

日光温室湿度分布的数值模拟

高 洁, 郑德聪

(山西农业大学 工学院, 山西 晋中 030800)

摘 要:以山西晋中地区日光温室作为研究对象,通过在温室内布点测量温、湿度的试验和采用CFD进行数值模拟的方法,研究了冬季晴朗天气状况下,采用畦灌方式的日光温室在自然通风条件下内部湿度的分布规律。结果表明,冬季晴朗天气状况下,日光温室在08:00左右湿度达到最高值,14:00左右湿度达到最高值;室内温、湿度显著负相关,温度每升高1℃,湿度降低3.31%;温室内温度实测值与模拟值误差在 $\pm 3^\circ\text{C}$ 以内,湿度实测值与模拟值误差在6.8%以内,整体拟合情况较好,证明了所建立模型的准确性;温室湿度在南北走向、东西走向变化不太明显,垂直方向上分层比较明显。太阳辐射所提供的热量足以维持温室所需,草帘的保温效果显著,无需对温室进行加温,但是温室夜间湿度较高,甚至接近饱和,需要对湿度进行控制。

关 键 词: 日光温室; 湿度场; 数值模拟; CFD

中图分类号: S625.5⁺1

文献标志码: A

doi:10.13522/j.cnki.ggps.2017.04.006

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.

0 引 言

日光温室是指由太阳辐射提供光和热,只有在持续低温的情况下,采取人工辅助加温措施的温室,也叫节能温室。日光温室的广泛应用,有效地解决了北方地区冬季蔬菜供应难题,增加了农民的收入,同时还节约了能源,带动了相关产业的发展。温度和湿度是影响温室作物生长的2个关键因素,为了满足蔬菜作物的生长需求,需要对温室内部的温度、湿度进行调控,以提高温室的生产力。在气温较低的时候,日光温室通过严密封闭的方法来减少热量的逸散,导致温室内部空气湿度会持续偏高。湿度太高,不仅会阻碍植物蒸腾,导致作物生理失调,而且会提高作物病害发生的概率^[1]。因此通过掌握日光温室内湿度变化规律,适时对湿度进行合理调控,对日光温室的管理具有重要意义。

丁小涛等^[2]通过实验研究得出连栋塑料温室内的温、湿度环境相比较更适宜作物生长;李全平等^[3]通过数理统计方法分析得出高寒冷地区试验期间温室相对湿度日变化与季节变化基本相同;李本卿等^[4]通过CFD数值分析法证明了强制通风条件下的Venlo型玻璃温室所建立的CFD模型基本正确;谭胜男等^[5]采用CFD数值模拟了不同工况下温室内微环境的分布,证明温室内喷雾降温系统在夏季高温高湿的气候条件下具有一定的降温能力;陈斌等^[6]选取晴朗天气和小雪天气的数据,运用CFD方法进行温室建模及温度场模拟。目前利用CFD数值模拟方法对温室环境进行研究已有一定进展,但对特定灌溉条件下温室内部湿度分布规律的研究还较为缺乏。

以山西晋中日光温室为研究对象,采用CFD数值模拟方法,对冬季晴朗天气、自然通风条件下采取畦灌灌溉方式的温室内湿度分布状况进行分析模拟,研究日光温室内湿度的分布与变化规律,从而为采取合理的措施对温室内的湿度状况进行调控,使作物能够在适宜的湿度条件下生长,为更好的控制作物病虫害的发病率,保证温室作物的优产、高产提供一定理论依据。

收稿日期:2016-12-20

作者简介:高洁(1990-),女,硕士研究生,主要从事设施农业工程技术研究。E-mail: sophia0732@163.com

通信作者:郑德聪(1965-),男,教授,主要从事农业机械化研究。E-mail: zhengdecong@126.com

1 日光温室内湿度模拟的物理模型

日光温室建于2013年,位于山西农业大学校园内,坐北朝南,长度为45 m,跨度为9 m,后墙高度为2.25 m,顶部最高处3.70 m,室内种植番茄。温室东部有一个缓冲间,采光面采用聚氯乙烯塑料膜,其余围护结构为土墙。由采光面与后屋面衔接处进行通风。春季、冬季夜间用草席进行保温。图1为试验用温室结构横截面图。

