

连栋玻璃温室天沟结构对栽培区光环境的影响分析

周 波¹ 孙维拓¹ 郭文忠¹ 周宝昌² 石 磊³ 李光聚³

(1.北京农业智能装备技术研究中心,北京 100097; 2.中国农业大学园艺学院,北京 100083;
3.寿光市农业农村局,寿光 262700)

摘要:为降低北方地区连栋温室冬季生产能耗、提高温室保温性能,设计了大斜面外保温连栋玻璃温室,即寿光型智能玻璃温室。该温室采用大天沟设计,安装了外保温被及传动机构,因此形成了较宽的遮阴带,影响了栽培区的太阳辐射及温室透光率。为分析天沟尺寸对室内光环境的影响,构建了连栋温室天沟对温室栽培区内不同位置辐射强度影响的动态模型,并基于该模型对室内光环境进行了均匀性与敏感性分析。结果表明:天沟结构对栽培区内日累积辐射平均值的影响程度从大到小依次为天沟间距、天沟宽度、天沟垂直厚度和天沟高度;寿光型智能玻璃温室的天沟设计为相邻两天沟间距 12.00 m、天沟水平宽度 1.60 m、垂直厚度 0.86 m、天沟下沿离地面高度 6.30 m,可以保证栽培区内最佳的光照均匀性。不同情景下的模型模拟结果表明,为确保栽培区内光照均匀性,在栽培区内辐射强度变异系数最小的情况下,山东省寿光地区温室天沟高度、天沟垂直厚度之和与天沟间距、天沟宽度之和的比值在 0.49~0.54 之间。本研究可为寿光型智能玻璃温室在不同地区的设计应用提供理论依据。

关键词:连栋温室;天沟;辐射分布;动态模型

中图分类号:S625 文献标识码:A 文章编号:1000-1298(2021)05-0286-07 OSID:



Analysis and Optimization of Greenhouse Gutter Effect on Radiation Distribution inside Multi-span Greenhouses Based on Dynamic Model

ZHOU Bo¹ SUN Weituo¹ GUO Wenzhong¹ ZHOU Baochang² SHI Lei³ LI Guangju³

(1. Beijing Research Center of Intelligent Equipment for Agriculture, Beijing 100097, China
2. College of Horticulture, China Agricultural University, Beijing 100083, China
3. Shouguang Agriculture and Rural Bureau, Shouguang 262700, China)

Abstract: Indoor farming system has played an important role in precision agriculture. In recent years, many innovative greenhouses have been built in China. In order to enhance the thermal insulation of multi-span greenhouses in northern region, external thermal screen has been installed on multi-span greenhouses (Shouguang-type intelligent greenhouses). The external thermal screen and its power mechanism were installed above a large gutter. However, the larger gutter caused the lower light intensity in the greenhouse. In order to analyze the indoor light environment and optimize the gutter and greenhouse design, a dynamic model of light distribution inside the greenhouse was constructed. Based on the model, the uniformity and sensitivity of indoor light environment were analyzed. The results showed that the order of the influence on the average value of daily accumulated radiation in the cultivation area was the gutter distance, width, depth and height. Among different design combinations, there were multiple optimal ones of light distribution in the cultivation area. And the current gutter design of Shouguang type greenhouse was reasonable for uniform indoor light environment on local winter solstice day, including the distance (12.00 m), and width (1.60 m), depth (0.86 m) and height (6.30 m) of single gutter. According to the simulation results under different scenarios, the suitable ratios of the sum of gutter height and depth over the sum of gutter distance and width among all the suitable designs (the

收稿日期:2020-08-16 修回日期:2020-09-15
基金项目:宁夏回族自治区重点研发计划项目(2018BBF02011)、宁夏回族自治区重点(重大)研发专项(2019BBF02010)和国家农业信息
化工程技术研究中心寿光试验站项目
作者简介:周波(1990—),男,助理研究员,博士生,主要从事设施园艺环境模型研究,E-mail: zhb_nash@foxmail.com
通信作者:郭文忠(1970—),男,研究员,博士生导师,主要从事设施蔬菜栽培与智能装备研究,E-mail: guowz@nercita.org.cn

minimum variation coefficient of radiation intensity) were between 0.49 and 0.54. The dynamic model could provide a theoretical basis for the design and application of Shouguang-type intelligent greenhouses in different regions.

