

张伟建,王新忠,李亮亮,等. 夏季屋顶全开型温室遮阳网降温调控的 CFD 分析[J]. 江苏农业科学,2017,45(19):253-256.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.19.060

# 夏季屋顶全开型温室遮阳网降温调控的 CFD 分析

张伟建,王新忠,李亮亮,洪亚杰

(江苏大学农业装备工程学院,江苏镇江 212013)

**摘要:**为研究遮阳网对屋顶全开型温室夏季降温的影响,建立屋顶全开型温室的计算流体动力学(CFD)模型,在上海地区进行夏季试验。通过对比试验实测值与模拟值验证了模型的有效性,并利用试验和 CFD 模型分析了遮阳网对温室降温的影响,结果表明,遮阳网的使用层数对温室降温影响明显,2 层遮阳网下温室内室外温差为 4.5 ℃,1 层遮阳网下为 3.7 ℃,无遮阳网为 1.3 ℃;利用 CFD 模拟分析了增加外遮阳网后的温室内温度场,在基本满足植物生长光照要求的情况下,温室接收的太阳总辐射降为 176.3 W/m<sup>2</sup>,室内平均温度降为 37.6 ℃,温室内局部高温状况也被大大缓解。

**关键词:**遮阳网;夏季降温;屋顶全开型温室;CFD

**中图分类号:** S625.5<sup>+</sup>1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2017)19-0253-04

夏季降温一直是困扰玻璃温室种植的一个重大问题,采用机械通风降温,耗能较高,且易形成不均匀的温度场,造成作物品质下降。采用自然通风时耗能少,温度分布均匀,但传统温室的设计方式使温室天窗通风率低,难以实现自然通风的有效降温。屋顶全开天窗型温室增强了温室自然通风效果,配合遮阳网的使用,在夏季高太阳辐射弱风天气中达到很好的降温效果。这种新型温室在我国尚处在推广期,有待进一步加强对它的试验分析和理论研究。

目前,温室流场研究大多针对塑料大棚或普通文洛型温

室展开<sup>[1-3]</sup>,表明计算流体动力学(computational fluid dynamics,简称 CFD)方法是温室流场研究中的有效手段。遮阳网是重要的温室调控设备,对温室内温度、湿度等环境参数的调节都起到了非常重要的作用。沈明卫等利用布点测量的研究方法分别建立了遮阳网对温室内环境调控影响的光辐射模型,该模型可以在测得室外光照度和遮阳网自身参数的情况下预测遮阳温室的室内光照情况<sup>[4-6]</sup>。Abdel-Ghany 等给出了不同遮阳网布置下遮阳温室对室外辐射值的接收情况<sup>[5-6]</sup>,为使用 CFD 方法进行遮阳网对温室调控影响的模拟提供了直接参考。Willits 等利用布点测量的方法研究发现,遮阳网的使用不仅有利于温室的降温,也有利温室内植物水分的保持<sup>[7]</sup>。李永欣等采用了辐射折算的方法成功地在 CFD 中模拟了遮阳网对温室内环境的影响<sup>[8]</sup>。遮阳网对温室的调控作用巨大,已有文献主要针对温室中的某几个点分析遮阳网的影响,利用 CFD 手段从整体温室流场角度研究遮

收稿日期:2016-04-27

基金项目:国家科技支撑计划(编号:2014BAD08B03);江苏省重点研发计划(编号:BE2016323);江苏省昆山市科技计划(编号:KN1504)。

作者简介:张伟建(1988—),男,江苏连云港人,硕士研究生,主要从事温室流场方向研究。E-mail:9492945497@qq.com。

[6]陈青云,原园芳信,吉本真由美. PO 与 PVC 薄膜温室的光温环境及其薄膜流淌性的关系[J]. 农业工程学报,1997,13(1):130-135.

[7]杨迪桂. 不同薄膜覆盖下小拱棚的环境特性分析及其湿度环境的模拟[D]. 北京:中国农业大学,2002.

