中国农业大学学报 2024,29(7):170-180
Journal of China Agricultural University http://zgnydxxb.ijournals.cn

李永,王文静,阳春,郄丽娟,康利改,李沫,李梦迪. 基于TRNSYS的装配式异质复合墙体日光温室建筑参数优化[J]. 中国农业大学学报,2024,29(07):170-180.
LI Yong, WANG Wenjing, YANG Chun, QIE Lijuan, KANG Ligai, LI Mo, LI Mengdi. Building parameter optimization of solar greenhouse with assembled heterogeneous composite wall based on TRNSYS[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(07): 170-180.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.07.16

基于TRNSYS的装配式异质复合墙体日光温室建筑参数优化

李 永[1,2] 王文静[2] 阳 春[3] 郄丽娟[4*] 康利改[2] 李 沫[1] 李梦迪[1]

(1. 河北省建筑科学研究院,石家庄 050227;
2. 河北科技大学 建筑工程学院,石家庄 050018;
3. 中国建筑科学研究院有限公司,北京 100013;
4. 河北省农林科学研究院 经济作物研究所,石家庄 050051)

摘 要 为优化装配式异质复合墙体日光温室的建筑参数,利用TRNSYS(Transient system simulation program)建立温室模型,采用连续阴天和连续晴天的实测数据验证模型,利用该模型分析温室脊高、北墙高度、后屋面水平投影宽度的改变对室内温度、北墙温度和建造成本的影响。结果表明:室内温度、北墙温度和总建造成本随脊高增大而增加,当脊高>5.3 m时,室内平均温度和北墙平均温度的增幅明显降低,但建造成本仍增加;室内温度、北墙温度和总建造成本随北墙高度增大而增加,北墙高度为3.7 m时室内温度和北墙温度达到较好效果,北墙高度继续增大,对温度的提升效果并不明显;后屋面水平投影宽度为1.8 m时,温室后屋面仰角为46°,采光屋面角为27°,可满足温室内采光要求。综上,温室脊高为5.3 m,北墙高度为3.7 m,后屋面水平投影宽度为1.8 m时,可达到室内热性能和建造成本的最佳平衡,此时温室总建造成本为22.15万元,每平方米建造成本约230元。

关键词 日光温室; TRNSYS; 温度; 建造成本

中图分类号 S625.1 **文章编号** 1007-4333(2024)07-0170-11 **文献标志码** A

Building parameter optimization of solar greenhouse with assembled heterogeneous composite wall based on TRNSYS

LI Yong[1,2], WANG Wenjing[2], YANG Chun[3], QIE Lijuan[4*], KANG Ligai[2], LI Mo[1], LI Mengdi[1]

(1. Hebei Institute of Building Research, Shijiazhuang 050227, China;
2. School of Civil Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China;
3. China Academy of Building Research, Beijing 100013, China;
4. Institute of Economic Crops, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Shijiazhuang 050051, China)

Abstract In order to optimize the construction parameters of the solar greenhouse with assembled heterogeneous composite wall, a greenhouse model was established using TRNSYS (Transient system simulation program), and the measured data of consecutive cloudy and consecutive sunny days were used to validate the model. The model was utilized to analyze the effects of changes in the greenhouse ridge height, height of the north wall and horizontal projection width of the rear roof on the indoor temperature, north wall temperature, north wall temperature and construction cost. The results showed that: The indoor

收稿日期: 2023-11-24
基金项目: 河北省省级科技计划资助项目(21327208D);国家大宗蔬菜产业技术体系石家庄综合试验站(CARS-23-G17);河北省现代农业产业技术体系设施蔬菜产业创新团队蔬菜设施结构优化及配套生产模式研发岗位(HBCT2023100202)
第一作者: 李永(ORCID:0000-0003-2958-3527),正高级工程师,主要从事建筑节能研究,E-mail:956094073@qq.com
通讯作者: 郄丽娟(ORCID:0000-0001-9513-0921),副研究员,主要从事棚室结构创新优化研究,E-mail:qielj2005@126.com

temperature, north wall temperature and total construction cost increased with increasing ridge height. When the ridge height was >5.3 m, the increase in mean indoor temperature and mean north wall temperature decreased significantly, while the construction cost still increased; The indoor temperature, north wall temperature and total construction cost increased with increasing height of the north wall, and the better results for indoor temperature and north wall temperature were achieved at the height of the north wall of 3.7 m. Continuing to increase the height of the north wall did not have a significant effect on the temperature enhancement; When the horizontal projection width of the rear roof was 1.8 m, the elevation angle of the rear roof of the greenhouse was 46°, and the angle of the light roof is 27°, which met the lighting requirements in the greenhouse. In summary, the best balance between the indoor thermal performance and construction cost can be achieved when the ridge height of the greenhouse is 5.3 m, the height of the north wall is 3.7 m, and the horizontal projection width of the rear roof is 1.8 m. At this point, the total construction cost of the greenhouse is 221.5 thousand, and the construction cost of each square meter is about 230 yuan.

Keywords　solar greenhouse; TRNSYS; temperature; construction cost

日光温室建筑结构参数主要包括脊高、北墙高度、后屋面水平投影宽度，各建筑参数之间彼此关联，共同影响着室内热环境，进而影响温室的经济和社会效益[1-3]。在传统温室建造中，由于缺乏对建筑结构参数的深入研究，温室建造通常依靠设计者的经验或照搬照抄，导致低成本的简易温室和设计不合理的高成本温室随处可见[4-5]。随着温室向低能耗、现代化方向发展，研究人员在建筑参数优化设计上展开试验研究，但因各地温室建造缺少相关标准，温室建造设计仍存在很多争议[6-7]。近年来，已有研究因地制宜的考虑当地环境因素，优化温室建筑参数，提高太阳能利用率和室内热环境：1)根据温室前后屋面的动态依赖关系，通过增大前屋面面积增加进入温室的太阳能量，提高室内热环境[8-9]；2)根据不同时期太阳直射光线在温室北墙上的投影高度变化，得出不同纬度地区温室北墙高度的计算方法[10-11]；3)假定温室冬至日正午前后4 h内能获得最大采光量，得出不同地区温室后屋面水平投影宽度的设计原理[12-13]。但目前的研究多集中在温室单个建筑参数的优化，未考虑温室整体结构的相关性和建造的经济性[14]。因此有必要研究温室整体建筑参数优化对温室热环境和经济性的影响。本研究拟采用TRNSYS（Transient system simulation program）建立日光温室模型，利用模型分析温室脊高、北墙高度和后屋面水平投影宽度的改变对室内温度、北墙温度及建造成本的影响，确定成本低、热性能优的温室建筑参数，以期在热性能和经济性方面为装配式异质复合墙体日光温室的应用推广和建筑参数优化提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验温室

