DOI: 10.12398/j.issn.2096-7217.2026.01.018

严寒天气双层膜日光温室室内热湿环境试验研究

王伟明[1], 塔娜[1*], 刘坤宇[2], 甄琦[1, 3]

(1. 内蒙古农业大学机电工程学院,呼和浩特,010018; 2. 中国农业科学院草原研究所,呼和浩特,010010; 3. 内蒙古农业大学能源与交通工程学院,呼和浩特,010018)

摘要:随着设施农业的不断推进,日光温室在北方地区的应用也越来越普及,双层膜日光温室作为一种有效的农业设施,显著改善了作物生长环境。以北方寒冷干旱地区严寒天气下的双层膜日光温室为研究对象,选取2024年1月全月平均气温最低的日期21—22日,通过对其内部热湿环境的分析,探讨严寒天气条件下温室的保温性能和内部热湿环境的时空变化规律。研究表明,双层膜日光温室在大雪后的严寒天气下也能保持室内相对稳定的温度和湿度,极大地改善了冬季作物的生长环境。双层膜日光温室内部温度呈现3阶段变化规律,从太阳升起伴随的升温阶段、正午过后的快速降温阶段和夜晚缓慢降温阶段。温度随太阳升起伴随的升温阶段有沿东西长度方向上从东到西温度逐渐降低,沿南北跨度方向上从南到北逐渐降低,沿竖直高度方向上从高至低逐渐降低的变化规律;温度在太阳正午过后的缓慢降温阶段有沿东西长度方向上从西到东温度逐渐降低,沿南北跨度方向上从北到南逐渐降低,沿竖直高度方向上从低到高逐渐降低的变化规律。相对湿度同样呈现3阶段周期性变化规律,具体变化与温度变化规律呈负相关。土壤温度沿长度方向同样表现出中间向东西两边递减的空间分布;跨度方向则由中部向南北两侧递减,且北墙区域温度高于南部前脚;垂直方向上,温度随深度增加波动幅度减小,表明下层土壤具有更强的热稳定性。试验得出双层膜日光温室在极端天气下也可以保持种植区域不低于3.61 ℃,全冬季持续保持种植区环境温度高于5 ℃的稳定栽培条件。本研究结果进一步揭示双层膜日光温室在严寒天气条件下的热湿环境特征,为温室内部环境因子精准调控提供了科学依据和数据支持。

关键词:设施农业;严寒天气;双层膜日光温室;热湿环境;环境因子

中图分类号:S2;S625.5 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-7217(2026)01-0167-11

王伟明, 塔娜, 刘坤宇, 甄琦. 严寒天气双层膜日光温室室内热湿环境试验研究[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2026, 7(1): 167—177

WANG Weiming, TA Na, LIU Kunyu, ZHEN Qi. Experimental study on the indoor heat and humidity environment of a double-film solar greenhouse in severe cold weather [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2026, 7(1): 167—177

0 引言

农业是我国国民经济建设和发展的支撑[1],设施农业作为推动现代农业转型升级的关键路径,正朝着智能化、高效化与低碳化方向快速发展[2-4]。国家高度重视设施农业发展,陆续出台了多项政策文件,包括《农业农村部关于加快推进设施种植机械化发展的意见》[5]《中共中央 国务院关于做好2023年全面推进乡村振兴重点工作的意见》[6]以及《全国现代设施农业建设规划(2023—2030年)》[7]等,明确提出要加快现代设施农业发展步伐,推动设施装备现代化,全面提升乡村产业发展水平,为乡村振兴提供有力支撑。在国家政策引导下,内蒙古自治区积极响应并出台《内蒙古自治区"十四五"推进农牧业农村牧区现代化发展规划》[8]、《内蒙古自治区现代设施农牧业提升三年行动方案(2023—2025年)》等区域性发展规划[9],指出要加快引进先进技术、现代装备和科学管理理念,提升设施农业机械化与智能化水平,推进高标准日光温室和塑料大棚设施建设、加快推进老旧温室改造提升,提升设施农业生产与保障能力。

截至2025年,全国设施农业面积已超过2 668 khm^2,其中日光温室在北方寒冷地区广泛布局,已成为

收稿日期:2025-03-14 修回日期:2025-06-20

基金项目:内蒙古自治区研究生科研创新项目(KC2024038B);内蒙古自然科学基金项目(2024QN03058、2022MS03040);一流学科研究专项项目(YLXKZX-NND-009)