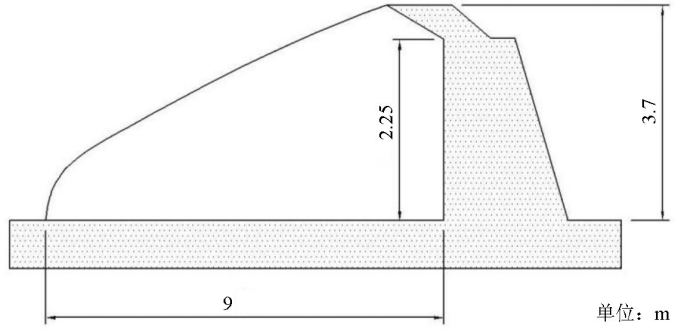


图1 日光温室结构横截面图

2 日光温室湿度模拟的数学模型

以试验温室物理模型为基础,经过适当简化,建立温室内三维非稳态数学模型之后,采用Fluent软件,利用有限体积法进行湿度分布模拟。有限体积法主要是通过子域法加离散的方式来进行求解,是把所求计算域划分成网格,并且保证每个网格点上有一个不相重叠的控制体积,然后把需要求解的微分方程对每个控制体积进行积分,得到一组离散方程。其中的未知数是网格节点上的因变量。

2.1 基本控制方程

温室内气体流动的Reynolds数一般要大于 $10^{10[7]}$,所以采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型来对温室湿度分布进行数值分析;对近壁面区域选用壁面函数法进行处理;温室流体的基本控制方程为:

1)质量守恒方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = S_m, \quad (1)$$

式中: S_m 为从分散的二级相中加入到连续相的质量(kg); ρ 为流体密度(kg m^{-3}); u_i 为*i*方向上的质量平均速度(m/s); x_i 为*i*方向上的微元体长度(m)。

2)动量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i, \quad (2)$$

式中: p 为静压(Pa); τ_{ij} 为应力张量; g_i 为*i*方向上的重力体积力(N/m^3); F_i 为*i*方向上的外部体积力(N/m)。

3)能量守恒方程

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \text{div}(\rho u T) = \text{div}\left(\frac{k}{c_p} \text{grad } T\right) + S_T, \quad (3)$$

式中: c_p 为比热容($\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$); T 为热力学温度(K); k 为流体的传热系数; u 为速度项(m/s); S_T 为流体的内热源以及由于黏性作用流体机械能转换为热能的部分。

2.2 辐射模型的确定

在CFD数值模拟分析当中,建立模型时,将太阳辐射作为能量方程的源项考虑,采用辐射传递方程来进行辐射传热分析。目前,Fluent软件针对辐射问题的分析研究提供了5种模型:Rossland辐射模型、P1辐射模型、DTRM离散传播辐射模型、S2S表面辐射模型、DO离散坐标辐射模型。DO辐射模型适用于所有光学深度区间的辐射问题,需要的内存、计算量都比较适中^[8],兹选取DO辐射模型。

2.3 组分输运模型

CFD数值分析中,一般通过组分输运模型描述空气的湿度。把温室内气体看成是空气和水蒸气的混合物,求解水蒸气的质量分数,从而计算空气的相对湿度。在这个对流扩散过程中,组分守恒方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla(\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \vec{J}_i + R_i + S_i \quad (4)$$

式中: Y_i 为第*i*种物质的质量分数; J_i 为物质*i*的扩散通量; R_i 为化学反应的净产生速率; v 为扩散速度(m/s); S_i 为离散相及源项导致的额外产生速率。

2.4 多孔介质模型

在温室内空气湿度的数值模拟过程中,采用多孔介质模型描述温室内地面的土壤,并将其作为源项添

加到动量方程中。

$$S_{\varphi}=\left(\frac{\mu}{K_p}u+\frac{C_F}{\sqrt{K_p}}\rho u^2\right)\quad ,\tag{5}$$