试验温室位于河北省石家庄市鹿泉区农林科学院农业综合试验园（东经114°29′，北纬38°03′），建成于2021年9月。温室长度80 m，跨度12 m，脊高5.3 m，北墙高3.7 m，前屋面采光角27°，后屋面仰角46°。

温室由全拱形钢骨架构成。前屋面骨架由椭圆钢（75 mm×30 mm×2.5 mm）和圆钢（DN20 mm×2.0 mm）栓接成型。北墙骨架采用间距2 m的方钢（100 mm×60 mm×2.5 mm）纵向连接。前屋面骨架焊接在北墙骨架上，共同构成承重骨架。试验温室墙体厚度约29 cm，由内向外分别为塑料薄膜密封的6 cm稻草板、7 cm中空层、3 cm聚氨酯内涂层、9 cm胶粉聚苯颗粒轻质复合隔墙板（EPS）、3 cm聚氨酯外涂层及1 cm水泥砂浆层。后屋面由内向外为1 cm竹胶板、3 cm聚氨酯涂层和2 cm水泥砂浆。

测试期为2021-12—2022-03。测试期间温室内种植越冬茬番茄。前屋面采用保温被覆盖，于8:00收起，16:00铺放。

1.2　试验测试

1.2.1　测点布置

试验温室北墙内表面布置9个温度测点，东西方向为温室长度的20、40、60 m处，垂直方向距地面0.5、1.5、2.5 m。

温室内布置6个温度测点，东西方向为温室长度的20、40、60 m处，南北方向为中间位置，垂直方向距地面1.0、1.5 m。测试时用圆形辐射罩将温度

探头包裹，防止太阳辐射的影响。

温室西墙正西方向 20 m 处布置温度、风速、太阳辐射量测点各 1 个，分别距地面 1.18、1.70 和 0.50 m。

1.2.2 测试设备

试验温室室内温度和北墙温度数据由建筑围护结构热工性能测试设备 R90V 采集，测量范围为 0～50 ℃，精度±0.1 ℃。

室外环境温度、风速、太阳辐射量等数据由小型室外气象站采集。温度测量范围为－40～70 ℃，精度±0.1 ℃。风速测量范围为 0～60 m/s，精度±0.3 m/s。太阳辐射量测量范围 0～2 000 W/m^2，精度±5% W/m^2。

1.3 TRNSYS 模型

TRNSYS（Transient system simulation program）是一种功能强大的瞬时系统模拟软件，该软件中的气象数据模块可读取外部天气数据并转换为所需的单元。子程序 TRNBuild 中可设置不同控制参数来建立建筑模型，通过建筑模块读取建筑文件并获得模型的输入输出变量列表[15]。利用 TRNSYS 建立试验温室模型具有全面性、专业性的特点。

本研究采用 TRNSYS 建立的试验温室模型示意布局见图 1。气象数据模块用于将实测环境温度、辐射等数据导入模拟程序中。辐射组件根据试验温室的位置、方向和几何形状计算前屋面的全球太阳辐射入射量。通过时间表控制薄膜/棉被切换，以控制保温被的开启/关闭。建筑模块与气象数据模块、辐射组件、控制系统耦合。输出模块输出模拟的室内温度与北墙温度。

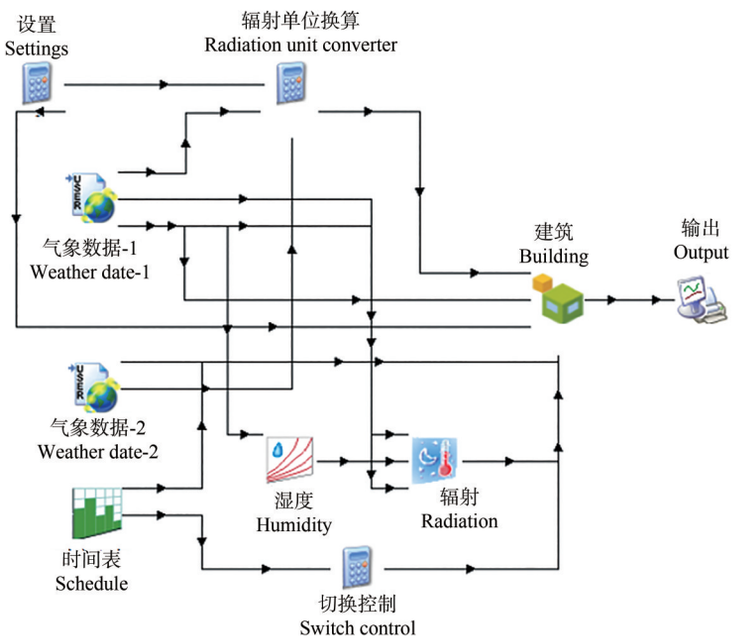


图 1 试验温室 TRNSYS 模型

Fig.1 Experimental greenhouse TRNSYS model

试验温室建模参数设置条件及假设如下：1）气象数据模块中以连续阴天（2022-01-21—2022-01-23）、连续晴天（2022-01-01—2022-01-03）的数据进行模拟；2）试验温室模型方位坐北朝南；3）室外环境相对湿度设置为 53%；4）温室建筑材料性能参数在建筑模块中通过子程序 TRNBuild 定义（表 1）；5）地面与墙体的太阳辐射量均匀分布；6）忽略温室内植物蒸腾作用的影响及对地面的遮荫效果。

2 结果与分析

2.1 模型验证

将试验温室内 6 个空气温度测点和 9 个北墙温度测点所测温度的算数平均值作为各个时刻的室内空气温度和北墙温度，连续阴天和连续晴天，室内空气温度和北墙温度的实测值与模拟值见图 2。采用决定系数 R^2 评价试验温室模型的性能：

表 1　试验温室建筑材料的性能参数

Table 1　Testing performance parameters of greenhouse construction materials

材料 Material	密度/(kg/m³) Density	比热容/(kJ/(kg·K)) Specific heat capacity	导热系数/(W/(m·K)) Thermal conductivity
水泥砂浆 Cement mortar	600.0	1.05	0.180
聚氨酯 Polyurethane	35.0	1.38	0.024
EPS复合隔墙板 EPS lightweight composite partition panel	723.3	0.78	0.140
空气 Air	1.3	1.01	0.024
稻草板 Straw board	300.0	1.68	0.130
竹胶板 Bamboo rubber board	300.0	1.89	0.093

