

基于 CFD 的夏季屋顶全开型玻璃温室自然通风流场分析

王新忠^{1,2} 张伟建^{1,2} 张良^{1,2} 管泽峰^{1,2}

(1. 江苏大学现代农业装备与技术教育部重点实验室, 镇江 212013; 2. 江苏大学农业装备工程学院, 镇江 212013)

摘要: 为研究自然通风对屋顶全开型玻璃连栋温室夏季降温的影响, 采用 $k-\varepsilon$ 湍流模型和 DO 辐射模型建立了屋顶全开型温室在夏季高太阳辐射和弱风天气下的 CFD 模型, 将模型的模拟值与实测值进行对比, 两者平均相对误差为 2.5%。利用建立的 CFD 模型, 进行了夏季高温季节通风降温调控措施的试验分析。结果表明: 屋顶全开窗玻璃温室中, 天窗的开窗角度应与侧窗配合, 这样能增强通风的降温效果; 在侧窗为 45° 时, 天窗调整至 60° 的温室整体降温效果优于天窗 45° 或 75° 开启角度。屋顶全开窗玻璃温室在使用侧窗和调控至合理开启角度的天窗进行联合通风的工况下, 温室整体温度从 38.4℃ 降至 36.9℃, 调控措施降温效果明显。

关键词: 屋顶全开窗型温室; 流场; CFD; 降温

中图分类号: S625.5⁺1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2016)10-0332-06

Analysis of Flow Field for Full Open-roof Glass Greenhouse with Nature Ventilation in Summer Based on CFD

Wang Xinzong^{1,2} Zhang Weijian^{1,2} Zhang Liang^{1,2} Guan Zefeng^{1,2}

(1. Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

2. School of Agricultural Equipment Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: In order to research the cooling effect in nature ventilation of full open-roof glass greenhouse, the CFD model was established by the $k-\varepsilon$ turbulence and DO radiation model with high solar radiation and weak wind weather. The simulated values of the model and measured values were contrasted, and the average relative error was 2.5%. The experiment of cooling control measurements in greenhouse was carried out by using verification model. The results of experiments showed that under current natural ventilation conditions, the greenhouse gables ventilated by fan-window and air holes of dry wet curtain. Outdoor air entered into greenhouse in horizontal direction with no upward movement velocity components. The ventilated effect of side window combined with the skylight window was poor under this condition. There was large-area air, which flowed slowly in the greenhouse. After the modification of side window structure, the airflow direction was led to generate upward velocity components when it entered into greenhouse from south gable. The ventilated effect of side window combined with skylight window was improved. The opening angle of skylight should be matched with side window, which can enhance the ventilation cooling effect. When the angle of side window was 45°, and the skylight was adjusted to 60°, the overall cooling effect of the greenhouse was better than those under other conditions which the angle of opening skylight was 45° or 75°. The overall temperature of the greenhouse was decreased from 38.4℃ to 36.9℃ and the cooling effect was improved obviously after using side window combined with roof window, when the opening angle of skylight was reasonably coordinated with side window.

Key words: full open-roof greenhouse; flow field; CFD; cooling

收稿日期: 2016-04-11 修回日期: 2016-05-13

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2014BAD08B03)、江苏省重点研发计划项目(BE2016323)、江苏高校优势学科建设工程项目和昆山市科技计划项目(KN1504)

作者简介: 王新忠(1969—),男,教授,主要从事农业装备系统监测与控制研究,E-mail: xzwang@ujs.edu.cn

引言

目前,我国温室在夏季生产使用中面临严重的室内高温问题,影响温室实现周年生产。夏季温室降温问题的传统解决方案为使用机械通风,这种降温方式耗能大,成本高,且大型连栋温室往往因长度过大造成机械通风效果不佳,温室温度分布不均匀,影响作物品质。采用自然通风方式进行温室降温调控,耗能少,通风扰动小,温度分布一致性高,有利于室内作物生长。

