

柏宗春,夏礼如,吕晓兰,等. 基于 CFD 仿真自然通风大棚窗口的设置[J]. 江苏农业科学,2016,44(12):379-382.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.12.117

基于 CFD 仿真自然通风大棚窗口的设置

柏宗春,夏礼如,吕晓兰,张美娜,陶建平

(江苏省农业科学院农业设施与装备研究所,江苏南京 210014)

摘要:塑料大棚通风换气对大棚内作物的生长影响较大,特别是对于自然通风大棚,研究其通风窗的开设位置及方式意义重大。建立塑料大棚三维模型,利用计算流体动力学软件 Fluent,对大棚在自然通风条件下的流场进行仿真,得到不同侧窗和天窗尺寸及配置条件下大棚的流场分布规律。结果表明,大棚侧窗对提高流场的气流速度作用明显,但侧窗高度超过 1 m 后,气流速度增加不明显;天窗对大棚前半段气流影响较小,天窗位置最好开在后半部分靠近出口的位置;增开门旁通风窗对提升大棚通风能力有明显效果。

关键词:大棚;通风窗;流场仿真;CFD

中图分类号: S126;S625.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2016)12-0379-04

大棚通风对棚内作物生长影响较大,特别是自然通风温室大棚,通风窗口的合理设置尤为重要^[1]。受棚体工程建设与试验条件的限制,国内外学者多采用计算机和计算流体力学技术(computational fluid dynamics,CFD)对大棚通风问题进行相关研究^[2-5]。傅宁等运用 CFD 软件对大棚内部流场分布进行了仿真^[6];王光伟等运用三维不可压缩湍流模型对不同形式的大棚流场流态进行研究^[7];陆小伟对不同形式大棚流场进行仿真,计算了换气时间^[8];沈明卫等运用流体仿真软件,研究了外界风向对大棚内部流场的影响^[9];陈加浪等运用 CFD 仿真,研究了华东地区单栋大棚在高温低风速极端环境下的自然通风特性,并进行了验证^[10]。

采用 CFD 仿真方法,能准确计算分析棚内气流场分布及外部环境对棚内气流场的影响,目前,主要集中在对流场分布规律的仿真分析,对通风窗位置、尺寸等棚体结构优化的研究较少。本研究针对苏南地区某新型 8 m 钢架塑料大棚,运用计算流体动力学软件 Fluent,结合棚体的几何结构和地理环境参数,建立大棚的三维仿真模型,对不同通风窗口尺寸及位置等条件下的大棚流场进行仿真,分析不同条件下大棚内的气流规律,为棚体结构优化提供参考依据。

1 仿真模型

1.1 理论基础

1.1.1 控制方程 为简化分析,假设自然通风条件下大棚内空气流动为定长不可压缩牛顿流,流体在流动过程中遵守基于雷诺时均的黏性不可压缩 Navier-Stokes 方程^[11-14]。方程表达式为:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho u\phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\phi) + S_\phi$$

式中: ϕ 表示通用传输量; ρ 表示流体密度; τ 表示时间; u 表示流体速度矢量; Γ 表示广义扩散系数; S_ϕ 表示广义源相。

1.1.2 湍流模型 Fluent 提供多种湍流模型可供选择。本研究结合大棚流场的实际情况,选取标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型,该模型在实际应用中具有较好的精度和收敛性。假设近壁处气流符合标准壁面函数。

1.2 几何模型

以江苏省农业科学院六合动物科学基地现有的 8 m 钢架塑料大棚为基础对象构建三维模型(图 1),基本参数为:跨度 8 m,高度 3.4 m,长度 50 m,前后门 1.8 m × 1.8 m,肩高 1.9 m(直肩高 1.4 m)。大棚所处地理位置为 118.5° E、32° N,年平均风速约为 2 m/s。为减小因边界条件设置对仿真计算带来的不利影响,增大流场计算区域^[15],包括大棚内部和大棚外部 2 部分,整个计算区域宽 30 m、高 15 m、长 95 m。