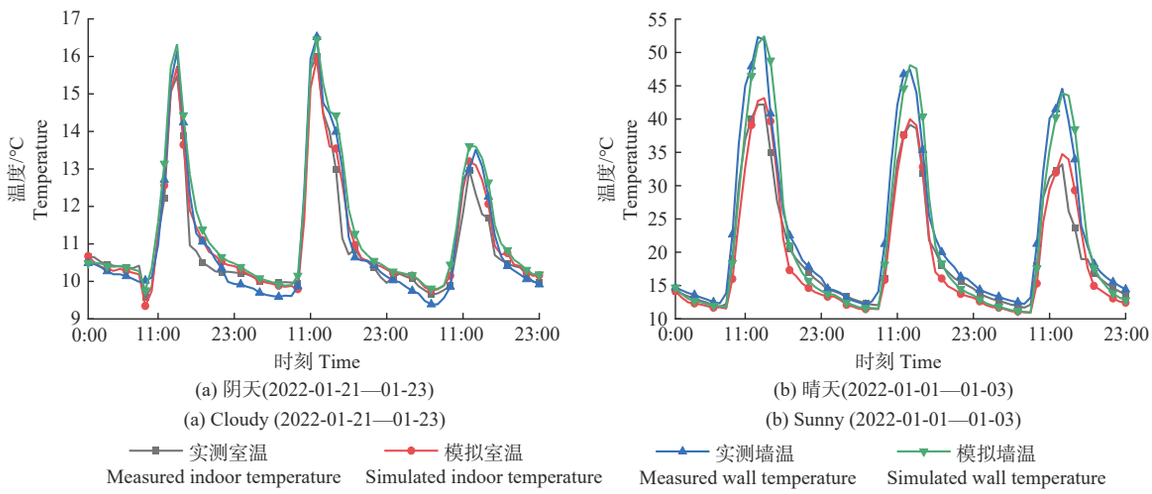


图 2　阴天和晴天室内温度和北墙温度的实测值与模拟值

Fig.2　Measured and simulated values room and north wall temperatures on cloudy(a) and sunny(b) days

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(y_m - y_e)}{\sum(y_m - \bar{y}_e)}$$

式中：y_m 为试验数据；y_e 为模拟数据；$\bar{y}_e$ 为模拟数据的平均值。

决定系数 R^2 表示拟合优度，取值范围为[0,1]，R^2 为 0 表示实测值与模拟值完全不匹配，R^2 为 1 表示实测值与模拟值完全吻合。本研究中，连续阴天实测和模拟的室内与北墙温度的决定系数分别为 0.94、0.96；晴天分别为 0.94、0.95，表明试验温室 TRNSYS 模型具有较高的准确性，可以用于温室空气温度和北墙温度输出的建模。

2.2　试验温室单一建筑参数优化分析

日光温室脊高与跨度的比值决定了温室内的空间面积；前后屋面的大小决定了温室在白天接收的太阳辐射量及夜间释放的热量；北墙作为温室内热稳定性最好、经济成本最高的结构，其尺寸直接影响了室内温度和经济性[16-18]。因此，采用单一因素分析，模拟建筑参数在试验温室脊高 5.3 m、北墙高度 3.7 m、后屋面水平投影宽度 RHPW（Rear roof horizontal projection width）为 1.8 m 的基础上，以 0.5 m 步长依次增减 2 个步长时，对室内温度和北墙温度的影响，提出了 3 种方案，见表 2。同时考虑经济成本的影响，根据试验温室建造过程中不同结构所花费成本，按照面积计算为：土建成本 40 元/m²，墙体 49 元/m²，北屋顶 7 元/m²，棚膜 6 元/m²，保温被 18 元/m²，骨架 90 元/m²，以选择经济性更优的温室。

2.2.1　脊高对温室热环境及建造成本的影响

试验温室脊高在 5.3 m 基础上依次增减 0.5 m，分别模拟了脊高为 4.3、4.8、5.3、5.8 和 6.3 m 温室的室内温度和北墙温度，结果见图 3。将保温被覆盖时段（16:00—次日 7:00）作为夜间，保温被卷起时段（8:00—15:00）作为白天进行分析，可知：一天

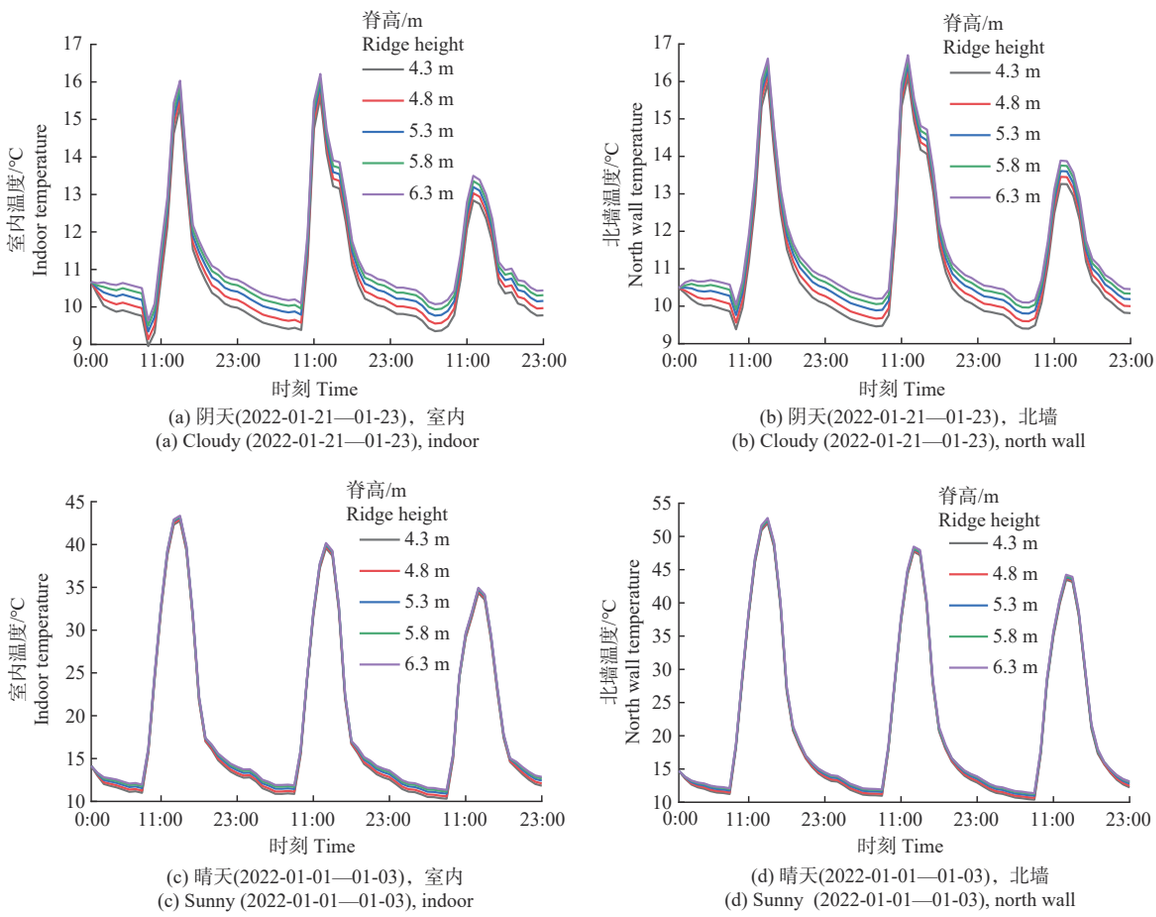
表 2 温室建筑参数优化方案

Table 2 Optimization of building parameters for greenhouse

方案 Scheme	脊高/m Ridge height	北墙高度/m North wall height	后屋面水平投影宽度/m RHPW	跨度/m Span
试验温室 Experimental greenhouse	5.3	3.7	1.8	12
方案 1 Option one	4.3～6.3	3.7	1.8	12
方案 2 Option two	5.3	2.7～4.7	1.8	12
方案 3 Option three	5.3	3.7	0.8～2.8	12