第一作者:王伟明,男,1997年生,内蒙古呼伦贝尔新巴尔虎左旗人,硕士研究生;研究方向为力学在工程中的应用。E-mail: wwmnmgnydx@163.com

*通信作者:塔娜,女,1967年生,内蒙古锡林郭勒正蓝旗人,博士,教授,博士生导师;研究方向为日光温室内环境因子数值模拟等。E-mail: jdtana@163.com

冬季农业稳产增收的核心设施类型。相较于单层膜结构,双层覆盖膜之间形成的空气隔热层可有效降低热量散失,显著提升夜间保温能力和整体热效率,尤其在寒潮、霜冻等极端天气下表现出更强的环境稳定性。双层覆盖膜之间形成的空气层可有效降低热量传导,增强保温隔热能力且使得温度波动更小,有利于作物生理代谢稳定进行,甚至可在无辅助加热条件下实现冬季栽培,显著提升夜间温度和温室内热环境的稳定性。因此,双膜日光温室凭借其优越的热效率、抗寒性和节能能力,高度契合内蒙古寒冷干旱地区对冬季农业生产的保温、稳产与低能耗要求,已成为区域内设施农业重点推广的适配型技术路径,具有广阔的应用前景与现实意义。

日光温室依靠太阳辐射为作物提供适宜的生长环境,具有运行成本低、节能环保、易于管理等特点[10],特别适用于外界气温较低的寒冷地区,实现了果蔬等作物的周年稳定生产,有效延长了种植周期,提高了土地利用率和经济效益。日光温室内的温湿度时空分布[11]受多种因素影响,主要包括结构设计[12]、外界气候条件[13]和光照情况[14]等。在结构设计方面,不同的墙体填充材料[15]、覆盖薄膜[16]和建筑结构[17]等结构的改变都会显著影响温室的保温性能[18]和内部环境[19]。外界气候影响方面,光照强度[20]的变化同样影响温室内的热湿环境[21],如晴天、阴天、雪天等不同天气情况[22-24],对温室内的温度[25]、光照及湿度等气象条件[26-29]有显著影响。

尽管成果丰硕,对于双层膜温室的研究仍面临多膜结构热湿传递机制不明确、极端天气下模型预测精度不足、监测装备成本高等瓶颈。为推动双层膜日光温室在寒冷地区的规模化、标准化应用,助力设施农业向绿色高效方向持续演进,仍需要深入探索例如应对极端天气,如北方寒冷干旱地区的严寒天气(−20 ℃~−29.9 ℃)下双层膜日光温室室内温湿度分布特性变化的研究仍缺乏进一步的研究。针对上述问题,本研究通过布置传感器进行环境监测,结合数据分析方法,探究日光温室在寒冷干旱地区室内温湿度的时空分布特性,为优化温室环境调控提供理论支持和实践指导,确保作物在不利气候条件下的正常生长。

1 材料与方法

试验双层膜日光温室位于内蒙古农业大学海流图科技园区(内蒙古呼和浩特市土默特左旗海流图村),海流图园区有大量种植用地。土默特左旗位于土默川平原,温带大陆性气候,夏季短且炎热,冬季长且寒冷,年平均气温7.2 ℃。年平均日照时间长达2 952.1 h,位于全国日照时长前列,相对湿度较低,年平均湿度保持在54%。其自然环境因素为后续开展相应试验提供了必要性的前提条件。

试验温室为双层膜结构日光温室,双层膜日光温室结构如图1所示,东西方向长度70 m,南北方向跨度8.5 m,纵向脊高4.75 m,后墙高3.5 m,主体支撑为椭圆钢筋,内膜和外膜均采用聚氯乙烯保温薄膜,墙体为外侧红砖、内填充泥沙混合材料的复合保温墙体。在外膜顶部和内膜底部分别设有上、下两个通风口均由电动卷膜机控制其开合,当日照结束后,内膜外侧的复合保温棉被通过电动卷被机控制打开达到保温效果,用于减缓温室内的热量的快速流失。