式中： S_{φ} 为动量源项； μ 为空气流速(m/s)； C_F 为非线性动量损失因子； K_p 为多孔介质的渗透率(m^2)。

3 日光温室环境数据的实测与模拟

3.1 环境数据的实际测定

实测的室外气象参数包括温度、大气相对湿度、太阳辐射、风速和风向，由设置在温室外的气象站数据采集仪自动采集，每15 min采集1次数据，最后通过计算机下载后对数据进行处理；室内气象参数包括室内空气温度和湿度、室内土壤温度及含水率、室内四周围护结构温度等，由HOBO Pro V2系列温湿度记录仪、红外线测温仪进行测量。本试验中温室内气象参数采用布点测量方法采集，分别在地面以上0.5、1.3、2.0 m三个水平面上总共布置了27个测点，图2为温室内1.3 m高度处水平面上温、湿度测点的分布。

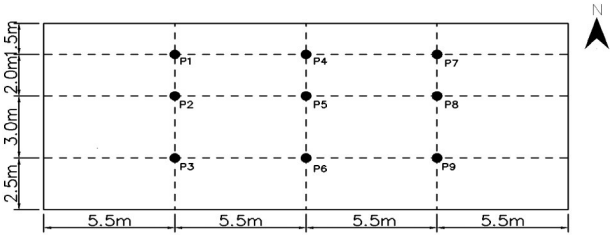


图2 温室内1.3 m高度处水平面上温湿度测点分布

3.2 环境数据的数值模拟

选取整个温室结构作为计算域进行环境数据数值模拟，通过ICEM CFD软件，采用结构化网格对温室内空间进行划分，共划分网格616 068个。温室内环境条件的实际测定于2014年11月10—16日进行，期间基本为晴朗天气，选取具有代表性的2014年11月12日的试验数据，如表1所示，把24 h内每小时所有测点的数据取平均值，作为数值模拟的边界条件输入，同时为了保证所建立模型的可靠性，也选取其他几日的部分数据进行模拟。

表1 数值模拟边界条件

参数	风速/ ($m\cdot s^{-1}$)	太阳辐射/ ($W\cdot m^{-2}$)	室外空气 温度/ $^{\circ}C$	室外空气相对 湿度/%	室内土壤 温度/ $^{\circ}C$	室内东墙 温度/ $^{\circ}C$	室内西墙 温度/ $^{\circ}C$	室内后墙 温度/ $^{\circ}C$
平均值	3.64	338	8.3	16.2	15	15.5	17.5	15

4 结果与分析

4.1 实测值与模拟值的对比

温室内部所有实测值均为所有测点的平均值，模拟值则取温室内部整个空间的平均值。将24 h内每小时的温、湿度平均数据进行对比分析，结果见图3和图4。从图3和图4可以看出，温室内部温度的实测值与模拟值变化趋势完全一致，误差可控制在 $\pm 3\text{ }^{\circ}C$ 以内；湿度的实测值走势与模拟值也几乎一致，最大误差值为6.8%。2组对比结果显示，模型的整体拟合情况较好，表明建立的模型具有较高的可信度，可以用于温室环境分析。图5为其他模拟日14:00—16:00实测值与模拟值的对比图，整体拟合情况较好，更进一步验证了所建立模型的可靠性。