Note: RHPW, Rear roof horizontal projection width. The following Table is the same as.

内,不同脊高温室的室内温度和北墙温度呈现先升高后降低的趋势。连续阴天夜间不同脊高温室室内平均温度为 10.0～10.7 ℃,北墙平均温度为 10.2～10.9 ℃,连续阴天白天不同脊高温室室内平均温度为 11.9～12.6 ℃,北墙平均温度为 12.5～13.1 ℃。连续晴天夜间不同脊高温室的室内和北墙平均温度分别为 13.7～14.6 ℃、15.1～15.9 ℃,白天室内和北墙平均温度分别为 28.5～29.0 ℃、34.2～35.0 ℃。



(a) 阴天(2022-01-21—01-23), 室内
(a) Cloudy (2022-01-21—01-23), indoor

(b) 阴天(2022-01-21—01-23), 北墙
(b) Cloudy (2022-01-21—01-23), north wall

(c) 晴天(2022-01-01—01-03), 室内
(c) Sunny (2022-01-01—01-03), indoor

(d) 晴天(2022-01-01—01-03), 北墙
(d) Sunny (2022-01-01—01-03), north wall

图 3 阴天和晴天不同脊高温室室内温度和北墙温度

Fig.3 Indoor and north wall temperatures of greenhouses with different ridge heights on cloudy and sunny days

番茄适宜生长的最低温度为 8 ℃,最低耐受温度为 5 ℃[19]。由模拟结果可知:不同脊高温室的室内温度均可满足番茄的生长要求。6.3 m 脊高温室的室内和北墙平均温度最高,连续阴天分别为 11.4 和 11.6 ℃,连续晴天分别为 19.4 和 22.2 ℃。4.3 m 脊高温室的室内和北墙平均温度最低,连续阴天分

别为 10.7 和 11.0 ℃，连续晴天分别为 18.6 和 21.5 ℃。相同跨度和北墙高度的温室，脊高的增加加大了前屋面接收太阳辐射的面积，故室内温度和北墙温度随脊高增大而增加。

图 4 为晴天和阴天，脊高每增加 0.5 m，室内平均温度和北墙平均温度的增温图。可见：室内平均温度和北墙平均温度的增幅均先增大后减小，可见通过增加脊高来提高温室热环境的做法是有上限的。脊高每增加 0.5 m，连续阴天室内和北墙平均温度分别增加 0.13～0.19 ℃、0.12～0.18 ℃，连续晴天分别增加 0.13～0.22 ℃、0.16～0.21 ℃。根据后屋面、北墙等不同结构的面积和成本计算得出 5 个脊高温室的总建造成本分别为 21.30、21.67、22.15、22.65、23.25 万元，总建造成本随脊高增大而增加，当脊高＞5.3 m 时，晴天和阴天室内平均温度和北墙平均温度的增幅明显降低，温室总建造成本仍在增加，因此 5.3 m 为该类型温室的最佳脊高。

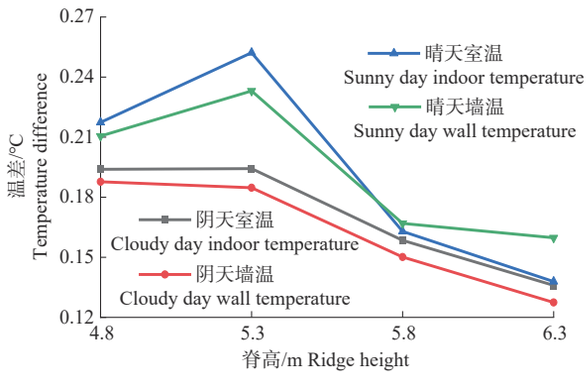
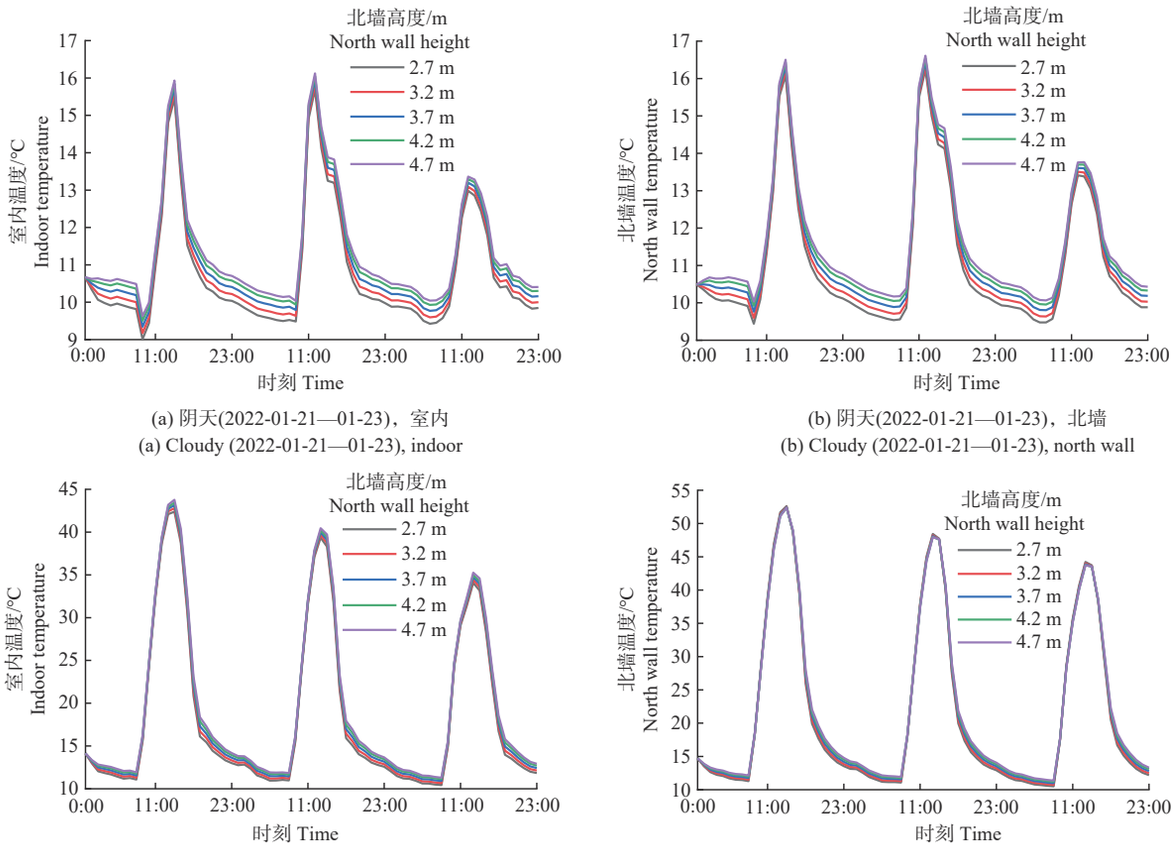


