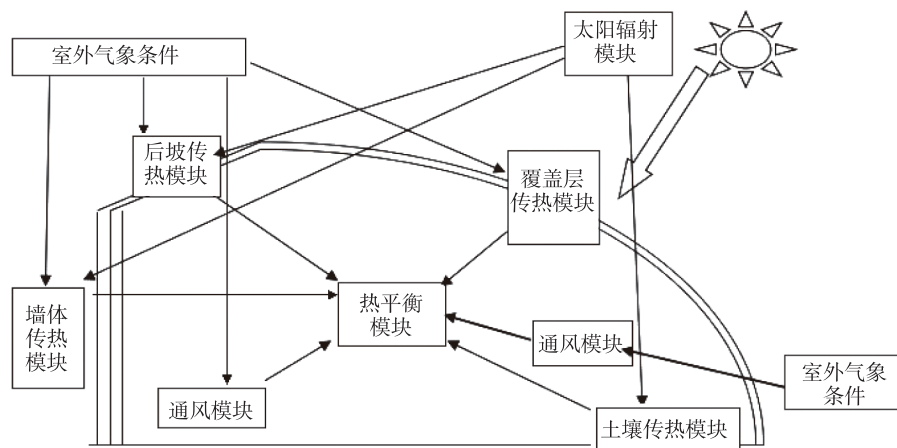


图 1 简化后的日光温室物理模型

Fig.1 Simplified physical model of solar greenhouse

## 1.2 CFD方法原理

### 1.2.1 控制方程

温室内空气流动过程遵循质量守恒、动量守恒、能量守恒等基本物理守恒定律<sup>[21]</sup>,温室内、外气体质量交换用流体守恒方程(1)表达。采用  $k-\epsilon$  湍流模型<sup>[22]</sup>与流体守恒控制方程构建闭合方程组,求解方程可对温室内湿度分布进行数值模拟分析。

### 1.2.2 辐射模型

日光温室生产的主要能量来源为太阳辐射,因此太阳辐射模型的构建主要是采用太阳射线跟踪算法<sup>[23]</sup>太阳模型进行加载。利用离散坐标辐射(DO)模型<sup>[24]</sup>对日光温室的辐射换热进行求解。

### 1.2.3 作物模型

将温室内种植的番茄视为均匀多孔介质,其对温室小气候的影响采用多孔介质模型模拟<sup>[25]</sup>。本研究将温室内作物简化为28个  $8\text{ m} \times 0.8\text{ m} \times 1.5\text{ m}$  的六面体,仅考虑作物与空气的动量交换,忽略其能量交换。

### 1.2.4 计算域及网格划分

根据外部流体的计算域标准,实验模型在流场中阻塞度不应该高于5%<sup>[26]</sup>,以计算精度为目标进行调试,选取温室外部计算域为  $300\text{ m} \times 80\text{ m} \times 50\text{ m}$  的长方体。本研究中采用 Gambit 对温室及温室外计算域进行网格划分,同时对通风口进行加密处理,温室内、外网格尺度分别为  $0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m}$  和  $2.0\text{ m} \times 2.0\text{ m}$  (图2),网格数分别为230 000和390 000。

### 1.2.5 边界条件的设置

对于温室外空间,将六面体的迎风面设置为速度进口,与之相对的面设置为自由出口,顶面为壁

面,温室覆盖面为半透明壁面,地面及四周围护结构为内部壁面。

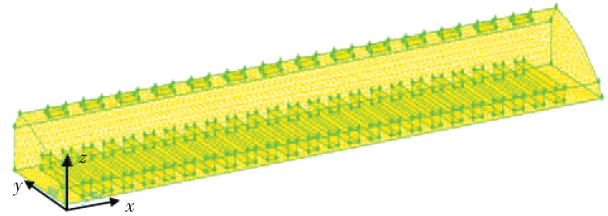


图2 日光温室空间网格三维示意图( $x$ 轴方向为东, $y$ 轴方向为北)