目前现有的温室降温调控研究中,主要是以传统的文洛型玻璃温室和塑料大棚温室为研究对象。BARTZANAS^[1]等针对圆拱型大棚的通风方式对温室流场的影响进行了研究,发现侧窗和天窗联合通风的形式具有最优的通风效果,INBOK 等^[2]、BOURNET 等^[3-4]的研究中也证实了这一结论。KITTA 等^[5]对大棚温室不同侧窗形式的通风效果进行了研究,研究表明:在其试验条件下,大棚温室挡板形式侧窗的通风效果比卷帘形式的好。沈卫明等^[6]对采用不同顶窗形式的连栋塑料温室通风问题进行了研究,发现顶窗形式的配置调整对室内空气流动的平均流速改变显著,但对室内空气流动的最大流速改变不明显;PARRA 等^[7]在温室流场的研究中也得出了相一致的结论。沈明卫等^[8]针对温室遮阳网开展了研究,建立了温室的遮阳网光度模型,ABDEL-GHANY 等^[9-12]给出了在不同遮阳布置下遮阳网对辐射值的影响,这些研究为预测不同室外光照辐射条件下遮阳网对室内光照度、辐射的影响提供了参考。目前关于温室流场的研究多是针对传统连栋温室开展的,夏季玻璃温室自然通风降温分析主要以传统文洛型玻璃温室为对象。而屋顶全开型玻璃温室是针对我国南方地区夏季高温高湿强光照条件而设计的,近年来得到一定的推广应用,但是针对屋顶全开窗型玻璃温室的自然通风流场的研究较少,文献[13-19]研究表明采用 CFD 技术进行温室流场研究具有可行性。

本文针对屋顶全开窗型玻璃连栋温室在夏季弱风、高太阳辐射的天气条件下,进行温室 CFD 建模,通过 CFD 模型进行仿真试验和流场分析,研究在夏季自然通风方式中温室结构参数变化对温室内温度调控的影响。

1 试验方案与 CFD 建模

1.1 试验对象

试验温室为盆栽花卉温室,地点位于上海市金山区(东经 119.78°,北纬 31.70°),试验地点属于亚

热带季风气候区域。试验温室为一个屋顶全开窗型连栋玻璃温室,温室南北长 41.1 m,高 4.3 m,温室共有 3 跨,跨度 9.6 m,温室每跨有 3 个小屋顶。天窗窗面宽 1.9 m。温室中 2 个风机安装尺寸均为 1.38 m × 1.38 m,距地高 0.32 m,2 个风机与邻近跨间立柱之间的距离均为 1.71 m。湿帘为 9.6 m × 1.5 m,距地高 0.4 m。试验室温室部分区域种有少量盆栽作物,高度较矮,本文在处理过程中忽略作物影响。在温室建模中,以正东方向为 X 轴正方向,Y 轴正方向为向上高度方向,Z 轴正方向为正南方向,温室西北角地面上的点作为坐标轴原点,如图 1 所示。

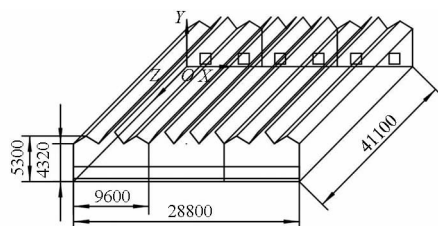


图 1 温室几何尺寸模型示意图

Fig. 1 Schematic view of simulated greenhouse

1.2 试验方法

试验在 2015 年 8 月 1 日下午进行,当天太阳辐射强烈,室外风速较低,为典型的夏季高温天气。试验时的温室工况为:北墙打开风机后盖,使外部气流可以透过风机口进入温室,而南墙以干湿帘的透气孔作为通风口。天窗开度为 52.4°,打开中间一跨温室的 3 个屋顶全开天窗,另外东西两跨温室只开启中间小屋顶天窗。选取中间一跨温室布置温湿度传感器进行测量。所用传感器为 ZDR-3WIS 型温度自动记录仪,数据记录时间的间隔设置为 5 min。每个传感器有 3 个传感探头,分别布置在 0.7、1.3、2.2 m 3 个高度上,传感器所在位置形成 2 个交叉的垂直平面,图 2 所示为传感器在中间温室的布置示