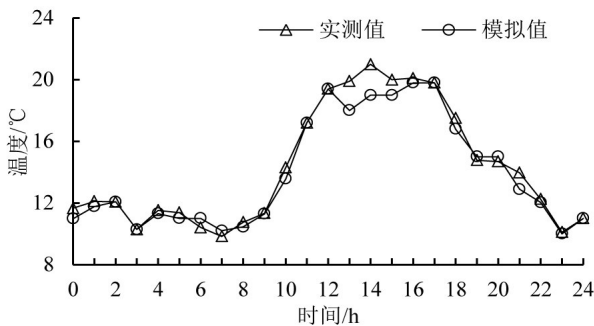


图3 温室内温度实测值与模拟值的对比

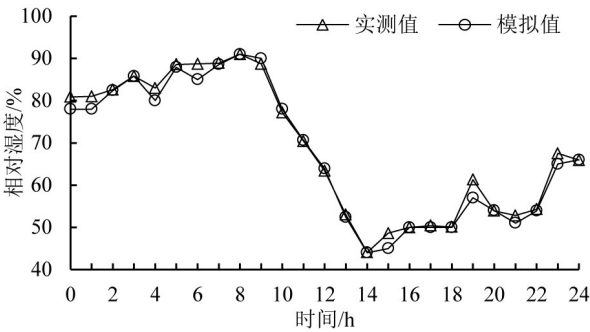


图4 温室内湿度实测值与模拟值的对比

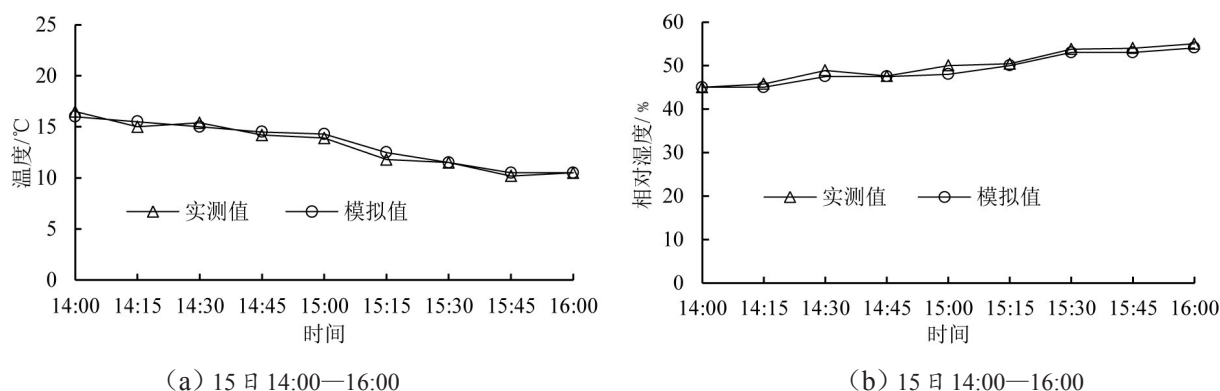


图5 其他模拟日一时段内实测值与模拟值的对比

由图3可知,室内温度维持在9~22℃之间,基本可以满足作物生长对温度的要求。在08:00—12:00间,随太阳辐射的增强室内温度呈逐步上升的趋势。在12:00左右温室进行通风,温度出现短暂的下降,通风结束后温度逐渐上升,在14:00左右达到最高值,达到峰值后随着太阳辐射逐渐减弱,室内温度也逐渐下降。图6为模拟日太阳辐射实测值,温室内温度的整体走势与太阳辐射走势几乎一致,可以看出太阳辐射是日光温室热量的主要来源。温室夜间使用草帘覆盖进行保温,室内温度始终维持在9℃左右,比室外温度(图7)高8℃左右,说明草帘的保温效果显著。

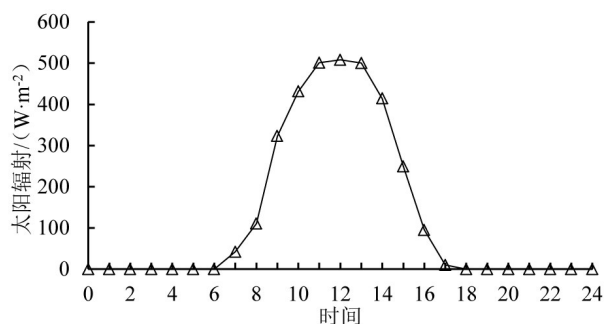


图6 模拟日太阳辐射实测值

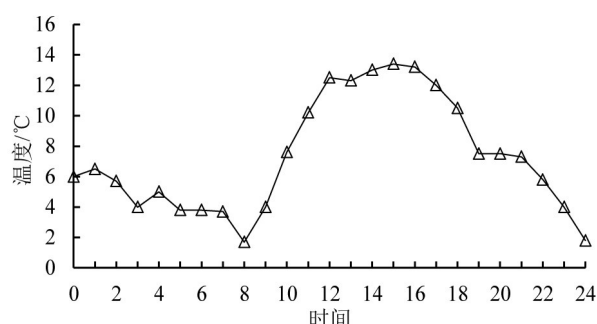


图7 模拟日室外温度实测值

由图4可知,室内湿度变化范围在45%~98%,早晨08:00左右,由于整个夜间温室温度较且始终处于较为密闭的状态,导致室内湿度处在较高水平;之后随着温度逐渐上升,室内湿度逐渐下降,在14:00左右由于太阳辐射达到最强,加上进行自然通风的原因,湿度达到最低值,通风结束后湿度逐渐回升,夜间湿度随着温度降低而上升,数值较高,甚至接近饱和状态。室内湿度太高,与室外温差较大时,更容易形成凝结水,并易导致病害。