图 4　不同脊高温室室内平均温度和北墙平均温度增温图

Fig.4　Mean room and mean north wall temperature incremental plots for greenhouses with different ridge heights

2.2.2　北墙高度对温室热环境及建造成本的影响

图 5 示出连续阴天和连续晴天，温室北墙高度分别为 2.7、3.2、3.7、4.2 和 4.7 m 时的室内温度和北墙温度。



(a) 阴天(2022-01-21—01-23)，室内
(a) Cloudy (2022-01-21—01-23), indoor

(b) 阴天(2022-01-21—01-23)，北墙
(b) Cloudy (2022-01-21—01-23), north wall

(c) 晴天(2022-01-01—01-03)，室内
(c) Sunny (2022-01-01—01-03), indoor

(d) 晴天(2022-01-01—01-03)，北墙
(d) Sunny (2022-01-01—01-03), north wall

图 5　阴天和晴天不同北墙高度温室室内温度和北墙温度

Fig.5　Indoor and north wall temperatures of greenhouses with different north wall heights on cloudy and sunny days

连续阴天夜间不同北墙高度温室的室内平均温度为10.1～10.7 ℃，北墙平均温度为10.3～10.9 ℃。室外太阳辐射量于12:00左右达到峰值时，室内温度和北墙温度达到最大值，连续阴天白天不同北墙高度温室室内平均温度为12.0～12.6 ℃，北墙平均温度为12.6～13.0 ℃。连续晴天夜间不同北墙高度温室的室内和北墙平均温度分别为13.6～14.9 ℃、14.9～16.1℃，白天室内和北墙平均温度分别为28.3～29.3 ℃、34.6～34.7 ℃。

不同北墙高度温室的室内温度均可满足番茄生长。北墙高度为4.7 m的温室室内和北墙平均温度最高，连续阴天分别为11.3和11.6 ℃，连续晴天分别为19.6和22.3 ℃。北墙高度2.7 m的温室室内和北墙平均温度最低，连续阴天分别为10.6和11.0 ℃，连续晴天分别为18.5和21.5 ℃。北墙的储热能力取决于照射到其表面的太阳辐射量和北墙的尺寸，故温度随北墙高度增大而增加。

图6为晴天和阴天，北墙高度每增加0.5 m，室内平均温度和北墙平均温度的增温图。可见，室内平均温度和北墙平均温度的增幅均先增大后减小，可见盲目增加北墙高度对温室热环境并无帮助。北墙高度每增加0.5 m，连续阴天室内和北墙平均温度分别增加0.10～0.16 ℃、0.10～0.16 ℃，连续晴天分别增加0.23～0.31 ℃、0.16～0.21 ℃。不同北墙高度温室的总建造成本分别为21.63、21.87、22.15、22.46、22.84万元，总成本随北墙高度增大而增加，当北墙高度＞3.7 m时，各项温度的变化幅度＜0.3 ℃，北墙高度继续增加，对室内温度和北墙温度提升效果并不明显，同时会增加建造成本，因此3.7 m为温室北墙的最佳高度。

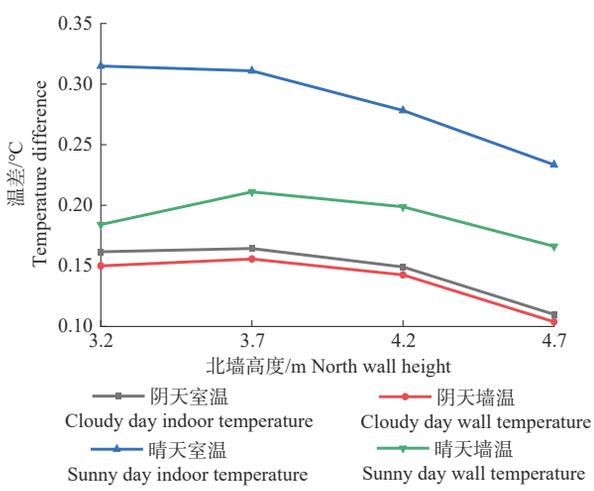


图6 不同北墙高度温室室内平均温度和北墙平均温度增温图

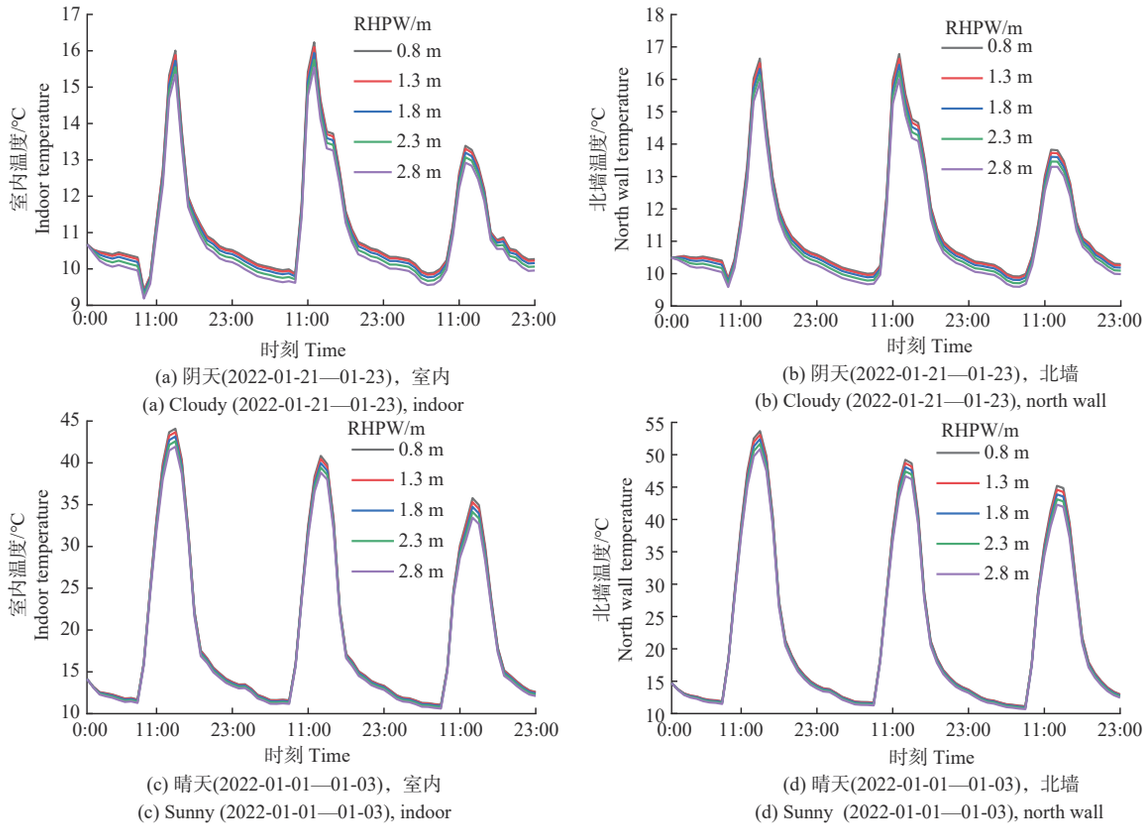
Fig.6 Mean indoor temperature and mean north wall temperature increments for greenhouses with different north wall heights