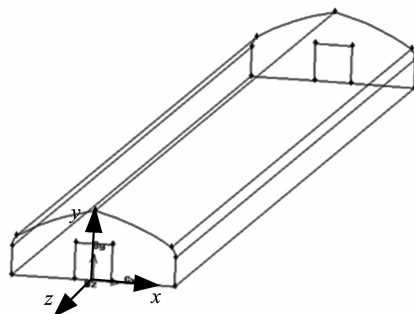


图1 大棚几何三维模型

2 网格划分及边界条件

2.1 网格划分

利用 Fluent 前处理软件 Gambit 建立流场区域的三维模型(图 2),并进行网格划分,整个区域全部采用六面体网格划分,大棚薄膜附近设置 4 层边界层,最终得到总网格数量为 1 462 272 个(图 3)。

收稿日期:2015-04-03

项目基金:江苏省农业科技自主创新资金[编号:CX(14)5076、CX(12)1004];国家科技支撑计划(编号:2013BAD08B03)。

作者简介:柏宗春(1981—),男,江苏扬州人,博士,助理研究员,主要从事农业智能装备研究。Tel:(025)84390493;E-mail:vipmaple@126.com。

通信作者:吕晓兰,博士,副研究员,主要从事农业智能装备研究。Tel:(025)84390082;E-mail:lxlanly@126.com。

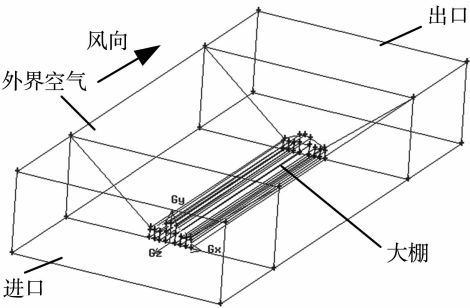


图2 流场计算区域三维模型



图3 网格划分

2.2 边界条件的设置及材料属性

流场进口采用速度进口 (velocity - inlet), 风速为 2 m/s, 方向与大棚屋脊平行; 出口采用压力出口 (pressure - outlet), 压力为大气压; 大棚薄膜、地面以及外围计算区域的边界设置为壁面边界条件 (pressure - outlet); 大棚的进口、出口以及通风窗设置为内部边界 (interior) (表 1)。研究表明, 在外界风速小于 0.5 m/s 时, 热压通风才对大棚通风的影响较大^[16], 故本仿真不考虑热辐射对流场的影响; 不考虑大棚内作物对大棚流场的影响。

表 1 边界条件的设置

边界名称	边界条件	数值
流场进口	velocity - inlet	2 m/s 平行于大棚屋脊
流场出口	pressure - outlet	大气压
大棚薄膜、地面和外边界	wall	无
大棚进出口和通风窗	interior	无

3 仿真结果分析

常见大棚通风窗主要有侧窗和天窗 2 种形式 (图 4)。天窗及侧窗的长度与大棚长度相同, 为 50 m; 门旁窗为本研究提出的新的大棚通风窗结构, 位于进出口两侧, 对称分布。为分析通风窗口的设置对大棚流场的影响, 本研究主要对侧窗高度、天窗宽度、天窗位置以及增开门旁窗等进行仿真。

3.1 无侧窗和天窗时大棚流场

由图 5 可见, 只有前后门、外界风速为 2 m/s 时, 大棚内气流速度明显低于大棚外界空气流速; $y = 1\text{ m}$ 截面上, 大棚进口两侧形成 2 个气流涡旋, 涡旋长度约 10 m, 涡旋之后有 2 个速度极低的气流区, 空气在内部旋转不前, 接近静止, 影响换气效率, 这对大棚通风十分不利; 大棚进口处气流速度为 2 m/s, 到中后部速度明显降低, 只有约 0.2 m/s, 气流速度太低, 严重影响大棚的换气速度; $y = 1、2、3\text{ m}$ 的中后部气流流