[8]孙信成,王秀峰,魏珉,等. 6 种保温被的应用效果研究[J]. 山东农业科学,2015,47(12):35-37.

[9]王宇欣. 高寒地区大型连栋充气温室节能保温机理及结构可靠性的系统研究[D]. 北京:中国农业大学,2000.

[10]闫彦涛,邹志荣,李凯. 太阳能相变蓄热系统在温室加温中的应用[J]. 中国农业大学学报,2016,21(5):139-146.

[11]孙心心,邹志荣,王宏丽,等. 新型复合相变墙日光温室性能实测分析[J]. 农机化研究,2010(3):168-170.

[12]李国柱,冯国会,赫娜,等. 不同冷却温度下相变材料 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>·10H<sub>2</sub>O 的过冷行为[J]. 材料热处理学报,2013,34(9):31-35.

[13]章学来,盛青青,葛铁群. 十二水磷酸氢二钠相变性能改进研究[J]. 化学工程,2009,37(5):53-56.

[14]郭靖,邹志荣,刘玉凤. 不同方式封装的相变材料蓄热效果研

究——基于日光温室[J]. 农机化研究,2012(2):137-140.

[15]铁生年,蒋自鹏. 相变储能材料在温室大棚中应用研究进展[J]. 硅酸盐通报,2015,34(7):1933-1940.

[16]王宏丽,王朋,邹志荣. 硬脂酸正丁酯/聚苯乙烯定形相变材料实验[J]. 太阳能学报,2010,31(11):1471-1474.

[17]王宏丽,李晓野,邹志荣. 相变蓄热砌块墙体在日光温室中的应用效果[J]. 农业工程学报,2011,27(5):253-257.

[18]陈超,果海凤,周玮. 相变墙体材料在温室大棚中的实验研究[J]. 太阳能学报,2009,30(3):287-293.

[19]管勇,陈超,李琢,等. 相变蓄热墙体对日光温室热环境的改善[J]. 农业工程学报,2012,28(10):194-201.

[20]Alkilani M M, Sopian K, Alghoul M A, et al. Review of solar air collectors with thermal storage units [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(3):1476-1490.

[21]Benli H, Durmus A. Performance analysis of a latent heat storage system with phase change material for new designed solar collectors in greenhouse heating [J]. Solar Energy, 2009, 83(12):2109-2119.

阳网对温室调控的影响。总之,前人的研究多针对大棚温室、日光温室等传统温室类型,针对屋顶全开窗型温室的研究较少,尤其是考虑遮阳网后的屋顶全开窗型温室自然通风调控的研究。

本研究对屋顶全开窗型温室进行了夏季高温天气下的实测试验,对比不同遮阳网层数工况下室温的变化情况,分析遮阳网使用层数对温室降温的影响。利用温室 CFD 模型描述温室内温度分布,模拟分析在增加外遮阳网后温室的流场分布情况,为使用遮阳网降温调控提供参考。

1 试验方案与 CFD 建模

1.1 试验对象

试验屋顶全开型温室是位于上海金山区的连栋温室,温室南北走向,共 3 跨,温室整体长 41.10 m,宽 28.80 m,檐高 4.32 m,脊高 5.30 m,天窗可开至水平倾角 52°,选取温室中间 1 跨进行室内温度测量。温室配备 2 层室内遮阳网,分别位于距地 4.0、4.5 m 的高度上。温室东西 2 面玻璃墙无通风设备,北墙有风机,尺寸为 1.38 m × 1.38 m,距地 0.32 m,每跨 2 台,均匀分布在跨间宽度上,南墙有湿帘,距地 0.4 m,湿帘宽 1.5 m(图 1)。在 CFD 建模分析时,以正东向为  $x$  轴正