Fig.2 Three-dimensional grid model of solar greenhouse ( $x$ -axis refers to east,  $y$ -axis refers to north)

## 1.3 观测项目与方法

观测试验于2013年1月26日—2月14日进行,在温室外西侧3 m处安装风速、风向、气温和空气相对湿度自动气象观测仪器,数据采集频率为1 min和1 h。温室内设8个空气湿度观测点,其中2个分设在温室中部北墙向南3 m和6 m、高度1.5 m处,北墙向南3 m处东西方向上,距温室西墙10 m和50 m处各3个观测点,观测高度均分为0.5、1.5、2.5 m。在北墙向南1.5 m和西墙向东2 m交汇处,设有1个土壤温度观测点,观测深度为5、10、20、30、40、80和120 cm等7个层次。温室内空气相对湿度采用HC2S3温湿度传感器进行采集,每10 min采集一次。土壤温度采用PC-2S土壤温度传感器,频次为每10 min采集一次。温室内测点布置如图3所示。

## 1.4 模拟背景参数设计

根据济南市冬季的风向风速分布特征,利用

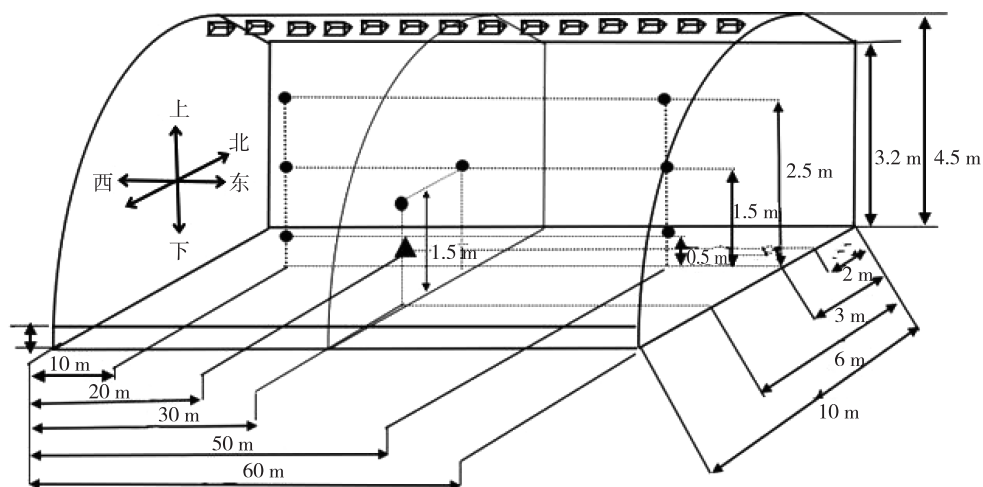


图3 日光温室内温湿度观测点分布图(•为温湿度观测点,▲为土壤温度观测点)

Fig.3 Distribution of observation points in solar greenhouse (• for temperature and humidity observation point and ▲ for soil temperature observation point)

1.2 节构建的 CFD 模型,以北风为风向背景,对温室外 0.5、1.0、2.0 和 3.0  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  4 个环境风速条件下,模拟温室内湿度分布;以 2.0  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  为外界风速背景,分别模拟北风、东北风和东风三个不同风向对温室内湿度分布特征;通风口采用顶窗扒缝式,宽度为 0.3 m。

## 2 结果与分析

### 2.1 模拟模型建立与验证

基于 CFD 模拟技术,利用温室内 8 个观测点空气相对湿度,以模拟值与实测值达到收敛为目标,建立求解连续、动量和能量等方程,最终建立温室湿度模拟模型。为了进一步验证所建模型对温室内湿度模拟的有效性,以 2013 年 2 月 2 日开始通风时温室内外气象要素为初始边界条件(表 1),利用所建模型对通风后温室内 8 个观测点的湿度进行动态模拟,图 4 为温室内各个观测点实际湿度值与模拟值对比图,二者相对误差平均为 5.5%,可见,模拟值能较好地反映实况值。同时模拟值与实测值表现的湿度场整体分布较为一致,表明此模型可以用于温室内湿度环境分析。