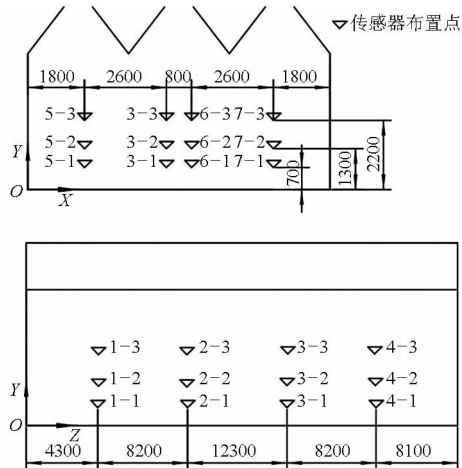


图 2 温度传感器布置示意图

Fig. 2 Locations of temperature sensors in greenhouse

意图,每一个传感器的在坐标系中的位置坐标如图2所示。

室外环境的测量使用TYD-ZS2型环境数据记录仪进行,记录的时间间隔设置为1 min。利用FLUKE Infrared Thermometers 568型红外线温度传感器测量温室覆盖材料的温度和室内外地面的温度,每10 min记录一次。选取13:05时刻的室内外状态的环境参数用于模型验证。其时室外风速为0.8 m/s,室外太阳辐射为821 W/m²,温室入口温度为36℃,室内各测点位置的温度如表1所示。

表1 选取时刻试验温室各测点位置的温度

Tab.1 Temperature of each measuring position in testing greenhouse at selected moment

位置	温度/℃	位置	温度/℃	位置	温度/℃
1-1	38.1	1-2	39.4	1-3	39.7
2-1	37.1	2-2	37.9	2-3	39.0
3-1	36.0	3-2	37.1	3-3	38.3
4-1	35.9	4-2	37.1	4-3	37.9
5-1	36.3	5-2	37.5	5-3	37.9
6-1	36.0	6-2	37.1	6-3	38.3
7-1	37.1	7-2	35.2	7-3	38.3

1.3 温室 CFD 建模

1.3.1 计算域与网格划分

为保证通风模拟的精确性,将温室室外的一部分空间和温室本身一起设置为计算域。利用ICEM对试验温室建立计算域,设定数值模型中计算域空间是试验温室长宽高的10倍,并将试验温室模型置于计算域水平中心。ICEM中模型与实际比例为0.01:1,在Fluent中将模型缩放至与实际尺寸相等。综合考虑计算条件,采用Tetra/Mixed网格形式进行网格划分,网格最大尺寸设为50 mm,对空气流动变化的区域进行网格加密,该区域最大网格尺寸为3 mm,网格划分总数为3 437 197个,其中温室网格为928 009个。

1.3.2 边界设置与材料属性选择

连栋玻璃温室内空气运动的雷诺数较大^[20],选用标准 $k-\epsilon$ 湍流模型,假设空气流动符合标准壁面函数,采用DO辐射模型进行计算。本文中,正北方向表示0°风向。根据实测风速风向,将试验实测平均风速0.8 m/s、方向为135°的风力进行矢量分解,设置计算域南和西两面为进风口,风速都为0.566 m/s,入口温度设为36℃,东和北两面为出风口。模型中,设置温室东、南、西、北四墙及天窗为半透明壁面。并根据实测数据对模型中各壁面进行温度设置,如表2所示。模型中材料属性如表3所示。

表2 试验温室 CFD 模型中壁面温度设置

Tab.2 Temperature setting of walls in CFD model

位置	东墙	西墙	南墙	北墙	内地面	外地面	天窗
温度/℃	42	42	43	41	43	51	43

表3 试验温室 CFD 模型中材料属性参数

Tab.3 Related parameters of materials in CFD model

材料	密度/ (kg·m ⁻³)	比热容/ (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	导热系数/ (W·m·K ⁻¹)	吸收系 数/m ⁻¹	折射 率
空气	1.165	1 025.5	0.026 79	0	1.000 3
玻璃	2 500	700	0.71	0.1	1.7
混凝土	2 100	880	1.4	0.6	1.6

1.3.3 湿帘和遮阳网在模型中的设置

试验过程中,观察到湿帘通风口在夏季高温条件下对温室侧墙通风有着很大影响,故模型中应考虑干湿帘通风因素。此处干湿帘是没有水流的干燥湿帘,湿帘起通风口的作用。根据干湿帘的具体特性和其对空气的阻碍作用,以及检测湿帘两侧风速的实际情况,将干湿帘视为多孔介质,并且不考虑流体的非线性惯性损失量。根据基本渗流定律^[21]和伯努利风-压的普遍应用关系^[22],利用相关实测数据计算出温室干湿帘的渗透率 α 为 $2.4 \times 10^{-6} \text{ m}^2$,计算中忽略温室内外热压的影响。