Key words: multi-span greenhouse; gutter; radiation distribution; dynamic model

0 引言

目前我国已建成的荷兰型玻璃温室达 140 hm², 在建和计划建设的荷兰型温室近 682 hm²^[1]。在我国北方地区冬季,以晴朗干燥天气居多,白天光照充足,夜间温度较低,加热需求大,对加热系统和温室密闭性、保温性提出了更高要求^[2]。因此,温室设计必须根据国内的实际情况,从加温、保温性能上进行“荷兰模式”中国本土化的优化创新。对于连栋温室,屋顶面积远远大于周围结构的面积,温室供热系统的能量主要消耗在围护结构传热耗热上,降低顶部传热量对温室节能至关重要,如连栋玻璃温室内的保温幕是重要的节能保温措施^[3]。借鉴中国传统日光温室的保温特性,其前屋面外的保温被对温室节能起到重要作用^[4]。连栋玻璃温室的外保温系统结构设计难度较大,为解决玻璃温室外保温问题,郭文忠等^[5]设计了一种具有外保温性能的槽体连栋温室结构,即寿光型智能玻璃温室,并在山东省寿光地区成功推广,应用面积达 88 500 m²。该外保温型温室将常规最大 0.3 m 宽的玻璃温室天沟^[6]扩展到 1.6 m,用于安装保温被及传动机构。

寿光型智能玻璃温室独特的大天沟结构设计,实现了连栋玻璃温室外保温系统的安装,增强了玻璃温室保温性。但是,温室天沟设计需考虑结构荷载^[7]、排雨水和冷凝水、保温、遮阴等因素^[8],在保证排水量和荷载的基础上,温室 1.6 m 宽的天沟会产生较大的遮阴面积,降低了温室透光率。光是植物光合作用的动力源,遮阴影响光合特性^[9],同时也影响植物蒸腾^[10-11],弱光通常是影响温室蔬菜作物高产稳产的主要因素^[12]。提高覆盖材料光学性能^[13]、增加人工光源等可以改善温室内光环境。温室骨架尺寸及幕布系统等均会对温室内光环境产生不同程度的影响^[14],不同温室结构的温室内光环境也不同^[15]。唐卫东等^[16]构建了一种点光源在温室内辐射分布的可视化模型,该模型模拟了光源动态分布,但仍缺乏针对不同温室平行太阳光动态分布的研究。为降低天沟对温室透光率的影响,周莹^[17]设计了一种可透光天沟,该透光天沟以环氧树脂为基料,并辅以助剂和透明纤维等材料,可以使由天沟形成的遮阳面积减少 60% 以上,透光率提高 70% 以上。但是该材料方法只能用于传统连栋温室天沟,

不适用于安装保温被及传动机构的温室。欧洲对于光伏玻璃温室内透光率的研究表明,覆盖率每增加 1% 的光伏板,则温室内年累积辐射量平均降低 0.8%,天沟高度每增加 1 m,则光伏温室内辐射量相应增加 3.8%^[18-19]。这表明温室遮阴结构尺寸与温室设计尺寸之间关系可以进行优化。因太阳角度随时间变化,南北走向的天沟产生的阴影也会随时间改变,因此不同天沟宽度、垂直厚度、安装高度以及相邻两天沟间距等因素,对温室光环境的均匀性会产生不同的影响,而太阳辐射在温室内分布的均匀性是重要的温室采光性能评价指标^[20]。

为分析连栋温室天沟对栽培区光环境的影响、优化设计天沟和温室,本文以辐射均匀性为主要评价指标,从理论上构建温室内太阳辐射分布动态模型,分析天沟阴影在温室内的分布规律,进而对寿光型智能玻璃温室进行天沟和温室结构优化设计。

1 材料与方法

1.1 假设

为构建天沟宽度、垂直厚度、安装高度和相邻两天沟间距与栽培区内光环境均匀性之间的数学模型,提出如下假设:①天沟只对直射光产生阻挡,散射光在空间内任何一个方向上具有相同的辐射强度。②两个天沟之间栽培区同一时间内只受一个天沟阴影的影响。③温室尺寸、天沟数量不受限制,天沟长度在南北方向上无限延伸。④屋面角度对温室透光率没有影响。⑤只考虑晴朗天气条件下室内辐射分布。

1.2 计算方法

寿光型智能玻璃温室装有外保温被,其外保温系统如图 1a 所示,温室保温被及传动装置安装于温室天沟中,可以实现玻璃温室外保温设计。其立面设计如图 1b 所示,温室初始设计跨度 13.6 m(天沟之间间距 12 m,天沟宽度 1.6 m),天沟下沿与地面净高度 6.3 m,天沟及保温层整体厚度为 0.86 m。相邻天沟之间为栽培区,天沟正下方为操作路面(非栽培区)。图 1c 为温室效果图。为构建数学模型,在平面坐标系 XOY 中建立平面坐标系简图(图 1d),其中温室一个天沟的水平投影面最东侧与地面交点为坐标原点,X 轴为跨度方向,东侧为正,Y 轴为高度方向,向上为正。天沟宽度为 W、垂直厚度