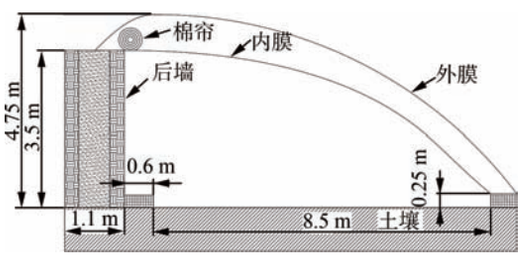


图1 双层膜日光温室结构图

Figure 1 Structural diagram of double-film solar greenhouse

选取寒冷干旱气候区的双层膜日光温室进行为期4个月(2023年12月—2024年3月)的冬季试验。室外空气温度、湿度、太阳辐射等外部气象数据,选用HOBOU30/NRC小型气候监测站进行自动采集,室内选用FLEX1000TH空气湿度传感器、MS10土壤温湿度传感器、YJ-SR100型太阳能光照辐射传感器对空气温度、空气相对湿度、土壤温度、土壤含水率、辐射等数据进行全天候监测并自动采集,数据采集时间间隔为0.5 h,采集仪器及参数如表1所示。

采集到的室内温度、湿度、辐射等数据通过有线传输方式实时上传至电脑数据平台,导出数据后将数据根据不同情况进行分组研究,分析双层膜温室的保温性能和换热情况。测试试验起止时间为2023年12月1日至2024年3月31日。传感器布置截面如图2所示,种植和研究区域集中在各距离东西墙5 m的温室中间区域,便于精准描述温室内环境温湿度的空间分布并抵消边界的影响。沿日光温室长度方向由西向东依次选取A、B、C、D、E共5个截面为传感器布置面,其中C截面是日光温室中间截面,B、D截面位于距离C截面两侧15 m处,A、E截面位于距离C截面两侧25 m处。自北向南在每个截面上布置4个温湿度采集点位置,4、3、2、1号采集点从北墙向南依次排开,间距分别为1 m、3 m、3 m、1 m,其中2、3号采集点位于截面中间,1号采集点位于前脚。每个传感器布置截面由低向高布置4

个采集点位置，距地面高度分别为0.4 m、0.8 m、1.2 m和2.2 m。土壤方面，在每个传感器布置截面中选取距离北墙1 m、4 m、7 m的2、3、4号测点位置，纵向距离地面深度分别为0.05 m、0.15 m、0.25 m处位置分别布置9个土壤温湿度传感器。具体传感器布置如图3所示。每个截面有12个空气温湿度采集点、9个土壤温湿度采集点，5个截面合计布置60个温湿度传感器、45个土壤温湿度传感器。在温室内B、C、D截面处2号采集点靠近内膜处布置了太阳能辐射传感器，并记录24 h全时段的辐射数据。

表1　采集仪器及参数

Table 1　Acquisition of instrument sand parameters

测试位置	测试仪器	型号	数据类型	量程	精度
室外	小型气候监测站	HOBOU30/NRC	温度/℃	−40～60	±0.2
			湿度/(%RH)	0～100	±2.5
			太阳能辐射/(W·m^{-2})	0～1 280	±10
室内	空气温湿度传感器	FLEX1000TH	温度/℃	−20～85	±0.3
			湿度/(%RH)	0～100	±2
	土壤温湿度传感器	MS10	温度/℃	−40～80	±0.5
			含水率/%	0～100	±3
	太阳能辐射传感器	YJ−SR100	太阳能辐射/(W·m^{-2})	0～1 500	±10

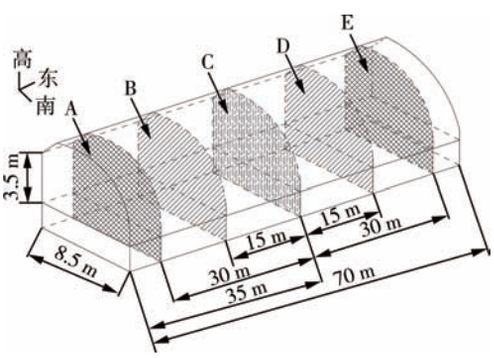


图2　布置截面图

Figure 2　Lay out the cross-sectional view

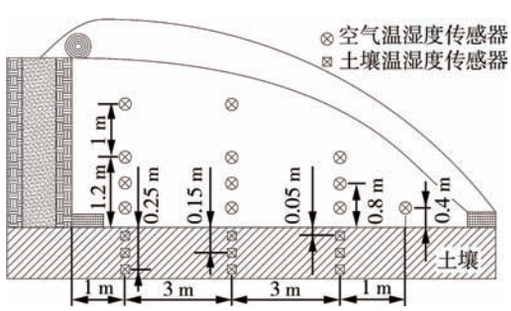


图3　传感器布置图

Figure 3　Sensor layout diagram

2　结果与分析

根据采集气象监测数据可知土默特左旗2024年1月平均最低气温为−15.50 ℃，1月22日当日气温达到全月气温最低点，最低温度低至−25.72 ℃，符合严寒天气标准(−20 ℃～−29.9 ℃)。为探究1月严寒天气时双层膜日光温室的内部热湿度环境变化情况，选取21日、22日两天的数据作为试验数据。