2.2.3 后屋面水平投影宽度对温室热性能和建造成本的影响

图7示出连续阴天和连续晴天，温室后屋面水平投影宽度（RHPW）分别为0.8、1.3、1.8、2.3和2.8 m时的室内温度和北墙温度。连续阴天夜间，不同RHPW温室室内平均温度为10.3～10.6 ℃，北墙平均温度为10.4～10.7 ℃，连续阴天白天不同RHPW温室的室内和北墙平均温度分别为12.0～12.5 ℃，12.5～13.0 ℃。连续晴天夜间不同温室的室内和北墙平均温度分别为13.9～14.4 ℃、15.2～15.8 ℃，连续晴天白天室内和北墙平均温度分别为28.0～29.4 ℃，33.7～35.3 ℃。

不同RHPW温室的室内温度均可满足番茄生长。0.8 m投影温室的室内和北墙平均温度最高，连续阴天分别为11.2和11.5 ℃，连续晴天分别为19.4和22.3 ℃。2.8 m投影温室的室内和北墙平均温度最低，阴天分别为10.9和11.1 ℃，晴天分别为18.6和21.3 ℃。冬季日照仰角较低，RHPW过大会对后排作物接收太阳辐射产生影响，故室内温度和北墙温度随RHPW增大而减小。

RHPW每增加0.5 m，连续阴天室内和北墙平均温度分别减小0.04～0.12 ℃、0.05～0.12 ℃，连续晴天分别减小0.13～0.25 ℃、0.17～0.30 ℃。不同RHPW温室的后屋面仰角、采光屋面角及总建造成本见表3。有研究认为最优的温室后屋面仰角为45°左右[20]。石家庄地区合理采光屋面角为21.5°，合理采光时段屋面角为32.4°，为提高温室利用率，温室采光屋面角只要比合理采光屋面角大5°～7°即可，即26.5～28.5°为宜。温室总建造成本随RHPW增大而减小，保证室内温度满足番茄生长的前提下，将总成本维持在可控范围内，综合后屋面仰角与采光屋面角取值，RHPW为1.8 m最佳。



(a) 阴天(2022-01-21—01-23)，室内
(a) Cloudy (2022-01-21—01-23), indoor

(b) 阴天(2022-01-21—01-23)，北墙
(b) Cloudy (2022-01-21—01-23), north wall

(c) 晴天(2022-01-01—01-03)，室内
(c) Sunny (2022-01-01—01-03), indoor

(d) 晴天(2022-01-01—01-03)，北墙
(d) Sunny (2022-01-01—01-03), north wall

图 7　阴天和晴天不同后屋面水平投影宽度(RHPW)温室室内温度和北墙温度

Fig.7　Indoor and north wall temperatures of greenhouses with different rear roof horizontal projection width (RHPW) on cloudy and sunny days

表 3　不同后屋面水平投影宽度日光温室建造成本

Table 3　Construction costs of greenhouse with different rear roof horizontal projection width

后屋面水平投影宽度/m RHPW	后屋面仰角/(°) Rear roof elevation	前屋面采光角/(°) Front roof lighting angle	总成本/万元 Total cost
0.8	70	25	22.61
1.3	57	26	22.35
1.8	46	27	22.15
2.3	37	29	21.92
2.8	31	30	21.86

2.3　试验温室建筑参数组合优化分析

为进一步分析温室建筑参数的改变对室内温度、北墙温度及建造成本的影响，采用正交试验法对温室建筑参数进行组合优化。将脊高(4.8、5.3、5.8 m)、北墙高度(3.2、3.7、4.2 m)、后屋面水平投影宽度(1.3、1.8、2.3 m)3个参数各取3个水平，展开9次试验，试验方案见表4。

图8示出9种试验方案的温室在连续阴天、连续晴天的室内温度和北墙温度。可知，试验9温室的脊高和北墙高度均高于其他试验温室，其室内和北墙的平均温度最高，连续阴天室内和北墙平均温度分别为11.34、11.59 ℃，连续晴天分别为19.62、22.39 ℃。试验2温室的脊高低、后屋面水平投影宽度较大，相同条件下接收的太阳辐射量低于其他建筑参数的温室，其室内和北墙平均温度最低，连续阴天室内和北墙平均温度分别为10.73、11.00 ℃，连续晴天分别为18.62、21.23 ℃。试验5温室在连续阴天室内和北墙平均温度分别为11.08、11.34 ℃，连续晴天室内和北墙平均温度分别为