为 D 、安装高度为 H 、相邻两天沟间距为 L ，某时刻太阳光线在 XOY 坐标系投影与 X 轴正方向之间的夹角为 α ，天沟阴影两侧端点的 X 坐标分别为

$$X_a = \min \left(\frac{L \tan \alpha - H - D}{\tan \alpha}, \frac{L \tan \alpha - H}{\tan \alpha} \right) \setminus (L + W) \tag{1}$$

$$X_b = \max \left(\frac{\tan \alpha (L + W) - H - D}{\tan \alpha}, \frac{\tan \alpha (L + W) - H}{\tan \alpha} \right) \setminus (L + W) \tag{2}$$

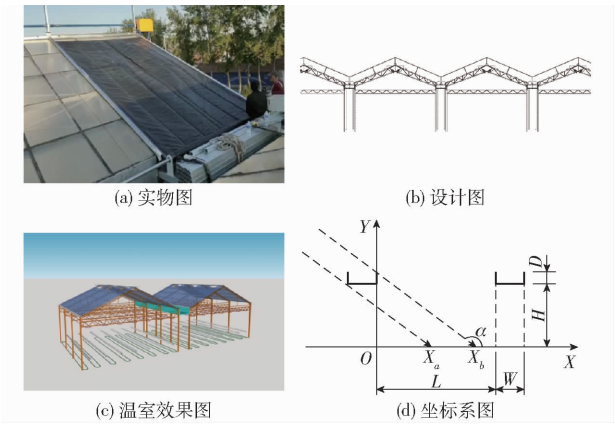


图 1 外保温温室天沟设计

Fig. 1 Multi-span greenhouses with external thermal screen

为保证太阳高度角低时，能够计算出不同位置天沟在栽培区域的阴影位置(图 1d)， X_a 和 X_b 利用取余计算。

采取划分栽培区域内阴影及非阴影区域的方法，在栽培区内进行均匀取样，将 L 均匀分为 n 个线段，产生 $n + 1$ 个样本点。随着时间的变化，所有样本点的阴影状态可计为二维矩阵 S ，行方向代表取样点空间位置，列方向为时间序列，其列数为 $n + 1$ ，行数为时间向量 t 的长度。 $t(j)$ 时刻 S 的计算式为：

当 $X_a(j) < X_b(j)$ 时

$$S(j,i) = \begin{cases} 1 & \left(\frac{(i-1)L}{n} < X_a(j) \text{ 或 } \frac{(i-1)L}{n} > X_b(j) \right) \\ 0 & \left(X_a(j) \leq \frac{(i-1)L}{n} \leq X_b(j) \right) \end{cases} \tag{3}$$

当 $X_a(j) > X_b(j)$ 时

$$S(j,i) = \begin{cases} 1 & \left(X_b(j) < \frac{(i-1)L}{n} < X_a(j) \right) \\ 0 & \left(\frac{(i-1)L}{n} \leq X_b(j) \text{ 或 } \frac{(i-1)L}{n} \geq X_a(j) \right) \end{cases} \tag{4}$$

其中 $0 < i \leq n + 1 \quad 0 < j \leq l \quad l = \frac{t_{set} - t_{rise}}{\Delta t}$

式中 l ——时间向量 t 的长度

$S(j,i)$ ——矩阵中第 j 行第 i 列的元素

t_{set} ——太阳落山时刻

t_{rise} ——太阳升起时刻

Δt ——取样时间间隔，s

$S(j,i)$ 为 0 时表示取样点在此时刻处于阴影区域，值为 1 时表示处于非阴影区域。

一年中，某一时刻的太阳位置及与地球一特定地点的入射光线角度可通过理论计算得出，而同样可以利用太阳常数，计算晴朗天气条件下固定时刻到达地面的太阳辐射强度。太阳高度角 $h(t)$ 、方位角 $\theta(t)$ 以及太阳辐射强度 $R(t)$ 的计算，参考《日光温室设计规范》(NY/T 3223—2018) 及文献 [21]。温室跨度太阳光线在 XOY 面投影与 X 轴正方向夹角 α 为

$$\alpha = \arctan(\tan h \sin \theta) \tag{5}$$

在栽培区内时刻 $t(j)$ ，第 i 个取样点处直射光辐射强度计算式为

$$q(t(j)) = R(t(j)) S(j,i) \sin h(t(j)) \tau \tag{6}$$

式中 τ ——温室覆盖材料透光率

各个取样点处日累积辐射强度 Q 可利用矩阵进行列求和求出，即

$$Q = \sum 10^{-6} q(t) \Delta t \tag{7}$$

Q 为 $n + 1$ 个元素的行向量，表示栽培区内 $n + 1$ 个点上，每个点的日累积辐射强度。

1.3 均匀性与敏感性分析

为保证最佳的天沟尺寸及位置设计，保证阴影在东西方向移动过程中，需要最大化保证栽培区内一天累积光照的均匀性。采用上述数学模型，可以计算样本点辐射强度，引入变异系数作为光照均匀性的评价标准，变异系数越小，样本间离散程度越小^[22]。