表 1 日光温室初始边界条件及设施主要参数

Table 1 Main initial boundary conditions and parameter settings in solar greenhouse

参数	数值	单位
温室外风速	0.6	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
温室外风向	34	°
温室外气温	3.3	°C
温室外湿度	26	%
墙导热系数	0.58	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
墙传热系数	4.536	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
聚乙烯膜密度	900	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
聚乙烯膜导热系数	0.29	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
聚乙烯膜比热容	2 550	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

### 2.2 风速对温室内湿度分布影响模拟

图 5 为不同外界风速条件下,温室内由东向西距离东墙分别为 10、30 和 50 m 3 个南北向垂直剖面湿度分布图,由图可见,在外界风速(0.5  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 较低时,温室内湿度均匀分布,在 56%~74% 范围内,但存在明显的空间分布差异,上层空间湿度为 64%~68%,下层为 70%~74%,其中近地面区域湿度值最高,温室中间区域湿度明显低于西部和东部,中部湿度值低于 66% 的区域范围面积占比为

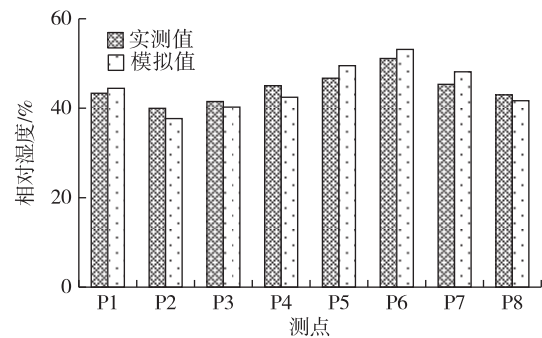


图 4 日光温室室内空气相对湿度模拟值与实测值对比图  
Fig.4 Comparison between simulated and observed values of relative humidity in solar greenhouse

80%,西部和东部占比分别为 10%和 20%。风速增大,温室内平均湿度逐渐降低,整体呈现北侧高南侧低,且随着风速的增大,南北湿度差呈减小趋势。以风速为 1.0  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、2.0  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、3.0  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  为例,湿度范围分别在 54%~74%、46%~66%、42%~58% 之间,风速为 1.0  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  时,温室西部南北湿度梯度分布较为密集,南北湿度差达 16% 左右,温室中部和东部南北湿度差为 8% 左右,温室西部、中部、东部湿度值在 66% 以下的区域范围分别约占 70%、90%、80%。风速为 2.0  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  时,温室西部南北湿度差仍较大,约为 12%,温室中部和东部南北湿度差为 8% 左右,温室西部、中部、东部湿度值在 56% 以下的区域范围分别约占 10%、90%、60%。风速为 3.0  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  时,整个温室南北湿度差在 10% 左右,温室西部已不存在较大的南北湿度差。对比不同风速下温室内湿度分布规律可以得出,外界风速为 0.5  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  时,温室内湿度分布呈现垂直梯度分布,下层湿度大,上层湿度小;外界风速为 1.0  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、2.0  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、3.0  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  时,温室内湿度分布呈现水平梯度分布,北侧湿度大,南侧湿度小;随着外界风速的逐渐增大,温室西部的南北湿度差逐渐减小,温室东西部的湿度差异也逐渐减小;不同外界风速下,温室中部平均相对湿度均最低。