根据文献并结合试验场地的遮阳网材料参数,以对遮盖区域进行辐射折减的方式实现模拟^[9-12],设定太阳辐射由821 W/m²经过两层遮阳网后折减为341.257 W/m²。

2 结果与讨论

2.1 模型验证

针对构建的屋顶全开窗型连栋玻璃温室 CFD 模型,将实测值与模型中相同位置的模拟值进行对比,将传感器探头位置按1、2、3、4、5、6、7的传感器编号顺序从第1层到第3层分别记为P1~P21,对比结果如图3所示。

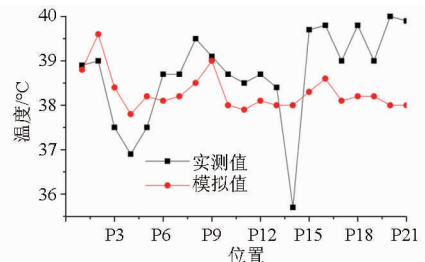


图3 温室的实测值和 CFD 模型的模拟值

Fig.3 Simulated and measured temperatures of greenhouse

由图3可见,在各个水平高度上模拟值与实测值的变化趋势基本一致。对比后可知实测值与模拟值最大相差2.4℃,最小相差0.1℃,最大相对误差

为 6.6%, 最小相对误差为 0.2%, 平均相对误差为 2.5%。表明所建温室 CFD 模型模拟精度较高, 所采用边界条件有效, 模型可以用于不同温室环境工况下的模拟分析试验。

2.2 试验温室室内温度分布

将进行试验的屋顶全开窗型连栋玻璃温室的试验工况简称为 A 工况。在 A 工况下试验温室的平均温度为 38.4℃, 温室盆栽作物区(距地 0.7 ~ 1.5 m 高度)的平均温度为 38.1℃。

图 4 为试验温室在 A 工况下 X 值为 7.2 m、14.4 m、21.6 m 处截面的气流速度分布云图, 由图 4 可以看出, 试验温室的自然通风模式中, 由于温室的南北山墙通风是让室外空气以垂直山墙的方式进入温室, 这导致了从山墙进入的气流在温室中水平推进, 向上运动的速度分量较小, 山墙与天窗的通风联合效果不明显, 降低了试验温室的通风性能。温室在作物区的高度形成了较多的空气流动缓慢的区域, 不利于空气交换, 易使植物滋生疾病。

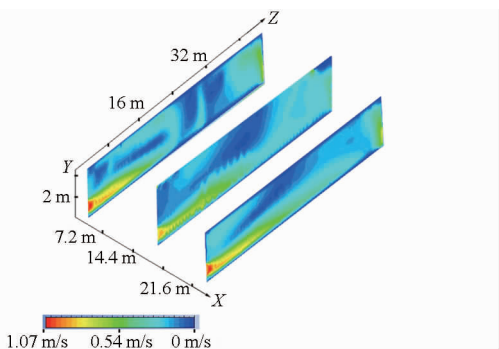


图 4 试验温室在 X 值为 7.2 m、14.4 m、21.6 m 处的气流速度云图

Fig. 4 Airflow velocity distribution at 7.2 m, 14.4 m and 21.6 m widths

图 5 为 A 工况下 0.7 ~ 1.5 m 高度范围内室内每个高度所在截面的平均温度随高度变化的分布情况, 试验温室夏季用于种植耐热花卉, 盆栽作物区温度要求不宜高过 38℃, 由图可看出温室作物区的各