从图3、图4可以看出,室内温、湿度大致呈现负相关关系。为了更好地反映这一关系,对温室内温度和湿度关系进行了线性回归分析,结果如表2、表3所示。回归分析结果显示,二者的线性回归模型的 P 值均小于0.0001,说明

表2 温室内温度与湿度关系一元线性回归方差分析

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
模型	0.398 4	1	0.398 4	44.15	<0.000 1
误差	0.207 5	23	0.009 0	—	—
总和	0.605 9	24	—	$R^2=0.657 5$	

二者具有极显著的相关关系;决定系数达0.6575,说明二者具有较高的拟合精度,可以作为响应预测。温室内温度与湿度的线性拟合方程为: $y=-0.0331x+1.1869$ (x 为温度, y 为湿度), $R^2=0.6575$ 。根据回归方程可以推算,温室内温度每升高1℃,湿度会降低3.31%。一般情况下,温室内作物生长的适宜湿度范围不应超过75%^[9],该温室湿度较高,需要进行调控。早上揭开草帘后,由于环境温度较低,故不适宜采用通风来排湿,可以尽量提高温度来降低湿度,当室外温度达到作物生长适宜的温度时再采用通风的方法进行排湿。夜间也可以采取增温降湿的方法,适当地对温室进行加温,以降低室内空气相对湿度,防止病害发生。

表3 温室内温度与湿度关系一元线性回归的参数估计

变量	参数估计	自由度	标准误	T 值	P 值
回归截距	1.186 9	1	0.073 5	16.14	<0.000 1
回归系数	-0.033 1	1	0.004 9	-6.64	<0.000 1

4.2 典型时刻温室内湿度的分布规律

14:00时温室内部湿度达到最低点,选取该典型时刻各测点及其余测试参数的平均值作为边界条件对该时段温室内的湿度分布状况进行模拟分析,结果如图8所示。由图8可知,该时刻距离北墙2.0、4.0和6.0 m三个断面的湿度分布变化规律基本相同,在垂直方向上湿度的分层现象比较明显,从地面到温室顶部的覆盖薄膜,湿度在逐渐降低。图8(a)中湿度分层明显,地面湿度较高,高度越高,湿度越低。总体上看该断面上湿度分布为2层,上层湿度范围在0.39~0.48之间的区域比重占到了50%左右;断面下层的湿度在0.48~0.7之间,其中近地面处区域的湿度最高,其值在0.61~0.70之间。由图8(b)可知,湿度较高的区域范围比图8(a)中要小,湿度值在0.48~0.70间的区域范围约占30%,而图8(a)相同湿度区间的区域范围约占40%,而湿度值在0.39~0.48之间的区域范围则要占到70%左右;由图8(c)可知,湿度在0.48~0.57间的区域约占30%,没有湿度值超过0.57的区域,地面以上的湿度值均分布在0.39~0.48之间,约占整个垂直面面积的70%。距北墙6 m处断面的近地面平均湿度远低于距北墙2 m和4 m处的近地面湿度。通过对比3个垂直断面近地面处的湿度值可以看出,距北墙距离越远,近地面处的空气湿度会越低,分析原因,可能是白天在有太阳辐射的情况下,越靠近地面,所能接受到的太阳辐射越少,加之温室主要通过顶部薄膜和北墙的连接处进行通风,靠近地面处受到通风的影响较小,湿度不易于散发出去,而土壤也处于吸热状态,从而导致靠近地面处温度较低,湿度较大。另外,墙体具有一定的保温蓄热能力,随着距离北墙越远,温度越低,湿度也逐渐变小。而地面以上的湿度逐渐降低,原因是越靠近棚顶,接受的太阳辐射越多,温度较高,又受到通风的影响较大,导致湿度逐渐降低。生产中需要对距离北墙较远处的湿度进行监测,必要的时候需进行灌溉补水。