### 2.3 风向对温室内湿度分布影响模拟

以外界风速为 2.0  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  为风速背景,对温室外北、东北和东风 3 个风向条件下温室内湿度分布进行模拟。图 6 为不同风向下温室内由东向西距离东墙分别为 10、30 和 50 m 3 个典型剖面湿度分布图,由图可见,温室外北风条件下,温室内湿度存在明显南北梯度差异分布,尤以温室西部南北湿度差较大,约为 12%,中部和东部南北湿度差为 8% 左右,温室西部、中部、东部湿度值在 56% 以下的区域

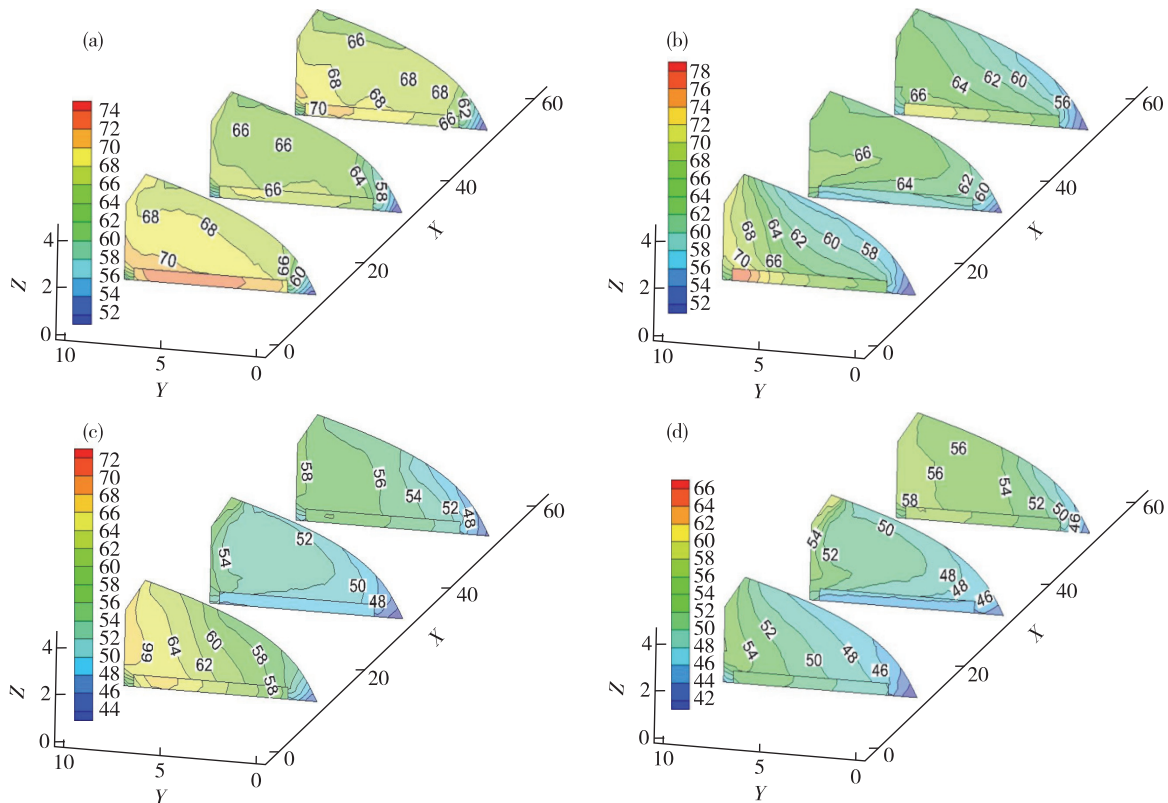


图5 不同风速下温室内距离东墙10、30和50 m垂直剖面空气相对湿度图(单位:%; a.  $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , b.  $1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , c.  $2.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , d.  $3.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

Fig.5 Vertical cross section of relative humidity 10, 30, and 50 m away from the eastern wall in greenhouse under varied wind speed (units: %; a.  $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , b.  $1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , c.  $2.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , d.  $3.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