为比较各个因素对光环境的影响程度，可进行敏感性分析。敏感性分析是从定量分析的角度研究有关因素发生某种变化对某一个或一组关键指标影响程度的一种不确定分析方法^[23]。本研究采用单因素敏感性方法分析不同天沟设计尺寸对室内光照强度和均匀性的影响。

2 结果与分析

2.1 天沟阴影对温室光环境的影响

为分析寿光型智能玻璃温室大天沟对室内光环境的影响，选取正午太阳高度角最低，太阳辐射强度最小的冬至日(12 月 21 日)进行分析。图 2 为冬至日温室内从日升到日落时间，通过模型计算得出的单跨栽培区域光照强度分布图。其中留白区域为天沟产生的阴影。可以看出，在日出后和日落前，整个栽培区域内均有频繁的阴影带扫过，这是

因为太阳高度角低时,温室东西侧远处不同位置的天沟都会在不同时间对栽培区域产生阴影,而且同一条天沟在栽培区内产生的阴影时间很短。该时间段内太阳辐射强度相对较弱。12:00 前后,有 2 条最宽的阴影带随时间变化,从西到东均匀扫过整个栽培区。该 2 条阴影带由紧临栽培区域两侧的天沟产生,同时也是在辐射强度最强时间,对栽培区域内光环境影响最大的阴影。图 3 为冬至日和秋分日栽培区内不同位置处光照日累积辐

射。累积辐射曲线有 3 个峰值,分别位于天沟两侧区域和栽培区正中间。冬至日累积辐射最大值为 4.535 MJ/m^2 ,出现在紧临天沟两侧位置,而秋分日(9 月 22 日)最大值 10.821 MJ/m^2 则位于栽培区域正中间。最小值(冬至日 4.475 MJ/m^2 ,秋分日 10.645 MJ/m^2)都位于天沟与栽培区域中间位置之间。冬至日时,该温室栽培区内平均累积辐射强度为 4.500 MJ/m^2 ,标准差为 0.009 MJ/m^2 ,变异系数为 0.002 。

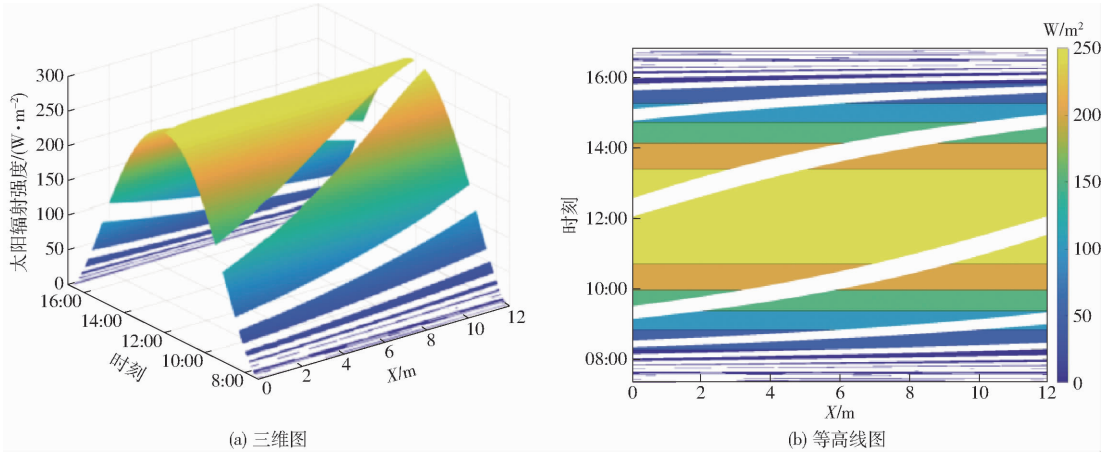


图 2 冬至日温室内从日升到日落时间单跨内栽培区域光照强度分布

Fig. 2 Distribution of light intensity in single span cultivation area from sunrise to sunset on winter solstice