高度上的温度均处于 38℃ 以上, 需要进行降温调控。

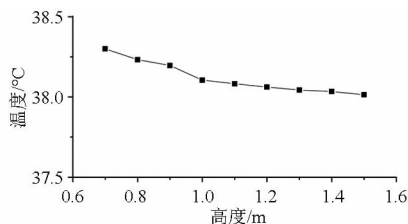


图 5 试验温室各高度截面的平均温度分布

Fig. 5 Distribution of average temperature at different heights

2.3 通风装置结构参数变化对温室流场的影响

在大气温度较高的情况下, 增加温室内部气流流动性能是实现温室自然通风降温最有效便捷的方法。为此, 利用验证的屋顶全开窗型连栋玻璃温室 CFD 模型, 改变通风装置结构参数, 进行不同工况下的模拟试验。由前人的研究结论^[1-4]可知, 温室自然通风中的联合通风形式对温室具有最好的通风效果。而现有试验温室的通风模式中, 外部空气进入温室后因为向上的速度分量较小, 与天窗实现联合通风效果较差。针对这一问题, 提出了去掉温室南墙的湿帘, 将北墙的风机架高, 在南北墙增设带挡板的侧窗以引导外部空气进入温室时的速度方向, 实现温室的联合通风。具体工况调整如下: 在南北墙距地面 30 cm 处到 192 cm 之间分别增设侧窗, 侧窗的开启角度设为 45°。将风机调整到所加设的侧窗以上, 距地高度为 192 cm, 风机功率不变, 风机水平方向位置不变。

在改进后的模型中, 改变屋顶天窗开启角度并分析屋顶全开窗连栋温室内的流场变化情况, 以寻求合理的自然通风降温方案。在增设侧窗的基础上, 对温室天窗开度分别设定为 45°、60°、75° 3 种不同的工况, 以相同的边界条件进行温室 CFD 模拟试验。分别将这 3 种天窗开启角度工况命名为 B 工况、C 工况和 D 工况。图 6 为这 3 种工况下温室中

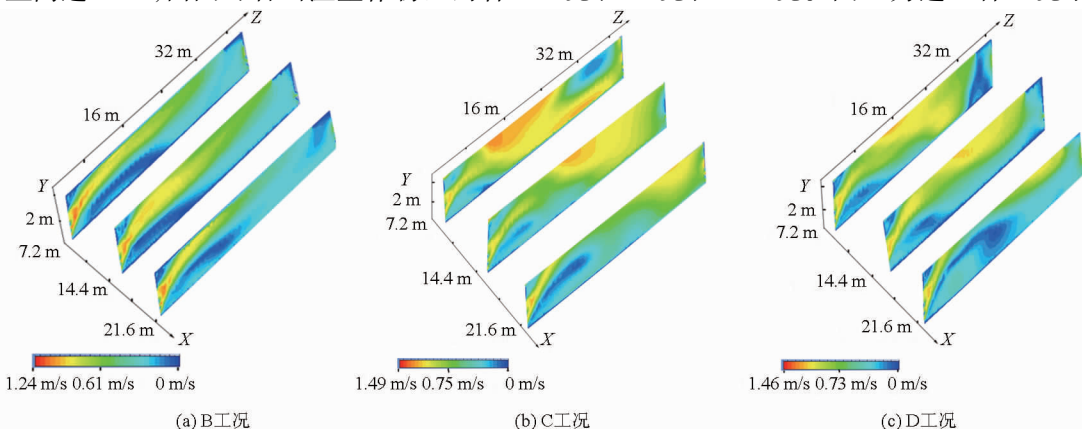


图 6 气流速度分布云图

Fig. 6 Airflow velocity distribution

X 值为 7.2 m、14.4 m、21.6 m 处截面的气流速度分布云图的对比。

从图 6 中可以看出,在增设侧窗后,温室整体空气流动情况都得到了改善。B 工况下,侧窗和天窗形成的联合通风下温室空气流动性好的区域多集中于温室较高的高度上,在植物区高度上形成的空气流动性较差,这会不利于温室植物区的降温。而 D 工况下,由于温室天窗开启的角度过大,不利于温室联合通风中形成强劲的空气流速,所以在温室中形成较多的空气流动性差的区域。在 C 工况下,既保证了植物区高度上的空气流动性,又没有形成较多的空气流动性差的区域,气流流动最具均匀性,植物区气流整体流动分布也更合理,说明此温室天窗开度较合适。从气流流动的分布来看,C 工况比 B、D 工况效果更好。

图 7 所示为距温室地面 0.7 ~ 1.5 m 高度范围内,4 种温室工况下各个高度所在截面的平均温度随高度变化的分布情况。由图 7 可以看出,温室采用 C 工况在植物区产生较好的降温效果。综合分析可见,在 3 种试验工况中,C 工况更适合温室的夏季降温。