范围分别约占10%、90%、60%。风向为东北风时,整个温室湿度分布比较均匀,湿度值约为52%,温室西部靠近薄膜和地面位置湿度值约为52%,中心位置湿度值约为54%,中部靠近薄膜和地面位置湿度值约为50%,中心位置湿度值约为52%,温室东部湿度呈现垂直梯度分布,上层湿度约为52%,下层湿度约为54%。风向为东风时,温室西部湿度呈现南北梯度分布,北侧湿度值约为49%,南侧湿度值约为46%,温室中部靠近薄膜和地面位置湿度值约为44%,中心位置湿度值约为47%,温室东部湿度呈现垂直梯度分布,上层湿度值约为46%,下层湿度值约为48%。对比3个不同风向下温室内湿度分布图可知,风向为北风时,整个温室呈现北侧湿度高,南侧湿度低的分布,温室西部存在较大的南北湿度差,温室中部湿度最低,东部次之,西部湿度值最大;风向为东北风时,温室湿度值分布较为均匀,温室西部和中部顶部和地面湿度较低,中心湿度较高,温室东部上层湿度低,下层湿度高,但总体湿度差变化不大;风向为东风时,温室西部存在南北湿度差,但较北风时湿度差较小,整个温室湿度

分布较为均匀,且温室平均湿度值较东北风时小。

### 3 讨论与结论

#### 3.1 风速影响

温室内微气候形成机理和分布特征与外界风速高度相关。本研究表明,在外界风速较低条件下,温室内空气相对湿度存在明显垂直梯度分布,即下层湿度高上层湿度低。主要原因在于,在低风速下,温室内外空气质量交换以受热压作用为主,温室内湍流作用小,故上下层湿度交换少,湿度梯度大,同时地面处于吸热状态,导致下层湿度较大,这与高洁和郑德聪<sup>[4]</sup>的研究结果一致。外界风速逐渐增大时,温室内外空气质量交换转为以受风压作用为主导,湿度垂直梯度变小,但呈现北侧湿度高、南侧湿度低分布态势,这可能是北侧靠近墙体具有一定的保温蓄热作用,南侧靠近通风口带走一部分湿热气体。因此,在实际生产中,外界风速较小时,需要对温室下层进行湿度监测,必要时增大南侧底部通风口开度进行除湿,风速较大时,对温室北侧进行湿度监测,浇水灌溉时对北侧适度减小