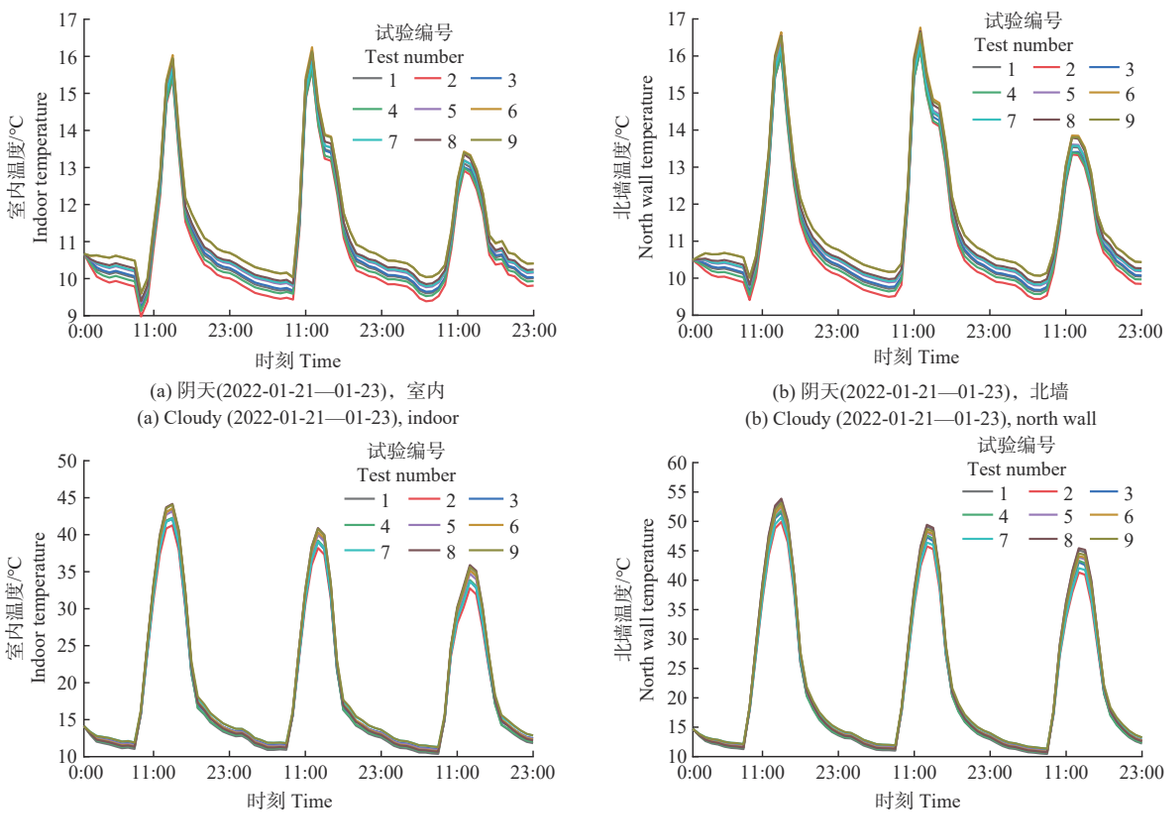
表 4 温室建筑参数正交优化试验方案

Table 4 Experimental scheme for orthogonal optimization of greenhouse building parameters

试验编号 Test number	脊高/m Ridge height	北墙高度/m North wall height	后屋面水平投影宽度/m RHPW
1	4.8	3.2	1.3
2	4.8	3.7	2.3
3	4.8	4.2	1.8
4	5.3	3.2	2.3
5	5.3	3.7	1.8
6	5.3	4.2	1.3
7	5.8	3.2	1.8
8	5.8	3.7	1.3
9	5.8	4.2	2.3

19.10、21.90 ℃,温度处于中间水平。

9种试验方案的温室总建造成本分别为21.66、21.64、22.14、21.66、22.15、22.55、22.43、22.92、22.78万元。试验1、2、3、4温室的室内和北墙平均温度低于试验5温室。试验6、7、8、9温室的室内和北墙平均温度高于试验5温室,但总建造成本均高于试验5温室,综合温度和建造成本,试验5,即脊高5.3 m,北墙高度3.7 m,后屋面水平投影宽度1.8 m



(a) 阴天(2022-01-21—01-23),室内
(a) Cloudy (2022-01-21—01-23), indoor

(b) 阴天(2022-01-21—01-23),北墙
(b) Cloudy (2022-01-21—01-23), north wall

(c) 晴天(2022-01-01—01-03),室内
(c) Sunny (2022-01-01—01-03), indoor

(d) 晴天(2022-01-01—01-03),北墙
(d) Sunny (2022-01-01—01-03), north wall

图 8 阴天和晴天不同正交优化试验方案温室室内温度和北墙温度

Fig.8 Indoor and north wall temperatures of greenhouses with different orthogonal optimization test protocols for cloudy and sunny days

的温室最佳。

3　结论与讨论

本研究利用TRNSYS建立试验温室模型，对温室的脊高、北墙高度、后屋面水平投影宽度（RHPW）进行优化研究，主要结论如下：

1）室内温度、北墙温度和总建造成本随脊高、北墙高度的增大而增加，随RHPW的增大而减少。脊高的变化对室内温度和北墙温度的改变具有更显著的影响，RHPW的影响相对较弱，可优先通过增加脊高的方式提高室内温度和北墙温度。

2）当脊高＞5.3 m时，晴天和阴天室内平均温度和北墙平均温度的增幅明显降低，可见一味增加脊高对提升温室热环境并无帮助，同时会增加温室建造成本。北墙高度为3.7 m时室内温度和北墙温度达到较好效果，北墙高度继续增大，对室内温度和北墙温度的提升效果并不明显。RHPW为1.8 m的温室后屋面仰角46°，采光屋面角27°为最佳。

3）通过正交试验对温室建筑参数进行优化分析可知，脊高为5.3 m，北墙高度为3.7 m，RHPW为1.8 m时，温室在充分满足冬季喜温果菜越冬生产的同时，建造成本较低，为22.15万元。

4）本研究建立的温室模型可在兼顾低成本和较高热性能基础上对温室的建筑参数进行优化，但在温室建模过程中忽略了作物蒸腾作用的影响及遮挡作用，这在实际应用温室生产作物时是不可忽视的；同时温室内的湿度、二氧化碳浓度等参数的平衡对作物生长至关重要，因此，后续需进一步优化温室模型，并对室内温湿度等参数平衡进行更全面的分析。

参考文献 References

[1] 梁宗敏，郜子轩，任杰德．北墙不同外倾角对日光温室表面风压与体型系数的影响[J]．农业工程学报，2022，38(21)：197-204
Liang Z M, Gao Z X, Ren J D. Influences of inclination angles of north wall on surface wind pressure and shape coefficient of solar greenhouses [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(21): 197-204 (in Chinese)

[2] 杨定伟，荆海薇，景炜婷，何斌，邹志荣，鲍恩财，曹晏飞．不同墙体材料的装配式日光温室的热性能对比分析[J]．中国农业大学学报，2023，28(10)：194-205
Yang D W, Jing H W, Jing W T, He B, Zou Z R, Bao E C, Cao Y F. Comparative analysis of thermal performance of fabricated solar greenhouses with different wall materials [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2023, 28(10): 194-205 (in Chinese)