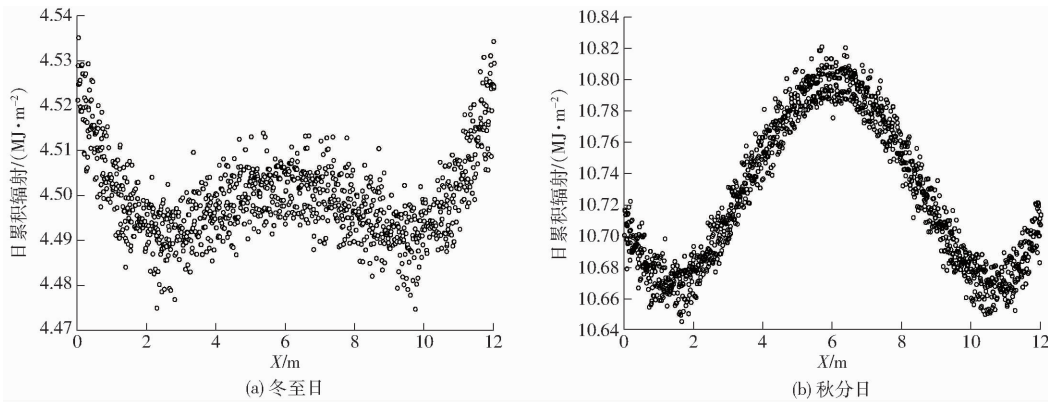


图 3 栽培区内不同位置处光照日累积辐射

Fig. 3 Accumulated radiation at different locations in cultivation area

冬季温室阴影对温室光环境的影响较大^[24],本研究主要针对太阳辐射最弱的冬至日,优化分析温室栽培区域内光照环境,利用建立的阴影带数学模型进行不同情景模拟。 n 取 1 000, Δt 为 0.01 h,温室透光率 80%。初始温室天沟设计尺寸参考寿光实际温室尺寸, L 为 12.00 m, H 为 6.30 m, D 为 0.86 m, W 为 1.60 m。保持其他因素不变,改变其中单个因素进行敏感性和均匀性分析。

2.2 天沟结构对温室光环境的影响

表 1~4 分别为冬至日山东省寿光地区不同天沟高度、不同天沟垂直厚度、不同天沟宽度、不同天沟间距情景下温室单跨栽培区内从东到西各个样本

点日累积辐射平均值、标准差、变异系数,及三者的相对敏感度。变异系数代表了光环境均匀性程度。其中变异系数最小值为 0.002,表明在所有天沟设计数据组合中,此设计值对应栽培区域内光环境均匀性最好,其中初始天沟设计尺寸的变异系数也为 0.002。

在初始值的基础上,改变天沟高度、垂直厚度和宽度,日累积辐射平均值的敏感度都小于等于零,表明这 3 个设计参数与栽培区域内日累积辐射平均值呈负相关,增加天沟高度、垂直厚度和宽度,都会降低光照强度。相反,天沟间距与日累积辐射平均值呈正相关,增加天沟间距,可以提高栽培区内光照

表 1 不同天沟高度单跨栽培区内从东到西各样本点日累积辐射平均值、标准差、变异系数和相对敏感度

Tab.1 Average, standard deviation, variation coefficient and relative sensitivity of daily accumulated radiation of each sample point from east to west in greenhouse single span cultivation area with different gutter heights

天沟高度 <i>H</i> /m	日累积辐射平 均值/(MJ·m ⁻²)	日累积辐射标 准差/(MJ·m ⁻²)	日累积辐射 变异系数	平均值相对 敏感度	标准差相对 敏感度	变异系数 相对敏感度
4.50	4.509	0.049	0.011	-0.007	-0.031	-7.0×10 ⁻⁵
5.00	4.505	0.029	0.006	-0.005	-0.021	-4.7×10 ⁻⁵
5.50	4.502	0.015	0.003	-0.003	-0.011	-2.5×10 ⁻⁵
6.00	4.500	0.009	0.002	0	-0.003	-6.0×10 ⁻⁶
6.50	4.499	0.009	0.002	-0.007	0.004	8.0×10 ⁻⁶
7.00	4.499	0.012	0.003	-0.002	0.007	1.5×10 ⁻⁵
7.50	4.490	0.014	0.003	-0.012	0.006	1.4×10 ⁻⁵

表 2 不同天沟垂直厚度单跨栽培区内从东到西各样本点日累积辐射平均值、标准差、变异系数和相对敏感度

Tab.2 Average, standard deviation, coefficient of variation and relative sensitivity of daily accumulated radiation of each sample point from east to west in greenhouse single span cultivation area with different gutter depths