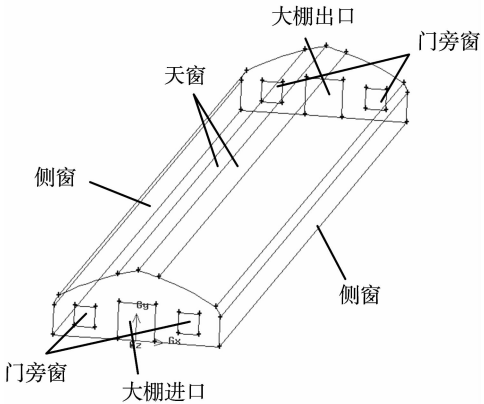
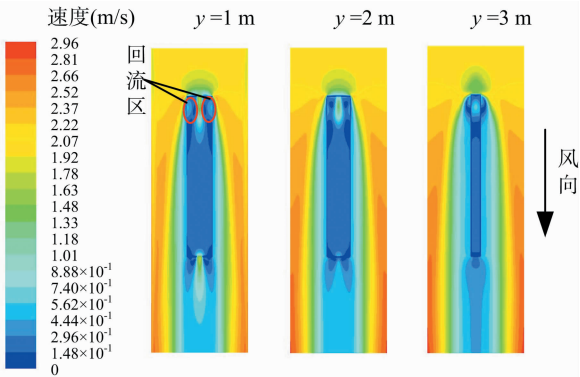


图4 大棚通风窗位置示意

速比较接近, 随着高度升高, 流速降低, 流场相对稳定。由图 6 可见, 大棚流场 $x = 0$ 时, 大棚从进口到出口气流速度下降速度比较明显, 20 m 后大棚中气流速度基本稳定, 约为 0.2 m/s。



只有前后门、外界风速为 2 m/s

图5 y 分别为 1、2、3 m 截面速度分布

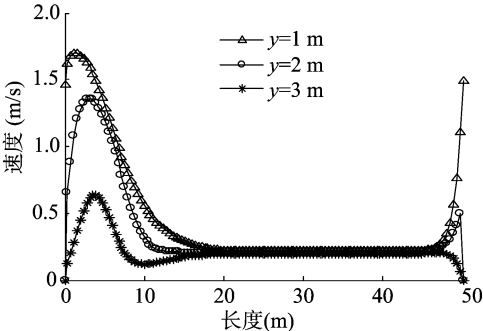


图6 大棚流场 $x=0$ 截面气流速度沿长度 ($y=1、2、3\text{ m}$) 的变化

3.2 侧窗对大棚流场的影响

侧窗为大棚普遍设置的通风窗, 长度为 50 m, 高度分别为 1.4、1.0、0.5 m, 大棚外界风速 2 m/s。由图 7 可见, 随着侧窗高度的增加, 大棚内气流速度不断增大; 侧窗高度为 0.5 m 时, 大棚中部和尾部更靠近大棚顶部的气流速度较低, 不利于大棚换气; 侧窗高度为 1.4 m 时, 棚内低速区域较小, 大棚中部气流速度基本达到 0.7 m/s 以上。由图 8 可见, 3 种高度侧窗下, $y = 1\text{ m}$ 截面流场分布比较相似, 进口两侧涡旋依然存在; 侧窗高度为 0.5 m 时, 大棚内气流速度相对较低; 侧窗高度为 1.0、1.4 m 时, 流场分布十分接近, 且气流速度相对较

高。因此,增开侧窗能显著提高大棚流场气流的速度,侧窗高度越高,棚内流速越高,但侧窗高度大于 1.0 m 后,流速增大幅度已不明显;增开侧窗不能消除进口两侧产生的涡流。