2.1　室外分析

21日、22日室外环境温湿度变化情况如图4所示，温湿度随时间的变化呈现一定的周期变化规律，室外最高温度出现在12:00−15:00期间分别为−16.21 ℃和−14.54 ℃，室外最低温度出现在3:00−7:00期间分别为−22.01 ℃和−25.72 ℃。湿度变化与温度呈现负相关，最高湿度分别为63.90%和75.46%，最低湿度分别为45.53%和44.86%。

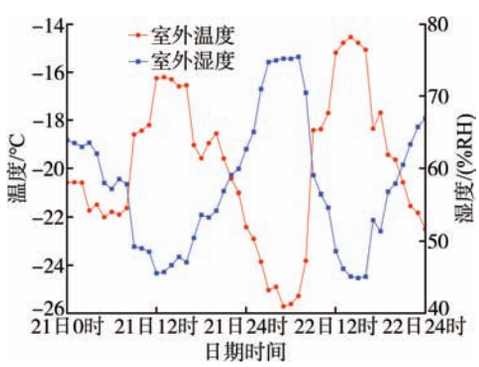


图4　日光温室室外温湿度变化情况

Figure 4　Changes in outdoor temperature and humidity in solar greenhouses

室外太阳辐射的日变化规律如图5所示，这两日室外法向直接太阳辐射、地表水平辐射和散射辐射整体变化趋势相同，最高值出现时间均在12:00−14:00期间，21日和22日室外最高法向直接辐射分别为746.59 W/m^2、904.28 W/m^2，最高地表水平辐射分别为487.00 W/m^2、530.33 W/m^2。可以看出室外温湿度变化情况与太阳辐射有直接关联性，温度与太阳辐射呈现相同的增减性，随着辐射的增加而增加至当日最高

点,湿度与太阳辐射的变化呈相反的增减性。

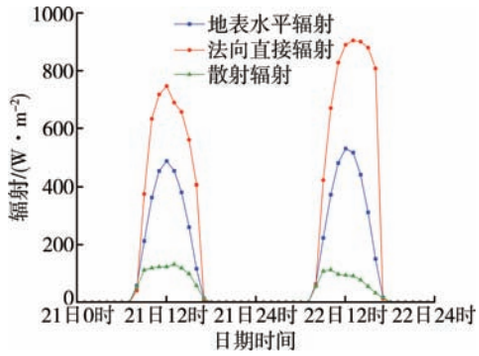


图5 日光温室室外太阳辐射变化情况

Figure 5 Changes in outdoor solar radiation in solar greenhouses

2.2 室内空气温湿度分析

2.2.1 温室内空气温湿度沿长度方向的变化规律

双层膜日光温室沿东西长度方向A、B、C、D、E共5个传感器布置面的冠层区域不同时间内平均温度和平均相对湿度的变化趋势如图6和图7所示,5个截面的平均温度、平均相对湿度变化趋势大体一致,并与太阳辐射变化规律有很大的相关性。温度呈现明显的昼夜变化规律,白天温度迅速上升,夜间温度下降,形成24 h周期。每日最高温度出现在13:00—15:00期间,而最低温度出现在8:00—9:00期间。其中,不同测量面的温度由于所接受的太阳辐射范围不同而存在一定的差异,A、E面因墙体遮挡部分太阳辐射且靠近温室边缘区域,故受外部气象影响较大,温度相对较低,而C面接受太阳辐射时间最长且范围最大,故白天温度最高。