向,以向上高度方向为  $y$  轴正向,以正南向为  $z$  轴正向,温室西北角立柱和地面交点为坐标轴原点。

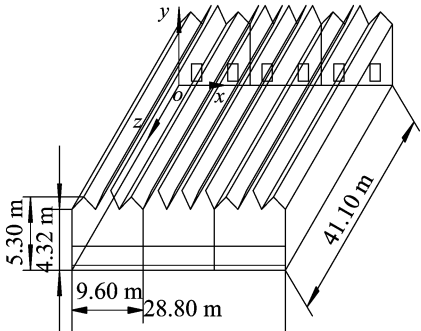


图1 温室几何尺寸模型示意

1.2 试验方法

使用 ZDR-3WIS 型温度自动记录仪对温室内温度进行测量,设置记录时间间隔为 5 min,每个温度记录仪有 3 个温度测量探头,测量时,3 个探头分别分布在 0.7、1.3、2.2 m 等 3 个不同的高度上,将记录仪布置成 2 个成十字交叉的竖直面(图 2)。

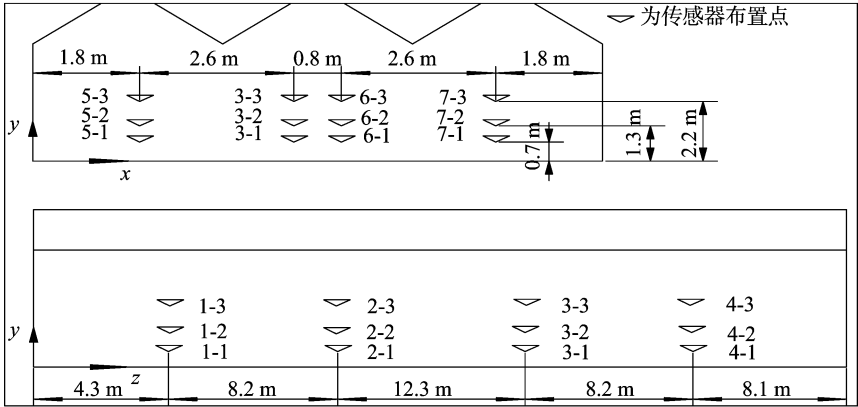


图2 温度传感器布置示意

使用 TYD-ZS2 型环境数据记录仪记录外部环境数据,设置记录时间间隔为 1 min,该气象站可测量室外的太阳总辐射、光照度、气温、风速、风向等环境指标。2015 年 8 月 1 日 13:50—15:20 对屋顶全开型温室进行室内外参数的测量,气象站位于距温室 20 m 的室外空旷处,温室 2 层室内遮阳网都打开,东西 2 跨中仅中间小屋顶(指每跨屋顶中有 3 个小屋顶)的天窗打开,居中 1 跨的 3 个小屋顶全部打开,将北山墙的风机后盖打开,温室北端外部气流从风机口的位置进入温室,温室南端以南山墙干湿帘透气孔为通风口。试验中,使用 FLUKE Infrared Thermometers 568 红外点温仪进行温室内外地面和玻璃温度的测量,每 15 min 测量 1 次。

1.3 模型设置

1.3.1 模型边界条件和材料属性设置 本研究在 ICEM 软件中建立了几何模型,该模型设立 10 倍于温室长宽高尺寸的计算域。对模型进行网格划分,整体划为 343 万个网格,其中温室网格 92 万个。根据温室的空气流动特征<sup>[9]</sup>,在 Fluent 中选取标准  $k-\varepsilon$  湍流方程,选取 DO 辐射模型进行计算。仿真中,将实测风向、风速进行矢量分解,设置西侧和南侧计算域

为进风口,风速都设置为 0.566 m/s,东侧和北侧为出风口。

选取 13:50 时的环境参数验证模型。按照实际测量的温度值设置内外地面及覆盖材料模型中的温度,模型中空气、地面和玻璃等材料的属性设置如表 1 所示。

表 1 CFD 模型中材料属性的相关参数

材料	折射率	密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	导热系数 [ $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ]	吸收系数 ( $\text{m}^{-1}$ )	比热容 [ $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ]
空气	1.000 3	1.165	0.026 79	0	1 025.5
玻璃	1.700 0	2 500	0.710 00	0.1	700.0
混凝土	1.600 0	2 100	1.400 00	0.6	880.0