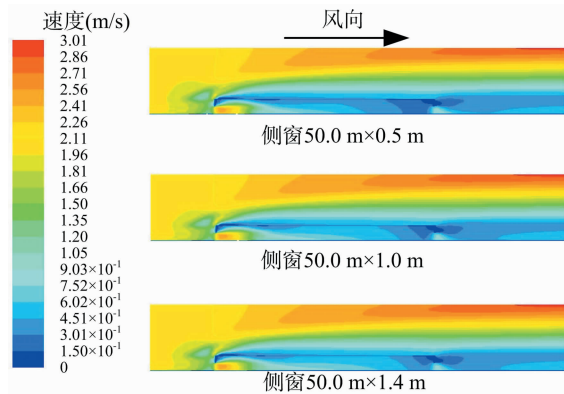


图7 不同高度侧窗 $x=0$ 截面速度云图

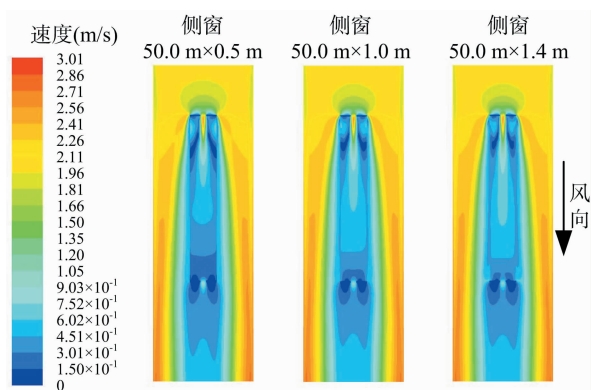


图8 不同高度侧窗 $y=1$ m截面速度云图

3.3 天窗对大棚流场的影响

由图 9 可见,大棚顶部分别设置尺寸为 0.5、1.0、1.5 m 的天窗时, $x=0$ 截面的速度分布规律比较相似,但随着天窗宽度的增加,气流速度不断增大,尤其是大棚后部低速区域减小比较明显。由图 10 可见,流场 $y=1.0$ m 时单开天窗,大棚内流场从中间向两侧边缘气流逐渐降低,特别在尾端靠近边缘的区域气流速度最低,对大棚中后部的流场区域影响较大,而对大棚前端流场影响较小;天窗宽度为 0.5 m 时,大棚尾部拐角处气流速度接近于 0,随着天窗宽度的增大,大棚边缘低速区域逐渐减小。因此,在单开天窗的前提下,大棚两侧边缘存在低速区,不利于大棚的通风换气。

3.4 同时开侧窗和天窗对大棚流场的影响

由于侧窗高度高于 1.0 m 时气流增速效果已不明显,随着天窗宽度增大,大棚内气流低速区逐渐减小。因此,本研究选取侧窗高度为 1.0 m、天窗宽度为 1.5 m 进行仿真,以分析大棚同时开侧窗、天窗时的内部流场分布规律。由于天窗对大棚的前半段流场影响小,而对后半段流场影响较大,本研究考虑尽可能减小天窗长度以减小大棚建设成本。

由图 11、图 12 可见,尾端天窗与全天窗相比,大棚顶部靠近薄膜的气流速度较低,其他区域基本相同;尾端天窗和全天窗在 $y=1.0$ m 截面的速度分布几乎相同,缩短天窗的长度并没有给流场带来大的影响。