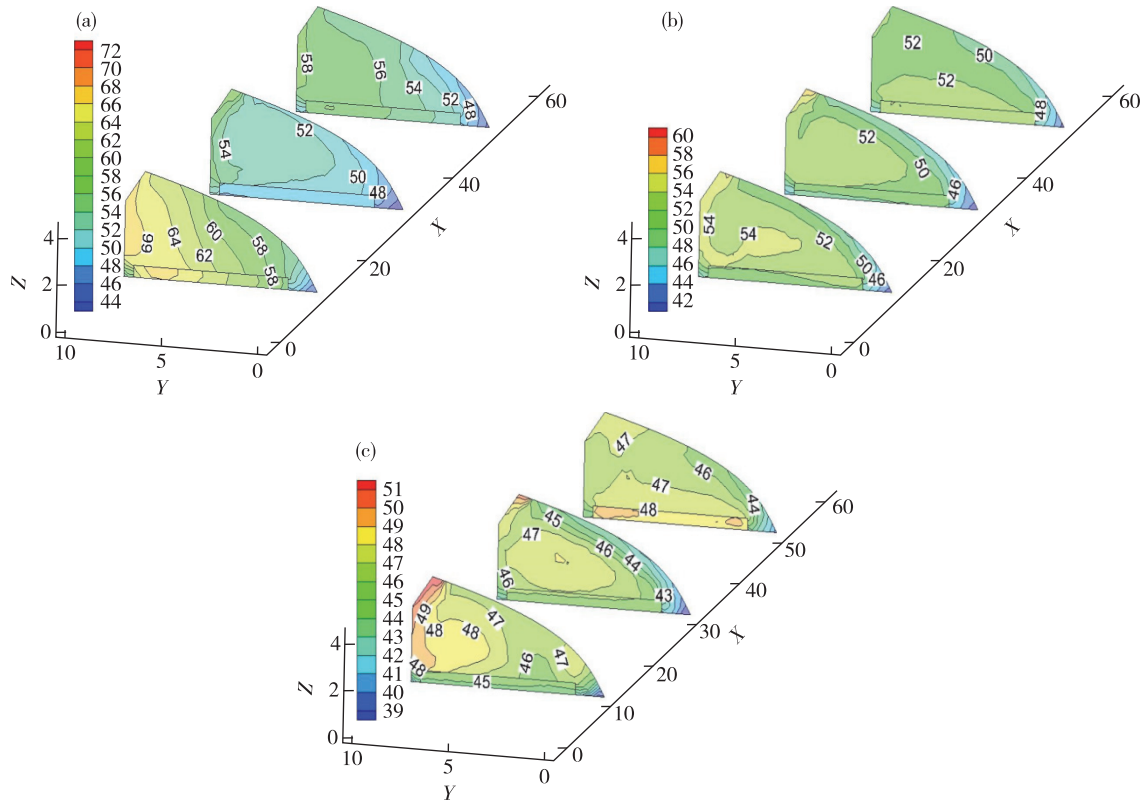


图 6 不同风向下温室内距离东墙 10、30 和 50 m 垂直剖面空气相对湿度图(单位:%;a.北风,b.东北风,c.东风)

Fig.6 Vertical cross section of relative humidity 10, 30, and 50 m away from the eastern wall in greenhouse under varied wind direction (units: %; a. north wind, b. northeast wind, c. east wind)

灌溉量。

### 3.2 风向影响

风向是温室自然通风的主要因素,对温室内环境分布模式影响很大,外界不同风向会对温室内湿度场产生显著影响,从而影响温室内降湿效果和湿度均匀性。本研究结果表明,风向为北风时,温室东西部湿度南北方向差异较大,风向为东北风时,温室内东西部湿度差较小,整个温室湿度分布较为均匀,与北风和东北风相比,东风风向的自然通风降湿效率较高,说明自然通风条件下,外界风向对改变温室内湿度分布模式影响较大,因此在实际生产中,可以根据本地的主导风向设计温室通风口,使温室内微气候达到最佳状态,从而有利于温室内作物的生长。

### 3.3 设施结构影响

文中在不同风速、风向条件下,自然通风降湿效果均表现为温室中部>东部>西部,这主要与设施建造的管理人员出入口方位有关,本研究用的设施出入口位于温室东北处,其对降湿效果可能存在一定影响。

### 3.4 作物影响

本研究在利用 CFD 模拟自然通风对温室内湿度调节影响过程中,忽略了作物蒸腾、土壤蒸发以及太阳辐射等因素的影响,而实际生产中,上述因素对温室内空气相对湿度的空间分布存在一定影响,有待于在今后的研究中进一步完善,以便为温室结构改进以及小气候调控提供更可靠的依据。

### 参考文献:

- [1] 宿文,薛晓萍,熊宇,等.自然通风对日光温室气温影响的模拟分析[J].生态学杂志,2016,35(6):1635-1642.
- [2] 宿文.自然通风对日光温室小气候影响的 CFD 模拟研究[D].南京:南京信息工程大学,2016.
- [3] 杨再强,赵翔,苏天星,等.光质对温室甜椒干物质生产和分配指数的影响[J].生态学杂志,2012,31(5):1117-1122.
- [4] 高洁,郑德聪.日光温室湿度分布的数值模拟[J].灌溉排水学报,2017,36(4):31-36.
- [5] 周长吉.现代温室工程[M].北京:化学工业出版社,2010.
- [6] 李永欣,王朝元,李保明,等.荷兰 Venlo 型连栋温室夏季自然通风降温系统的试验研究[J].中国农业大学