1.3.2 遮阳网和干湿帘在数字模型中的设置 本研究根据已有的关于遮阳网的研究文献<sup>[5-6]</sup>,结合试验屋顶全开型温室所用遮阳网具体材料的物性参数,通过辐射折减的方式实现温室遮阳的模拟。模拟设置中,将辐射值由 821.000  $\text{W}/\text{m}^2$  的室外太阳辐射折减为 2 层遮阳网下的 341.257  $\text{W}/\text{m}^2$ 。

在试验过程中,发现湿帘通风口在夏季高温条件下对温室山墙通风有很大影响,在模型中应反映干湿帘的影响。通

过分析干湿帘对空气的阻碍特性,本研究在模型中将干湿帘视作多孔介质,并且忽略流体的非线性惯性损失量,由基本渗流定律<sup>[10]</sup>得出:

$$\Delta P = -\frac{\mu v}{\alpha} \Delta m_0 \quad (1)$$

其中: $\Delta P$  为流体在材料两侧的压力差,  $\text{N/m}^2$ ;  $\mu$  为流质黏度, 取  $18.6 \mu\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;  $v$  为流质到达材料表面的速度, 取实测值  $1.3 \text{ m/s}$ ;  $\alpha$  为材料的渗透率,  $\text{m}^2$ ;  $\Delta m$  为材料的厚度, 测得为  $0.1 \text{ m}$ 。

忽略温室内外热压的影响, 利用实际测量的干湿帘两侧风速值, 通过伯努力风-压普遍应用关系<sup>[11]</sup>求得:

$$P = 0.5 \rho v^2 \quad (2)$$

其中:  $P$  为风压;  $\rho$  为空气密度, 取  $1.25 \text{ kg/m}^3$ ;  $v$  为风速。可

利用试验中实测的湿帘两侧风速通过公式(2)求出气压差。一侧风速为  $1.3 \text{ m/s}$ , 另一侧为  $0.3 \text{ m/s}$ , 所以, 求得气压差  $\Delta P = -1 \text{ N/m}^2$ 。在取得  $\Delta P$ 、 $\mu$ 、 $v$ 、 $\Delta m$  值的情况下, 可通过公式(1)求得湿帘材料的渗透率  $\alpha = 2.4 \text{ mm}^2$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同的遮阳网工况下温室降温效果分析

图3为温室在2层内遮阳网、1层内遮阳网和无遮阳网3种遮阳工况下温室室内温度和室外温度的数据对比, 数据记录时温室都处在自然通风状态。分析可见, 遮阳网的使用层数对温室降温调控的影响明显, 在2层遮阳网下, 温室内外温度平均相差  $4.5^\circ\text{C}$ ; 当变为1层遮阳网时, 室内外温度平均相差  $3.7^\circ\text{C}$ ; 当无遮阳网时, 室内外温度平均仅相差  $1.3^\circ\text{C}$ 。

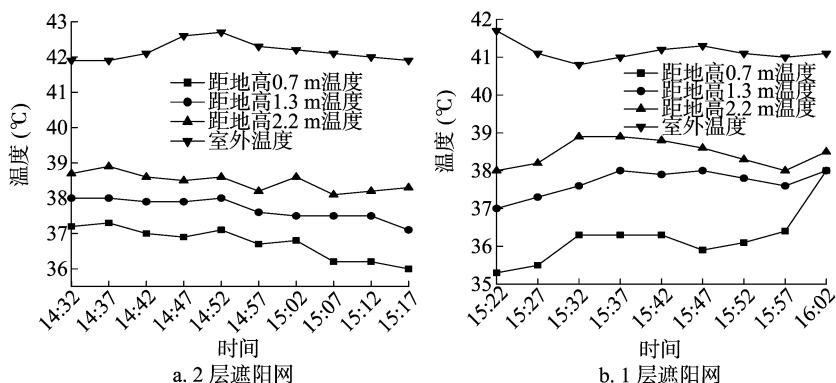


图3 3种不同遮阳网工况下温室降温效果对比

### 2.2 CFD模型的验证

经过模拟, 将室内相同位置的模拟值和试验实测值进行对比。以1~7的排列顺序将2.3 m高度温度传感器的探头位置记为P1~P7, 1.3 m高度记为P8~P14, 0.7 m高度记为P15~P21, 将各位置上的模拟值和试验实测值进行对比, 对比情况如图4所示。