天沟垂直厚度 <i>D</i> /m	日累积辐射平均 值/(MJ·m ⁻²)	日累积辐射标准 差/(MJ·m ⁻²)	日累积辐射 变异系数	平均值相对 敏感度	标准差相对 敏感度	变异系数相对 敏感度
0	4.897	0.045	0.009	-0.088	-0.008	-1.6×10 ⁻⁵
0.20	4.803	0.033	0.007	-0.088	-0.007	-1.4×10 ⁻⁵
0.40	4.709	0.022	0.005	-0.087	-0.005	-1.1×10 ⁻⁵
0.60	4.617	0.013	0.003	-0.086	-0.003	-6.0×10 ⁻⁶
0.80	4.526	0.008	0.002	-0.083	0.002	4.0×10 ⁻⁶
1.00	4.439	0.013	0.003	-0.083	0.006	1.4×10 ⁻⁵
1.20	4.353	0.022	0.005	-0.083	0.007	1.7×10 ⁻⁵

表 3 不同天沟宽度单跨栽培区内从东到西各样本点日累积辐射平均值、标准差、变异系数和相对敏感度

Tab.3 Average, standard deviation, coefficient of variation and relative sensitivity of daily accumulated radiation of each sample point from east to west in greenhouse single span cultivation area with different gutter widths

天沟宽度 <i>W</i> /m	日累积辐射平 均值/(MJ·m ⁻²)	日累积辐射标 准差/(MJ·m ⁻²)	日累积辐射 变异系数	平均值相对 敏感度	标准差相对 敏感度	变异系数相对 敏感度
0.20	5.017	0.043	0.009	-0.131	-0.009	-1.7×10 ⁻⁵
0.40	4.935	0.038	0.008	-0.129	-0.009	-1.7×10 ⁻⁵
0.60	4.856	0.033	0.007	-0.127	-0.009	-1.7×10 ⁻⁵
0.80	4.779	0.028	0.006	-0.124	-0.009	-1.7×10 ⁻⁵
1.00	4.706	0.023	0.005	-0.122	-0.008	-1.7×10 ⁻⁵
1.20	4.634	0.018	0.004	-0.119	-0.008	-1.6×10 ⁻⁵
1.40	4.566	0.013	0.003	-0.117	-0.007	-1.4×10 ⁻⁵
1.60	4.500	0.009	0.002	0	0	0
1.80	4.436	0.009	0.002	-0.114	0.000	1.0×10 ⁻⁶
2.00	4.374	0.013	0.003	-0.112	0.003	8.0×10 ⁻⁶
2.20	4.315	0.018	0.004	-0.110	0.005	1.3×10 ⁻⁵

表 4 不同天沟间距单跨栽培区内从东到西各样本点日累积辐射平均值、标准差、变异系数和相对敏感度

Tab.4 Average, standard deviation, coefficient of variation and relative sensitivity of daily accumulated radiation of each sample point from east to west in greenhouse single span cultivation area with different gutter distances

天沟间距 <i>L</i> /m	日累积辐射平 均值/(MJ·m ⁻²)	日累积辐射标 准差/(MJ·m ⁻²)	日累积辐射 变异系数	平均值相对敏 感度	标准差相对 敏感度	变异系数相对 敏感度
10.00	4.323	0.015	0.003	0.236	-0.008	-1.9×10 ⁻⁵
11.00	4.418	0.011	0.003	0.219	-0.007	-1.6×10 ⁻⁵
12.00	4.500	0.009	0.002	0	0	0
13.00	4.571	0.010	0.002	0.189	0.003	5.0×10 ⁻⁶
14.00	4.633	0.014	0.003	0.177	0.007	1.5×10 ⁻⁵
15.00	4.688	0.021	0.005	0.167	0.011	2.3×10 ⁻⁵

强度。为增加栽培区域内光照强度,可以在满足温室功能设计的基础之上,提高天沟间距,降低天沟高度,减少天沟垂直厚度和宽度。而标准差和变异系数的相对敏感度,在单个变量从小到大的变化范围之内,都是从负值逐渐变成正值,表明天沟设计参数与光照均匀性之间由负相关性变成了正相关性,变异系数在范围内存在一个最小值,即光照均匀性的最佳设计值。

由表 1~4 可以看出,对日累积辐射平均值影响程度从大到小依次为天沟间距、天沟宽度、天沟垂直厚度和天沟高度。随着天沟间距的增加,相应其栽培区域也会增加,天沟阴影对栽培区域的影响会降低,在这 4 个因素中,增加天沟间距是增加光照强度最有效的措施,该结论与文献[25]一致。而天沟高

度几乎对光照强度没有影响。而标准差和变异系数的相对敏感度是动态的,其绝对值都是先减小后增加。表明在合适的设计范围之内,其影响程度逐渐减低,不同组合之间光照均匀性差异不大。而在不合理的设计参数情况下,改变其中任意一个值都会对光照均匀性产生很大的影响。