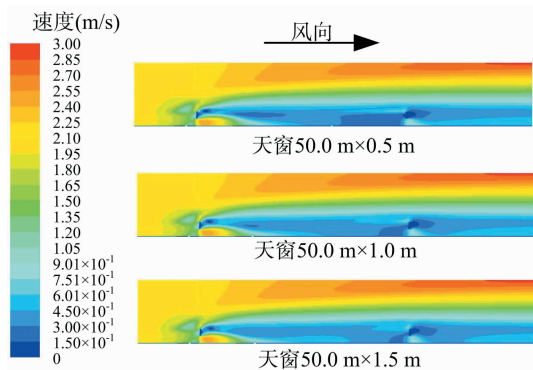


图9 不同宽度天窗流场 $x=0$ 截面速度分布

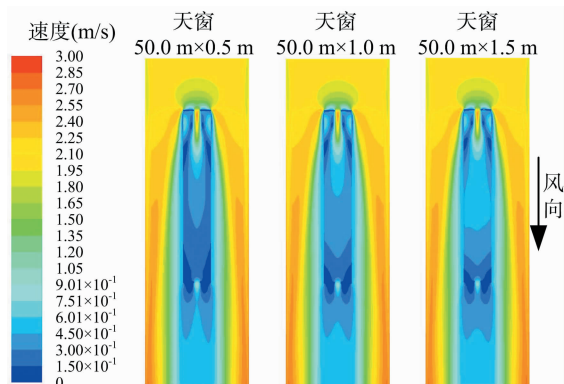


图10 不同宽度天窗流场 $y=1$ m截面速度云图

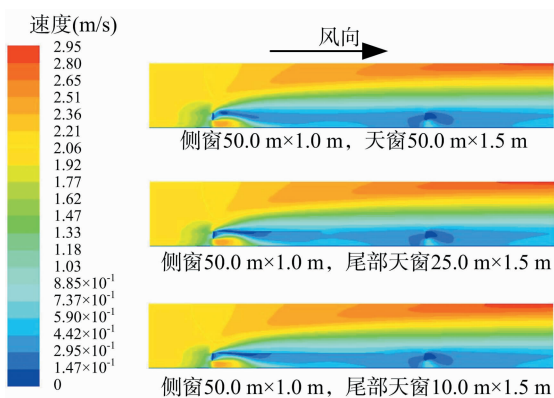


图11 不同长度天窗大棚 $x=0$ 截面速度云图

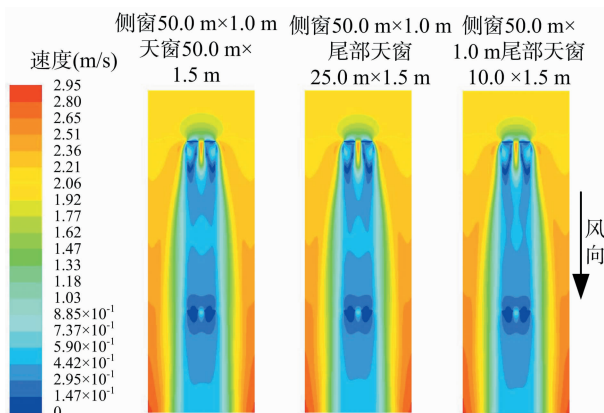


图12 不同长度天窗大棚 $y=1$ m截面速度云图

3.5 门旁窗对大棚流场的影响

由于大棚进口两侧存在回流区域,为减小回流区,考虑在进出口两侧设置门旁窗,以提高回流区换气效率。由图 13 可见,增开 $1.0\text{ m} \times 1.0\text{ m}$ 门旁窗时,由于进气口和出气口的面积增大,大棚内气流速度有所提高,进口两侧回流区已基本消失,但还是存在 2 个流速较低的区域;门旁窗尺寸增大至 $1.5\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ 时,回流区消失,且进口附近的低速区也消失,大棚内气流速度进一步提高。由图 14 可见,流场 $x=0$ 增开门旁窗时,大棚气流的分布规律类似,门旁窗尺寸较大时大棚内气流的平均流速较高。