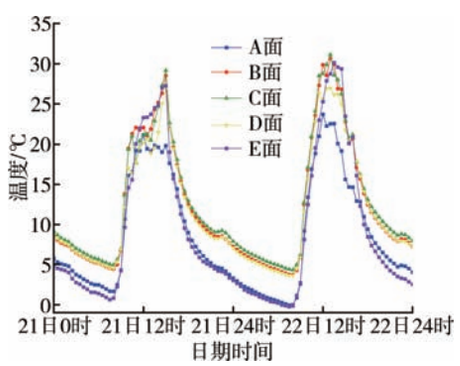


图6 沿长度方向各截面平均温度变化曲线

Figure 6 Average temperature curve of each section along the length direction

基于上述原因,为尽可能降低外界因素的影响,选取中间区域3个截面探究温室内部热湿环境的变化情况。根据图6可以得出,温度变化主要受太阳辐射影响,白天随着太阳辐射增强而升温,夜间由于辐射散热作用而降温,且每日温差较大。在温度逐渐升高阶段,不同截面位置的平均温度呈现出较大的差异性,温度沿西向东方向逐渐降低;在温度缓慢下降阶段,呈现出由中间向两边递减的趋势且西部略高于东部区域。这主要是由于太阳辐射角度的变化以及墙体遮挡部分太阳辐射所造成的,除此之外还因为作物和土壤的储热作用造成降温阶段中间区域温度高于两侧。最低温度通常出现在上午将保温被卷起时,例如1月21日最低温度出现在D面位置,时间为08:00,温度为4.43 ℃;而1月22日的最低温度同样出现在截面C位置,时间为08:00,温度为3.61 ℃,较前一天略有下降。A、E两面温度最低达到0 ℃左右,B、C、D截面所在区域最低温度控制在4 ℃左右,这为之后的作物区域种植和结构优化提供了有效的数据论证和理论支撑。

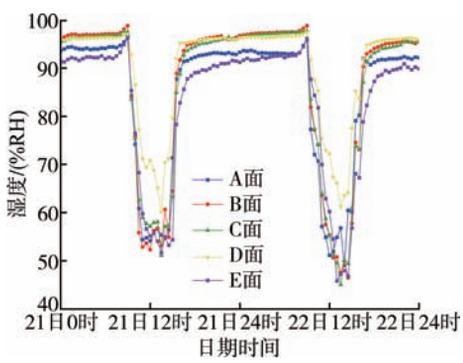


图7 沿长度方向各截面平均湿度变化曲线

Figure 7 Average humidity curve of each section along the length direction

在温度升高阶段,不同截面位置的平均温度呈现出相同的变化规律,温度峰值均出现在14:30左右。其中,两日的温度峰值均出现在截面B上,最高温度分别为29.16 ℃,和31.11 ℃,1月22日较前一天上升了约2 ℃。14:30之后温度开始呈快速下降趋势,直到太阳落山将保温被展开后,降温速度逐渐趋于缓慢。湿度则与温度呈相反变化规律,即温度升高时湿度降低,温度降低时湿度升高。例如,1月21日的最高和最低湿度分别为98.90%和51.09%,而1月22日的最高和最低湿度分别为98.91%和45.04%,最低平均湿度相较于1月21日下降了6.05%。

2.2.2 温室内空气温湿度沿跨度方向的变化规律

日光温室内沿跨度方向上选取距离北墙距离7 m、4 m、1 m位置截取截面分析,分别定义为2、3、4采集点,不同截面的平均温度、相对湿度随时间的变化情况如图8、图9所示,温室不同跨度位置的温湿度变化与太阳辐射的变化有很强的相关性。根据温度变化增减性,大致可以分为3个阶段的周期性变化,即温度缓慢下降、快速上升和快速下降3个阶段。温度缓慢下降阶段有从南到北逐渐升高的趋势,即温度随着与薄膜前脚距离的增大而减小;温度上升阶段呈现出相反的

变化趋势，即温度随着与北墙距离增大而升高。日最低温度出现在上午保温被卷起时，1月21日和22日最低温度均出现于2号采集点位置，温度分别为3.99 ℃和3.17 ℃。除靠近薄膜区域，温室内大部分区域均可基本保持温度在5 ℃以上。不同位置的平均温度峰值在快速上升阶段均出现于14:00左右，1月21日和22日最高温度均出现在2号采集点位置，分别为28.73 ℃和29.7 ℃。而湿度变化的规律呈现出与温度变化相反的趋势，21日和22日最高和最低平均相对湿度均同样出现在2号采集点位置，分别为98.25%、98.45%，47.22%、49.23%。相比于1月21日湿度范围扩大，温室内部温湿度分布越靠近北墙，温度和湿度变化幅度越小，热湿环境更加稳定的规律。