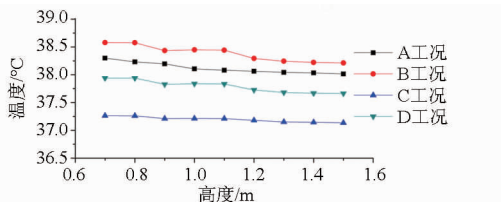


图 7 4 种温室工况下温室各高度截面平均温度的分布对比

Fig. 7 Comparison of average temperature distribution at different heights

根据温室 CFD 模拟试验,将通风装置结构改变后的 C 工况和原试验温室 A 工况下的室内环境进一步对比分析。A 工况下温室整体的平均风速

为 0.45 m/s,最大风速为 1.76 m/s,C 工况下温室整体的平均风速则提升为 0.89 m/s,最大风速为 1.84 m/s,在 A 工况下温室的平均温度为 38.4℃,在 C 工况下温室的平均温度变为 36.9℃,通过通风装置结构参数调整,将温室整体温度降低了 1.5℃。A 工况下作物种植区温度的平均值为 38.1℃,而 C 工况下则降低为 37.2℃。对比可见 C 工况下温室内空气流动比 A 工况下更顺畅,在夏季弱风高温的天气下更有利于温室内空气流动,改进侧窗配置和结构参数有助于屋顶全开窗型连栋玻璃温室自然通风降温。

3 结论

(1) 利用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型和 DO 辐射模型建立了屋顶全开窗型连栋玻璃温室 CFD 模型,模型模拟值与试验实测数据相比,温度模拟值与实测值最大相对误差为 6.6%,平均相对误差为 2.5%,表明建立的温室 CFD 模型有效。

(2) 在屋顶全开窗型温室中,当屋顶窗开启,以风机湿帘为自然通风口,温室内联合自然通风效果一般。增设带挡板的侧窗通风时,气流方向被引导产生向上的速度分量,温室内侧窗天窗组合通风效果有所提升。在组合通风方式中天窗的开窗角度应配合侧窗使用,起到增强通风降温效果。模拟实验表明,在侧窗开启角为 45°时,天窗开启 60°工况比天窗开启角为 45°或 75°的工况更有利于温室环境通风降温。

(3) 对屋顶全开窗型连栋玻璃温室而言,在使用侧窗和合理开度天窗的组合通风方式下,温室总体平均温度从 38.4℃降至 36.9℃,温室作物区的平均温度从 38.1℃降至 37.2℃。温室的平均风速由 0.45 m/s 提升到 0.89 m/s,有助于实现夏季南方温室的通风降温。

参 考 文 献

- BARTZANAS T, BOULARD T, KITTAS C. Effect of vent arrangement on windward ventilation of a tunnel greenhouse[J]. *Biosystems Engineering*, 2004, 88(4):479-490.
 - INBOK L, SHORT T H, SASE S, et al. Evaluation of structural characteristics of naturally ventilated multi-span greenhouses using computer simulation[J]. *Japan Agricultural Research Quarterly*, 2000, 34(4):247-256.
 - BOURNET P E, KHAOUA S A O, BOULARD T. Numerical prediction of the effect of vent arrangements on the ventilation and energy transfer in a multi-span glasshouse using a bi-band radiation model[J]. *Biosystems Engineering*, 2007, 98(2):224-234.
 - BOURNET P E, KHAOUA S A O, BOULARD T, et al. Effect of roof and side opening combinations on the ventilation of a greenhouse using computer simulation[J]. *Transactions of the ASABE*, 2007, 50(1):201-212.
 - KITTAS C, BARTZANAS T. Greenhouse microclimate and dehumidification effectiveness under different ventilator configurations [J]. *Building and Environment*, 2007, 42(10):3774-3784.
 - 沈明卫, 郝飞麟. 连栋塑料温室自然通风流场的稳态模拟——顶窗配置形式对温室内流场的影响[J]. *浙江大学学报:工学版*, 2007, 41(4):668-672.
- SHEN Mingwei, HAO Feilin. Steady simulation of airflow distribution of natural ventilation inside multi-span plastic greenhouse;