由图4可见, 在各个高度上, 模拟值与实测值的变化趋势基本一致, 两者最大相对误差为6.1%, 最小相对误差为0.3%, 实测值与模拟值的平均相对误差为1.1%, 验证模型有效。

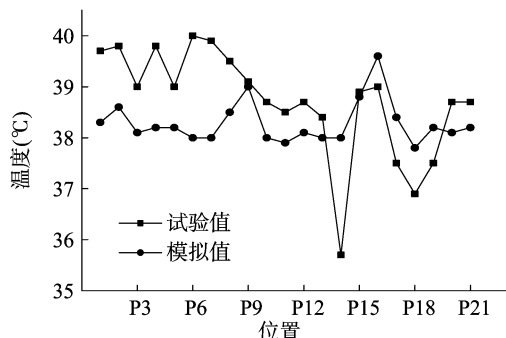


图4 温室的实测值和CFD模型的模拟值

### 2.3 温室温度场的CFD分析

由图5可以看出, 温室温度分布整体的均匀情况较差, 尤其在温室西北方向形成一大片的高温区域, 不利于作物种植。

由图6可知, 距地面1 m处沿温度长度方向上的最高温

度为  $39.8^\circ\text{C}$ , 最低温度为  $38.7^\circ\text{C}$ , 平均温度为  $39.3^\circ\text{C}$ 。结果表明, 在距地面1 m高度处温室不同位置的温差较大, 并且温度整体偏高。

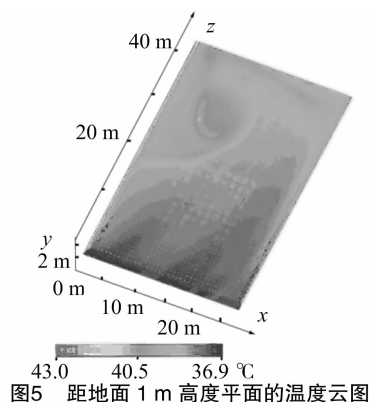


图5 距地面1 m高度平面的温度云图

### 2.4 基于CFD的屋顶全开型温室的遮阳网降温调控

为模拟温室加设外遮阳网的工况, 在CFD模型中需要对遮阳网遮盖区域进行辐射折减。通过文献资料<sup>[5-6,12]</sup>分析, 如模拟温室使用2层内遮阳和1层外遮阳的工况, 须要将模型中室外太阳总辐射在原始值  $824.0 \text{ W/m}^2$  的基础上折减为  $176.3 \text{ W/m}^2$ 。根据文献[13]的光照模型, 并结合遮阳网材料参数, 此状态下温室的室内光照度为  $31.5 \text{ klx}$ , 光照度值处在大多数花卉的光补偿点和光饱和点之间, 满足植物对光照度的要求。

将温室的试验工况(开2层内遮阳网工况)命名为工况

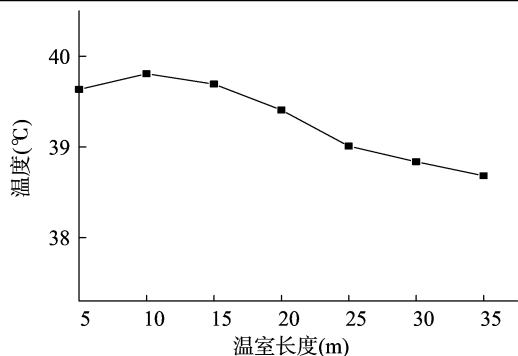


图6 距地面 1 m 处沿温室长度方向上温度变化曲线

A, 将在 A 工况的基础上另加设 1 层外遮阳网的工况命名为工况 B。由图 7 可见, B 工况下温室高温区域与其周围区域的温差较 A 工况小, 即 B 工况下高温区域温度与周围温度相差的程度被削弱, 这有利于保证植物种植的品质。工况 A、工况 B 下温室温度的平均值为分别为 38.4、37.6 °C。