2.3 最小变异系数设计

为寻找天沟投影面积和高度之间规律,将所有情景设计参数中,变异系数最小的组合进行整理统计,并计算了天沟高度、垂直厚度之和与天沟间距、天沟宽度之和的比值,即 $(H+D)/(L+W)$,结果见表 5。由表 5 可知,最小变异系数的设计组合情况下, $(H+D)/(L+W)$ 的值均在 0.49~0.54 之间。该模拟计算结果的统计结论还不具备整体代表性,

表 5 最小变异系数设计参数
Tab.5 Gutter design parameters of minimal variation coefficient

天沟间距 <i>L</i> /m	天沟高度 <i>H</i> /m	天沟垂直 厚度 <i>D</i> /m	天沟宽度 <i>W</i> /m	日累积辐射平均 值/(MJ·m ⁻²)	日累积辐射标 准差/(MJ·m ⁻²)	日累积辐射 变异系数	$(H+D)/(L+W)$
12.00	6.30	0.80	1.60	4.526	0.008	0.002	0.52
12.00	6.30	0.86	1.60	4.500	0.009	0.002	0.53
12.00	6.30	0.86	1.80	4.436	0.009	0.002	0.52
12.00	6.00	0.86	1.60	4.500	0.009	0.002	0.50
12.00	6.50	0.86	1.60	4.499	0.009	0.002	0.54
13.00	6.30	0.86	1.60	4.571	0.010	0.002	0.49

但具有一定的参考意义。

3 结束语

构建了连栋温室天沟对温室内太阳辐射强度影响的动态模型。结合寿光型智能玻璃温室大天沟设计,探讨了天沟对温室栽培区内光照强度及均匀性的影响。模型分析结果表明,天沟结构对栽培区内日累积辐射平均值的影响程度从大到小依次为天沟间距、天沟宽度、天沟垂直厚度和天沟高度。从当地冬至日室内太阳辐射分布均匀性角度分析,寿光型智能玻璃温室的天沟尺寸设计为相邻两天沟间距

12.00 m、天沟水平宽度 1.60 m、垂直厚度 0.86 m、天沟下沿离地面高度 6.30 m,属于合理设计范围之内,可保证栽培区内最佳的光照均匀性。不同情景下的模型模拟结果表明,为确保栽培区内的光照均匀性,在栽培区内辐射强度变异系数最小的情况下,天沟高度、天沟垂直厚度之和与天沟间距、天沟宽度之和的比值在 0.49~0.54 之间。利用温室内辐射分布模型,通过改变地理纬度可以计算不同地区应用寿光型智能玻璃温室的室内光照分布情况,为寿光型智能玻璃温室在不同地区的设计应用提供了理论依据。

参 考 文 献

[1] 李跃洋,苏铁,王胤,等. 中国与荷兰设施园艺对比分析[J]. 中国蔬菜, 2020(6): 11–15.
[2] 徐丹. 荷兰大型玻璃连栋温室技术在中国的应用[J]. 农业工程技术, 2017, 37(34): 28–30.
[3] 蔡龙俊,杨琳. 连栋温室内保温幕节能效果的研究分析[J]. 农业工程学报, 2002, 18(6): 98–102.
CAI Longjun, YANG Lin. Effects of inside thermal screen of multi-span greenhouse on energy conservation[J]. Transactions of the CSAE,2002,18(6): 98–102. (in Chinese)
[4] 马承伟,王平智,赵淑梅,等. 日光温室保温被材料及保温性能评价[J]. 农业工程技术, 2018, 38(31): 12–16.
[5] 郭文忠,周波,贾冬冬,等. 具有外保温性能的槽体连栋温室结构: 1269255.2[P]. 2020–06–09.
[6] 朱建昌,张书谦,郑仲权. 文洛式温室天沟保温性的设计探讨[J]. 农业工程技术, 2019, 39(28): 38–39.
[7] 于海业,关姝杰,隋媛媛. 基于芡实叶脉分叉结构的穹顶温室设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(3): 300–308.
YU Haiye, GUAN Shujie, SUI Yuanyuan. Design and test of dome greenhouse based on euryale (*Euryale ferox* Salisb.) venation branching structure[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3): 300–308.
http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190333&journal_id=jcsam. DOI:10.