- effect of transom window configuration on airflow field inside greenhouse[J]. *Journal of Zhejiang University: Engineering Science*, 2007, 41(4):668–672. (in Chinese)
- 7 PARRA J P, BAEZA E, MONTERO J I, et al. Natural ventilation of parral greenhouses[J]. *Biosystems Engineering*, 2004, 87(3):355–366.
- 8 沈明卫,郝飞麟. 内外遮阳对连栋塑料温室内光环境的影响[J]. *农业机械学报*, 2004, 35(5):110–116.
SHEN Mingwei, HAO Feilin. Effects of inner and outer sun shading net on solar radiation inside multi-span greenhouse[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2004, 35(5):110–116. (in Chinese)
- 9 ABDEL-GHANY A M, PICUNO P, AL-HELAL I, et al. Radiometric characterization, solar and thermal radiation in a greenhouse as affected by shading configuration in an arid climate[J]. *Energies*, 2015, 8(12):13929–13937.
- 10 ABDEL-GHANY A M, AL-HELAL I M. Analysis of solar radiation transfer: a method to estimate the porosity of a plastic shading net[J]. *Energy Conversion and Management*, 2011, 52(3):1755–1762.
- 11 ABDEL-GHANY A M, KOZAI T. On the determination of the overall heat transmission coefficient and soil heat flux for a fog cooled, naturally ventilated greenhouse: analysis of radiation and convection heat transfer [J]. *Energy Conversion and Management*, 2006, 47(15–16):2612–2628.
- 12 AHEMD H A, AL-FARAJ A A, ABDEL-GHANY A M. Shading greenhouses to improve the microclimate, energy and water saving in hot regions: a review[J]. *Scientia Horticulturae*, 2016, 201:36–45.
- 13 李永欣,李保明,李真,等. Venlo 型温室夏季自然通风降温的 CFD 数值模拟[J]. *中国农业大学学报*, 2004, 9(6):44–48.
LI Yongxin, LI Baoming, LI Zhen, et al. CFD simulation of a naturally ventilating cooling process for a Venlo greenhouse in summer[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2004, 9(6):44–48. (in Chinese)
- 14 FLORES-VELAZQUEZ J, MONTERO J I, BAEZA E J, et al. Mechanical and natural ventilation systems in a greenhouse designed using computational fluid dynamics[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2014, 7(2):1–16.
- 15 TEITEL M, WENGER E. Air exchange and ventilation efficiencies of a monospan greenhouse with one inflow and one outflow through longitudinal side openings[J]. *Biosystems Engineering*, 2014, 119(4):98–107.
- 16 MASHONJOWA E, RONSSE F, MILFORD J R, et al. Modelling the thermal performance of a naturally ventilated greenhouse in Zimbabwe using a dynamic greenhouse climate model[J]. *Solar Energy*, 2013, 91(3):381–393.
- 17 HE K, CHEN D, SUN L, et al. The effect of vent openings on the microclimate inside multi-span greenhouses during summer and winter seasons[J]. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 2015, 9(1):399–410.
- 18 郝飞麟,沈明卫,何勇,等. 单栋塑料温室内多因子综合 CFD 稳态模拟分析[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(9):297–304.
HAO Feilin, SHEN Mingwei, HE Yong, et al. Three dimensional steady simulation of microclimate pattern inside single plastic greenhouse using computational fluid dynamics[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(9):297–304. (in Chinese)
- 19 周伟,李永博,汪小昆. 基于 CFD 非稳态模型的温室温度预测控制[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(12):335–340.
ZHOU Wei, LI Yongbo, WANG Xiaochan. Model predictive control of air temperature in greenhouse based on CFD unsteady model[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(12):335–340. (in Chinese)
- 20 MISTRIOTIS A, ARCIDIACONO C, PICUNO P, et al. Computational analysis of ventilation in greenhouses at zero- and low-wind-speeds[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1997, 88(1–4):121–135.
- 21 CHEVALIER T, CHEVALIER C, CLAIN X, et al. Darcy's law for yield stress fluid flowing through a porous medium[J]. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2013, 195:57–66.
- 22 王笃利,陈青云,曲梅. 温室基本风压取值方法探讨[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(11):171–174.
WANG Duli, CHEN Qingyun, QU Mei. Method for calculating basic wind pressure of greenhouse[J]. *Transactions of the CSAE*, 2005, 21(11):171–174. (in Chinese)