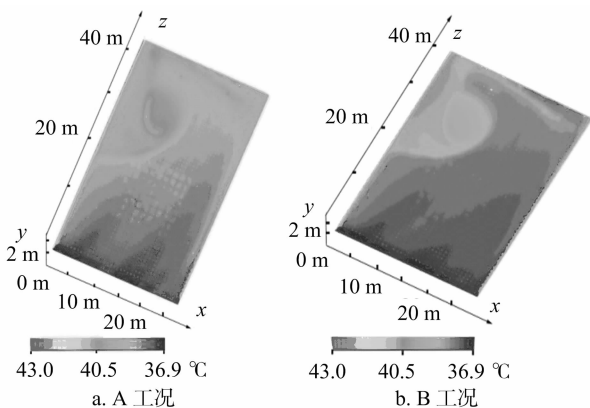


图7 距地 1 m 高度平面处的温度云图

图 8 为在 A、B 等 2 种工况下距地面 1 m 处室内温度值沿温室长度方向变化的对比情况。从分布上看, B 工况下温室温度分布的均匀性好于 A 工况, B 工况下各个位置上的温度值都低于 A 工况。

综合来看, 在加设外遮阳网后, 温室整体温度降低至 37.6 °C, 温室作物区的温度也降低至 37.3 °C, 基本满足了温室植物的种植需要, 温室高温区域温度与周围温度的差值也有所减小, 更利于植物种植的品质。

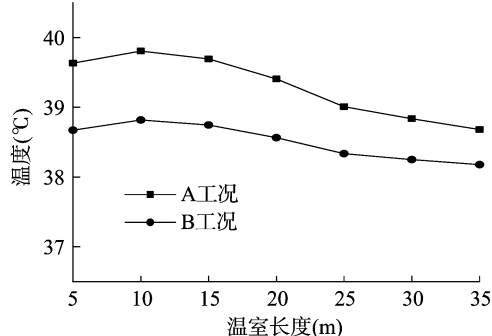


图8 沿温室长度方向上温度变化曲线

### 3 结论

遮阳网使用层数对温室的降温影响明显, 在 2 层遮阳网

下, 屋顶全开型温室内温度与室外温度平均相差 4.5 °C; 1 层遮阳网下, 室内外温度平均相差 3.7 °C; 当无遮阳网时, 室内外温度平均仅相差 1.3 °C。

假设温室的空气流动符合标准壁面函数, 选取标准  $k-\varepsilon$  湍流方程做温室湍流模拟, 选取 DO 辐射模型作为辐射计算方法, 建立并实试验证了屋顶全开型温室 CFD 模型的有效性。利用 CFD 模拟加设外遮阳网后温室的温度场情况, 在调控温室接收的辐射值折减为 176.3 W/m<sup>2</sup> 后, 室内光照度基本满足植物生长要求, 温室内的平均温度变为 37.6 °C, 比现行工况降低了 0.8 °C, 且温室内局部高温的情况被大大缓解。

### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Zhang X, Wang H L, Zou Z R, et al. CFD and weighted entropy based simulation and optimisation of Chinese solar greenhouse temperature distribution [J]. Biosystems Engineering, 2016, 142: 12–26.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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): 13928–13937.
- [7] Willits D H, Peet M M. Intermittent application of water to an externally mounted, greenhouse shade cloth to modify cooling performance [J]. Transactions of the Asae, 2000, 43 (5): 1247–1252.
- [8] 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.
- [9] Sase S, Takakura T, Nara M. Wind tunnel testing on airflow and temperature distribution of a naturally ventilated greenhouse [J]. Acta Horticulturae, 1984, 148: 329–336.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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 & Management, 2006, 47 (15/16): 2612–2628.
- [13] 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.