- 学报,2002,7(6):44-48.
- [7] MISTRIOTIS A, BOT G P A, PICUNO P, et al. Analysis of the efficiency of greenhouse ventilation using computational fluid dynamics [J]. *Agric For Meteorol*, 1997,85 (3/4):217-228.
- [8] KITTAS C, BOULARD T, PAPADAKIS G. Natural ventilation of a greenhouse with ridge and side openings: Sensitivity to temperature and wind effects [J]. *Trans ASABE*,1997,40(2):415-425.
- [9] BOULARD T, PAPADAKIS G, KITTAS C, et al. Air flow and associated sensible heat exchanges in a naturally ventilated greenhouse [J]. *Agric For Meteorol*, 1997, 88(1/4):111-119.
- [10] SEGNER I. Transpirational cooling of a greenhouse crop with partial ground cover [J]. *Agric For Meteorol*, 1994, 71(3/4):265-281.
- [11] BARTZANAS T, BOULARD T, KITTAS C. Numerical simulation of the airflow and temperature distribution in a tunnel greenhouse equipped with insect-proof screen in the openings [J]. *Comput Electron Agric*, 2002, 34(1/3):207-221.
- [12] BOULARD T, PAPADAKIS G, KITTAS G, et al. Air flow and associated sensible heat exchanges in a naturally ventilated greenhouse [J]. *Agric For Meteorol*, 1997, 88(1):111-119.
- [13] Bot G P A. Developments in indoor sustainable plant production with emphasis on energy saving [J]. *Comput Electron Agric*,2001,30(1/3):151-165.
- [14] 李小芳.日光温室的热环境数学模拟及其结构优化 [D].北京:中国农业大学,2005.
- [15] 孟力力,杨其长, BOT G P A, 等. 日光温室热环境模拟模型的构建 [J]. *农业工程学报*, 2009, 25 (1): 164-170.
- [16] 张义,马承伟,刘艺伟,等. 温室多层覆盖传热的数值模拟与验证 [J]. *农业工程学报*,2010,26(4):237-242.
- [17] 佟国红,李保明, DAVID M C,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.
- [18] 蒋国振,胡耀华,刘玉凤,等. 基于 CFD 的下沉式日光温室保温性能分析 [J]. *农业工程学报*,2011,27(12): 275-281.
- [19] 张林华,张峰,刘珊,等. 下沉式土质墙体温室室内温度场的三维非稳态模拟 [J]. *太阳能学报*, 2010, 31(8):965-971.
- [20] 张起勋,于海业,张忠元,等. 利用 CFD 模型研究日光温室内的空气流动 [J]. *农业工程学报*, 2012, 28(16):166-171.
- [21] 王福军. 计算流体动力学分析: CFD 软件原理与应用 [M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [22] KACIRA M, SASE S, OKUSHIMA L. Effects of side vents and span numbers on wind-induced natural ventilation of a gothic multi-span greenhouse [J]. *Japan Agric Res Quart*,2004,38(4):227-233.
- [23] 塔娜,陈斌,五十六,等.基于 CFD 的寒冷干旱地区日光温室温度场模拟分析 [J].*内蒙古农业大学学报(自然科学版)*,2015,36(1):77-81.
- [24] 周伟,汪小昆.基于 CFD 的 Venlo 温室夏季组合降温措施模拟研究 [J].*农机化研究*,2015,37(3):20-24.
- [25] 孙萌,呼云龙,梁春英,等.基于 CFD 的水稻育秧大棚环境数值模拟研究 [J].*农机化研究*, 2016, 38 (1): 28-32.
- [26] 何国敏.现代化温室温度场数字化模拟研究 [D].南京:南京农业大学,2011.