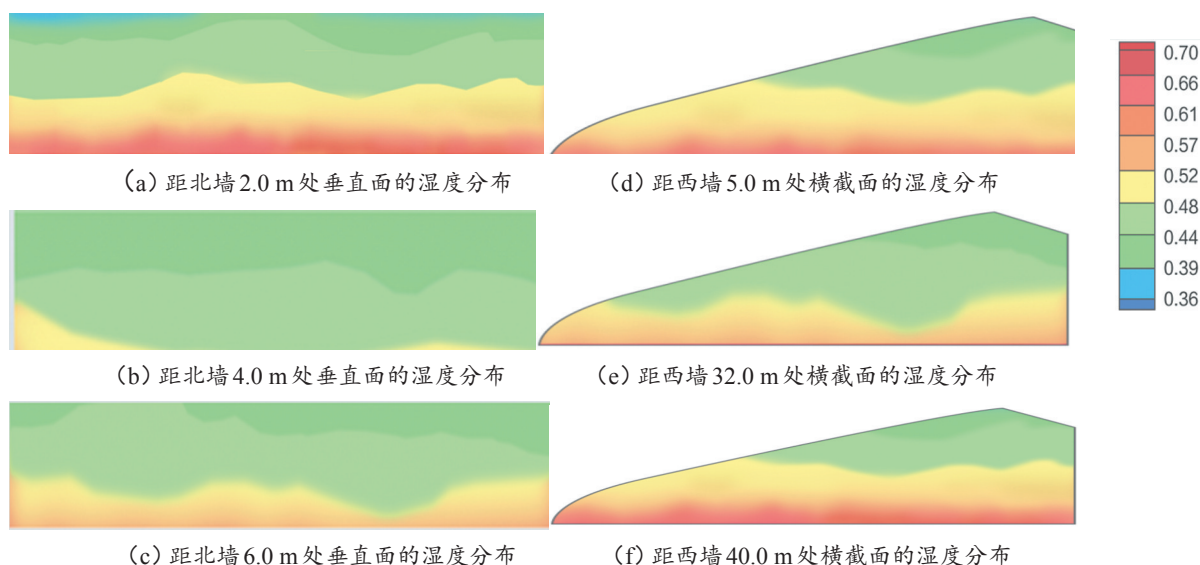


图8 温室内部南北走向、东西走向截面湿度分布

由图8亦可知,在14:00时温室东西走向距西墙5、32、40 m处断面湿度有差异,但总体变化不大。在垂直方向上,湿度分布的分层现象较为明显。距西墙5 m处断面湿度范围在0.39~0.70之间,分为3层,湿度值在0.61~0.70间的区域约占10%,0.48~0.52间的区域约占30%,其他区域湿度值在0.39~0.48之间;距西墙32 m处断面湿度值为0.39~0.52,分为2层,近地面处湿度值在0.48~0.52之间,约占30%,湿度值在0.39~0.48区域约占70%。距西墙40 m处断面,湿度值在0.39~0.70之间,分为3层,地面附近湿度在0.61~0.70之间,约占5%;湿度值在0.48~0.52之间区域约占20%;湿度值为0.38~0.48区域约占75%。对比3个截面的湿度分布可见,平均相对湿度距西墙5 m处断面最高,距西墙40 m处断面次之,距西墙32 m处断面最低。其原因为距西墙5 m断面附近通风条件较差,水滴凝结于薄膜,致使湿度较大;距西墙40 m处断面靠近东墙,附近地面布置有灌溉水管,经常会积水,湿度较高,但东墙处有门,通风相对较好,会使湿度有一定的减弱作用;而温室中间部分辐射条件最好,通风又相对较好,因此湿度最低。生产实践中,可以通过选用无滴膜克服薄膜内侧凝结水滴的弊端,也可减轻水滴对太阳辐射的反射和吸收,提高薄膜的透光率,使光照增强,起到增温降湿的效果;也可以通过采用膜下滴灌的方式,既提高了水、肥等的利用效率,也能降低地面水分蒸发量,从而有效地降低温室内的空气湿度,为温室作物生产和病害防控创造良好的条件。