- 6041/j. issn. 1000-1298. 2019. 03. 033. (in Chinese)
- [8] 陆桦, 黄松超. 温室天沟设计[J]. 农业工程技术, 2007(2): 22 - 23.
- [9] 刘小刚, 万梦丹, 齐韵涛, 等. 不同遮阴下亏缺灌溉对小粒咖啡生长和水光利用的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(1): 191 - 197, 190.
LIU Xiaogang, WAN Mengdan, QI Yuntao, et al. Effect of deficit irrigation on growth and water - radiation use of Arabica coffee under different shading[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(1): 191 - 197, 190. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170125&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.01.025. (in Chinese)
- [10] 张大龙, 张中典, 李建明. 环境因子对温室甜瓜蒸腾的驱动和调控效应研究[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(11): 137 - 144.
ZHANG Dalong, ZHANG Zhongdian, LI Jianming. Co-ordination of environmental factors in driving and regulating transpiration rate of greenhouse grown muskmelon[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(11): 137 - 144. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20151119&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.11.019. (in Chinese)
- [11] 王俊衡, 李莉, 穆永航, 等. 日光温室光照强度测量系统研究[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(增刊): 194 - 200.
WANG Junheng, LI Li, MU Yonghang, et al. Measurement system of light intensity in solar greenhouse[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(Supp.): 194 - 200. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2015S032&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.S0.032. (in Chinese)
- [12] 闫文凯, 张雅婷, 张玉琪, 等. LED 株间补光对日光温室番茄产量及光合作用的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2018, 46(7): 132 - 138, 146.
YAN Wenkai, ZHANG Yating, ZHANG Yuqi, et al. Effects of LED interlighting on yield and photosynthesis of tomato in solar greenhouse[J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition), 2018, 46(7): 132 - 138, 146. (in Chinese)
- [13] 王宇欣, 李丹春, 黄斌, 等. DRP 温室透光覆盖材料性能表征研究[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(4): 320 - 327.
WANG Yuxin, LI Danchun, HUANG Bin, et al. Performance characterization of DRP greenhouse transparent covering material[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(4): 320 - 327. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200436&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.04.036. (in Chinese)
- [14] 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)
- [15] TEITEL M, DERIUGIN M, HASLAVSKY V, et al. Light distribution in multispan gutter-connected greenhouses: effects of gutters and roof openings[J]. Biosystems Engineering, 2012, 113(2): 120 - 128.
- [16] 唐卫东, 李萍萍, 卢章平. 温室人工光源覆盖区域的可视化研究[J]. 农业机械学报, 2006, 37(5): 96 - 100.
TANG Weidong, LI Pingping, LU Zhangping. Research on visualization of artificial light covering area in greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(5): 96 - 100. (in Chinese)
- [17] 周莹. 连栋温室可透光天沟的设计[J]. 中国农学通报, 2014, 30(23): 129 - 132.
ZHOU Ying. Design of light-transmissive gutter of multi-span greenhouse[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(23): 129 - 132. (in Chinese)
- [18] COSSU M, COSSU A, DELIGIOS P A, et al. Assessment and comparison of the solar radiation distribution inside the main commercial photovoltaic greenhouse types in Europe[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2018, 94(10): 822 - 834.
- [19] COSSU M, YANO A, SOLINAS S, et al. Agricultural sustainability estimation of the European photovoltaic greenhouses[J]. European Journal of Agronomy, 2020, 118: 126074.
- [20] 程勤阳, 丁小明, 曲梅. 连栋温室采光性能评价指标[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 169 - 172.
CHENG Qinyang, DING Xiaoming, QU Mei. Evaluation index of lighting performance in multi-span greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(7): 169 - 172. (in Chinese)
- [21] 许红军, 曹晏飞, 李彦荣, 等. 日光温室太阳辐射模型构建及应用[J]. 农业工程学报, 2019, 35(7): 160 - 169.
XU Hongjun, CAO Yanfei, LI Yanrong, et al. Establishment and application of solar radiation model in solar greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(7): 160 - 169. (in Chinese)
- [22] 良清, 魏和清. 统计学[M]. 北京: 中国财政经济出版社, 2011: 49.
- [23] VANTHOOR B H E, HENTEN E J V, STANGHELLINI C, et al. A methodology for model-based greenhouse design: Part 3, sensitivity analysis of a combined greenhouse climate-crop yield model[J]. Biosystems Engineering, 2011, 110(4): 396 - 412.
- [24] 宋卫堂, 张树阁, 黄之栋, 等. 三连栋不对称屋面玻璃温室设计与光照性能分析[J]. 农业机械学报, 2005, 36(11): 112 - 115.
SONG Weitang, ZHANG Shuge, HUANG Zhidong, et al. Structure design and illumination performance of 3 - span asymmetrical roofing glass greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(11): 112 - 115. (in Chinese)
- [25] 武莹. 新型大跨度非对称塑料大棚温光环境性能评价研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
WU Ying. Study on temperature and light performance evaluation of new large span asymmetric plastic greenhouses[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2019. (in Chinese)