[3] 何芬，司长青，侯永，田婧，齐飞，潘守江．两种不同墙体结构的日光温室光热环境测试及性能分析[J]．北方园艺，2022(22)：44-50
He F, Si C Q, Hou Y, Tian J, Qi F, Pan S J. Test and performance analysis of thermal and light environment in solar greenhouse with two different wall structures[J]. *Northern Horticulture*, 2022(22): 44-50 (in Chinese)

[4] Xu D M, Li Y M, Zhang Y, Xu H, Li T L, Liu X A. Effects of orientation and structure on solar radiation interception in Chinese solar greenhouse[J]. *PLoS One*, 2020, 15(11): e0242002

[5] Zhang R, Liu Y C, Zhu D L, Zhang X M, Ge M S, Cai Y H. Optimal design for solar greenhouses based on canopy height [J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 53: 104473

[6] 刘金郎，邵鑫．新型抗灾害日光温室结构设计及性能观测研究[J]．北方园艺，2019(7)：65-69
Liu J L, Shao X. Research on structural design and performance observation of new disaster-resistant solar greenhouse [J]. *Northern Horticulture*, 2019(7): 65-69 (in Chinese)

[7] Tong G H, Christopher D M, Zhang G Q. New insights on span selection for Chinese solar greenhouses using CFD analyses [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018, 149: 3-15

[8] Wu X Y, Liu X A, Yue X, Xu H, Li T L, Li Y M. Effect of the ridge position ratio on the thermal environment of the Chinese solar greenhouse [J]. *Royal Society Open Science*, 2021, 8(5): 201707

[9] 魏晓明，周长吉，曹楠，丁小明．基于光照的日光温室总体尺寸确定方法研究[J]．北方园艺，2010(15)：1-5
Wei X M, Zhou C J, Cao N, Ding X M. Design method for solar greenhouse outlines based on illumination conditions [J]. *Northern Horticulture*, 2010(15): 1-5 (in Chinese)

[10] 曹晏飞，荆海薇，赵淑梅，邹志荣，鲍恩财．日光温室后屋面投影宽度与墙体高度优化[J]．农业工程学报，2017，33(7)：183-189
Cao Y F, Jing H W, Zhao S M, Zou Z R, Bao E C. Optimization of back roof projection width and northern wall height in Chinese solar greenhouse [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(7): 183-189 (in Chinese)

[11] 郭艳玲，李石，陈国辉．后屋面水平投影长度对日光温室性能的研究[J]．安徽农业科学，2014，42(5)：1555-1557
Guo Y L, Li S, Chen G H. Different roof horizontal projection length on the performance of greenhouse [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2014, 42(5): 1555-1557 (in Chinese)

[12] 朱雄伟，何斌，张勇．全季光照下日光温室后屋面水平投影宽度优化[J]．北方园艺，2020(1)：56-61
Zhu X W, He B, Zhang Y. Study on horizontal projection width optimization of roof behind solar greenhouse in full season light [J]. *Northern Horticulture*, 2020(1): 56-61 (in Chinese)

[13] Fan Z L, Liu X A, Yue X, Zhang L, Xie X Y, Li Y M, Li T L. Effect of external thermal insulation layer on the Chinese solar greenhouse microclimate[J]. *Royal Society Open Science*, 2021, 8(12): 211217

[14] 闫冬梅，徐开亮，周长吉，张秋生．柔性保温墙椭圆管单管拱架日光温室内力分析及结构优化[J]．农业工程学报，2023，39(14)：215-222
Yan D M, Xu K L, Zhou C J, Zhang Q S. Internal force analysis and structure optimization of single oval tube arch solar greenhouse with flexible insulation wall [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(14): 215-222 (in Chinese)

[15] Agrebi S, Chargui R, Tashtoush B, Guizani A. Comparative performance analysis of a solar assisted heat pump for greenhouse heating in Tunisia[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2021, 131: 547-558

[16] Chen C, Yu N, Yang F G, Mahkamov K, Han F T, Li Y R, Ling H S.

Theoretical and experimental study on selection of physical dimensions of passive solar greenhouses for enhanced energy performance [J]. *Solar Energy*, 2019, 191: 46-56

[17] 龚健林，何斌，张亦博，付国．基于误差修正模型的日光温室温度预测模型[J]．农机化研究，2023，45(10)：47-54

Gong J L, He B, Zhang Y B, Fu G. Temperature prediction model of solar greenhouse based on error correction model [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2023, 45(10): 47-54(in Chinese)

[18] 关瑞，吴坚勇，刘中华，刘振宇．日光温室钢架结构分析及优化[J]．山西农业大学学报：自然科学版，2019，39(6)：100-106

Guan R, Wu J Y, Liu Z H, Liu Z Y. Analysis and optimization of greenhouse steel frame structure [J]. *Journal of Shanxi Agricultural University: Natural Science Edition*, 2019, 39(6): 100-106 (in Chinese)

[19] 鲍恩财，申婷婷，张勇，曹凯，曹晏飞，陈丹艳，何斌，邹志荣．装配式主动蓄热墙体日光温室热性能分析[J]．农业工程学报，2018，34(10)：178-186

Bao E C, Shen T T, Zhang Y, Cao K, Cao Y F, Chen D Y, He B, Zou Z R. Thermal performance analysis of assembled active heat storage wall in Chinese solar greenhouse [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(10): 178-186 (in Chinese)

[20] 王云冰，邹志荣，张志新，杨建军，燕飞．关中地区不同后屋仰角日光温室保温性能分析[J]．中国农业气象，2009，30(2)：191-194

Wang Y B, Zou Z R, Zhang Z X, Yang J J, Yan F. Thermal insulation property analysis of various back-roof elevation angle solar greenhouse in central Shaanxi Plain [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2009, 30(2): 191-194 (in Chinese)

责任编辑：刘迎春

第一作者简介：李永，硕士，正高级工程师，注册公用设备工程师（暖通空调）、注册咨询工程师，现任河北省建筑科学研究院有限公司建筑节能与绿色建筑研究所主任工程师。先后主持或参与国家科技支撑计划项目、河北省科技厅重点研发计划项目、河北省人社厅人才培养工程，河北省建设行业科技计划项目以及企业合作的横向科研项目10余项。发表论文30余篇。申请专利10余项。获河北省科技进步三等奖1项。河北省建设行业科技进步一等奖2项。出版专著2部。主编或参编标准20余项。

通讯作者简介：郄丽娟，硕士，副研究员，现任河北省农林科学院经济作物研究所园艺工程室副主任。长期从事农业设施装备的研发相关工作。先后主持或参加国家重点研发子课题、国家科技支撑计划课题、省重点研发项目、省农业科技成果转化项目、省农林科学院创新课题等10余项。获河北省科技进步二等奖1项（排名第2）、河北省科技进步三等奖1项（排名第1）和河北省山区创业奖1项（排名第1）。发表论文30余篇。授权专利10项。主编省地方标准3项，参编书籍4本。