5 结 论

1)冬季晴朗天气状况下,日光温室在08:00湿度达到最高值,14:00温度达到最高值;温室内的温度和湿度极显著负相关,温度每升高1℃,湿度大约降低3.31%。

2)温室内部温度实测值与模拟值误差在 $\pm 3^\circ\text{C}$ 以内,湿度实测值与模拟值误差可控制在6.8%以内,表明模拟模型对温室内的温度和湿度整体拟合情况较好,具有较好的准确性与可靠性。

3)温室湿度在南北走向和东西走向上的变化都不显著,但在垂直方向上呈现明显的分层现象。模拟的湿度结果与实际测量结果基本一致,模型准确可靠。

4)太阳辐射所提供的热量足以维持温室所需,草帘的保温效果显著,无需对温室进行加温。本项研究得出日光温室温度与湿度呈显著负相关关系,冬季晴朗天气状况下夜间湿度较高,超过了作物正常生长的范围,需要对湿度进行调控,这与谭胜男^[5]、常丽娜^[9]、辛本胜^[10]等的研究结果一致。本文的不足之处是数值模拟模型中没有考虑薄膜水分凝结对湿度的影响,也没有考虑热量传递与水分传递之间的交叉影响,有待在以后的研究中加以完善。

参考文献:

- [1] 陈晓. 机械通风条件下Venlo型温室室内温度场与流场的数值模拟研究[D]. 杭州:浙江工业大学,2008.
- [2] 丁小涛,金海军,张红梅,等. 单栋大棚和连栋塑料温室温、湿度环境比较研究[J]. 上海农业学报, 2011, 27(2):96-101.
- [3] 李全平,朱宝文,高君元. 高寒冷凉地区日光温室相对湿度变化规律[J]. 中国农学通报, 2015, 31(1):204-209.
- [4] 李本卿. 强制通风条件下Venlo型温室室内气流场和温度场的CFD数值模拟研究[D]. 南京:江苏大学, 2009.
- [5] 谭胜男. 基于CFD的现代化温室环境数值模拟与优化研究[D]. 南京:南京农业大学,2013.
- [6] 陈斌. 寒冷干旱地区日光温室冬季热环境测试与模拟研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2015.
- [7] MISTRIOTIS A, BOT G P A, PICUNO P, et al. Analysis of the efficiency of greenhouse ventilation using computational fluid dynamics[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1997, 85:217-228.
- [8] CHE L M, LI D, WANG L J, et al. Micronization and hydrophobic modification of cassava starch[J]. International Journal of Food Properties, 2007(10): 527-536.
- [9] 常丽娜. 被动式日光温室热湿环境实验与数值模拟研究[D]. 济南:山东建筑大学,2011.
- [10] 辛本胜. 日光温室温湿度预测模型研究[D]. 北京:中国农业大学,2005.

Numerical Simulation of Temperature and Humidity Distributions in a Solar Greenhouse

GAO Jie, ZHENG Decong

(Shanxi Agricultural University, Jinzhong 030800, China)

Abstract: This paper simulated numerically the distributions of temperature and humidity in a solar greenhouse in Jinzhong district, Shanxi province under natural ventilation in sunny days, using a CFD-based model. Plant in the greenhouse was irrigated using furrows and the spatio-temporal distributions of temperature and humidity in it were measured. The results showed that during sunny days in winter, the indoor-humidity and temperature in the greenhouse peaked around 08:00 am and 14:00 pm respectively. The indoor-humidity and temperature were negatively correlated, and when the temperature rose by 1°C , the humidity decreased by 3.31%. The discrepancy between the measured and simulated temperatures was within $\pm 3^\circ\text{C}$, and the errors of the simulated humidity was less than 6.8% in comparison with the measurements. The gradients of humidity and temperature in the north-south direction and the east-west direction were similar, while in the vertical direction the heterogeneous effect was significant. The energy of the solar radiation could meet the demands when the greenhouse was insulated by woven straws, and there was no need to heat the greenhouse. However, the humidity in the greenhouse was relatively high in nights, close to saturation, requiring control.

Key words: solar greenhouse; humidity; numerical simulation; CFD

责任编辑:赵宇龙