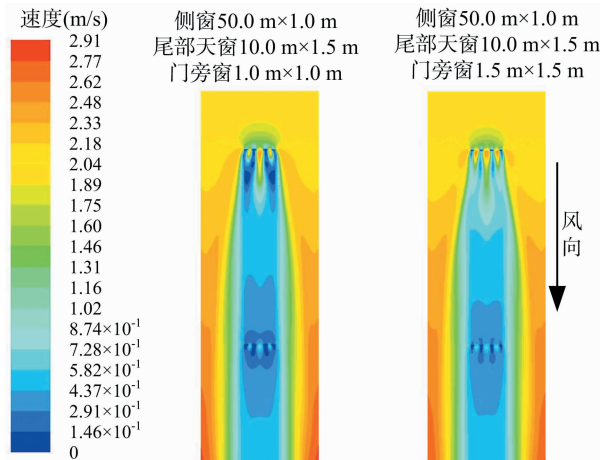


图13 增开不同尺寸门旁窗大棚 $y=1\text{ m}$ 截面速度云图

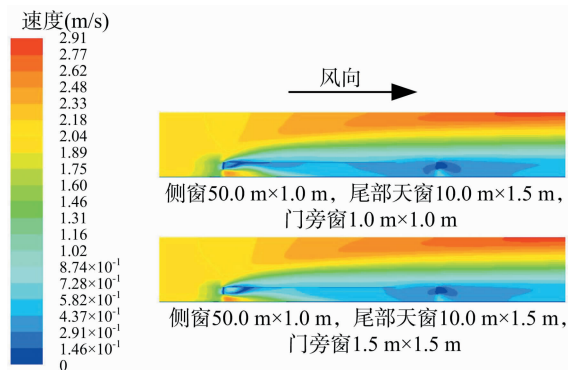


图14 增开不同尺寸门旁窗大棚 $x=0$ 截面速度云图

4 结论

本研究运用 Fluent 软件,建立塑料大棚的流场仿真模型,对大棚流场进行数值仿真,分析了无通风窗时大棚流场分布的基本规律,讨论了不同尺寸侧窗和天窗对流场的影响。结果表明,大棚气流速度随着侧窗高度的增大而增大,但高度超

过一定值时,气流速度对大棚的影响减弱,故从经济性角度来说,侧窗不宜太高;天窗对大棚流场的后部影响较大,对中前部影响较小;门旁通风窗可减小门旁回流区域,增大大棚内气流速度,可显著提升大棚通风换气效率,这为大棚结构设计提供了参考依据。通过仿真,确定 1 组大棚通风窗设置参数为:两侧侧窗为 $50.0\text{ m} \times 1.0\text{ m}$;尾部天窗为 $10.0\text{ m} \times 1.5\text{ m}$;门旁窗尺寸为 $1.5\text{ m} \times 1.5\text{ m}$,两侧对称分布,距离地面为 0.25 m ,距离大棚中心为 2 m 。

参考文献:

- [1]程亚斌. 浅析温室大棚通风的发展[J]. 城市建设理论研究:电子版,2011,1(23):21-23.
- [2]程秀花,毛罕平. 风向对温室内气流分布模式影响的 CFD 分析[J]. 山西农业大学学报:自然科学版,2009,29(6):520-524.
- [3]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,后插 7.
- [4]姜云超,王三反. 青藏高原生态大棚的建设与数值仿真[J]. 兰州交通大学学报,2004,23(3):128-132.
- [5]姜绪安,曹 阳,秦立举,等. 蔬菜大棚内气流流态分析研究[J]. 灌溉排水学报,2004,23(4):78-80.
- [6]傅 宁,刘德义. 温室大棚气流的 CFD 数值模拟[J]. 天津农业科学,2006,12(3):17-19.
- [7]王伟光,秦立举,曹 阳,等. 不同形式大棚内部气流流态的比较[J]. 扬州大学学报:农业与生命科学版,2005,26(2):86-88.
- [8]陆小伟. 大棚结构型式比较分析[J]. 灌溉排水学报,2005,24(5):50-55.
- [9]沈明卫,郝飞麟. 两种风向下单栋塑料大棚内自然通风流场模拟[J]. 农业工程学报,2004,20(6):227-232.
- [10]陈加浪,陈大跃,何科爽,等. 单栋塑料大棚在高温低风速下的自然通风数值研究[J]. 农机化研究,2011,33(8):19-22.
- [11]吴飞青,胥 芳,张立彬,等. 基于多孔介质的玻璃温室加热环境数值模拟[J]. 农业机械学报,2011,42(2):180-185.
- [12]张起勋. 日光温室室内空气流动特性研究[D]. 长春:吉林农业大学,2007.
- [13]曹 阳. 蔬菜大棚内部流场三维紊流数值模拟及大棚断面优化研究[D]. 扬州:扬州大学,2004.
- [14]王向军,刘志刚,李 荣,等. 基于 CFD 数值模拟方法的日光温室建模研究[J]. 农机化研究,2014,36(6):184-188.
- [15]Reichrath S, Davies T W. Computational fluid dynamics simulations and validation of the pressure distribution on the roof of a commercial multi-span Venlo-type glasshouse[J]. Journal of Wind Engineering&Industrial Aerodynamics,2002,90(3):139-149.
- [16]Mistriotis A, Arcidiacono C, Picuno P, et al. Computational analysis of ventilation in greenhouses at zero- and low- wind speeds[J]. Agricultural&Forest Meteorology,1997,88(97):121-135.