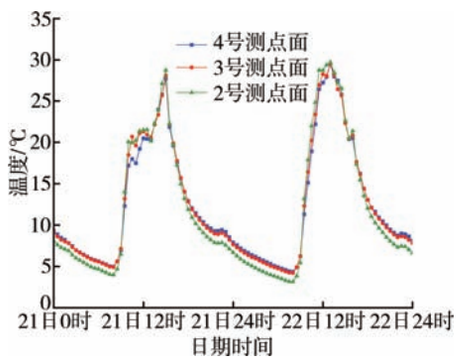


图8　沿跨度方向各截面平均温度变化曲线

Figure 8　Average temperature curve of each section along the span direction

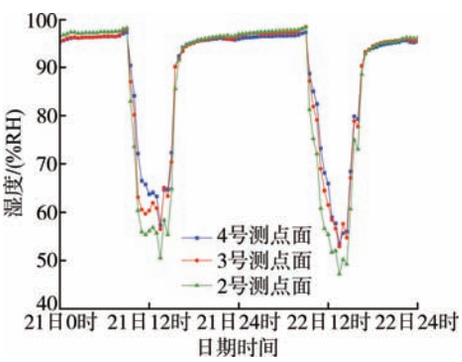


图9　沿跨度方向各截面平均湿度变化曲线

Figure 9　Average humidity curve of each section along the span direction

2.2.3　温室内空气温湿度沿高度方向的变化规律

研究选取了3采集点、4采集点位置，在温室内环境沿竖直方向选取0.4 m、0.8 m、1.2 m共3个不同高度截面平均温度、相对湿度随时间的变化情况如图10和图11所示，温度、湿度的变化在不同高度位置的呈现相同的周期趋势。分析不同高度温度可以发现：温度上升阶段，随着高度升高平均温度也逐渐升高；温度缓慢下降阶段，随着高度升高平均温度却逐渐降低。相对湿度也呈现周期性变化规律，与温度的变化规律呈负相关关系。1月21日、22日的最低温度分别为4.77 ℃和4.05 ℃，都出现在早晨8:00的1.2 m高度处，最高温度分别为30.83 ℃和32 ℃，分别出现在13:30和15:00左右的1.2 m高度处。1月22日的最高温度较前一日升高1.17 ℃，出现时间也提前了大约1.5 h。由于室外辐射强度较前一日有所增强，最高温度也相应上升1.17 ℃，22日温度变化区间扩大1.89 ℃。相对湿度变化也呈现周期性增减变化规律，在湿度下降阶段也呈现出高度越高湿度越低的规律。

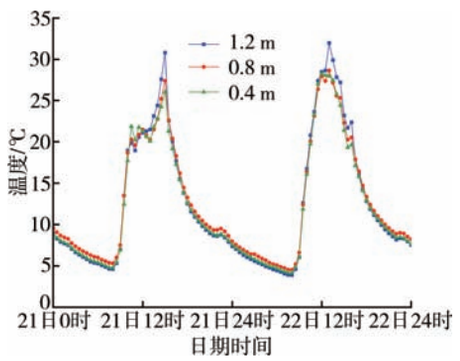


图10　沿高度方向各截面平均温度变化曲线

Figure 10　Average temperature curve of each section along the height direction

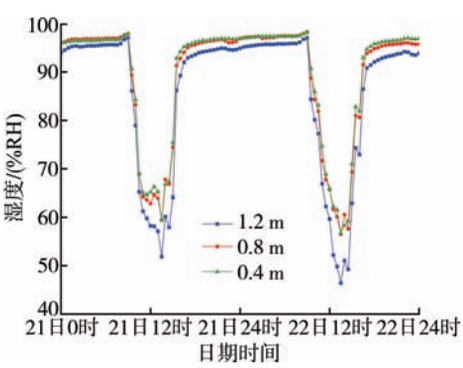


图11　沿高度方向各截面平均湿度变化曲线

Figure 11　Average humidity curve of each section along the height direction

2.3　室内土壤温湿度分析

2.3.1　温室内土壤温度沿长度方向的变化规律

在双层膜日光温室东西向以15 m的间距布置了5个传感器测面（A、B、C、D、E）以研究双层膜日光温室内部土壤温度和含水率分布规律。土壤平均温度和含水率变化情况如图12和图13所示，可以看出温室内各测面土壤温度变化都表现出明显的太阳辐射主导特征，即白天温度随太阳辐射增强升高，夜间温度随辐射消失而缓慢下降。在严寒天气下，双层膜结构仍能很好地保温，整体温度为4.79 ℃～15.09 ℃，昼夜温差约为6 ℃。从空间分布的角度来看，温室中部区域（B面和C面）的温度最高；温室最热的地方位于中间C面区域，表现出良好的保温和蓄热能力，全天平均温度保持

在13.5 ℃,夜间降温幅度较小;温室两端区域(A面和E面)的夜间温度较低,分别为5.69 ℃和4.79 ℃。总体呈现由中部向东西两侧递减,且西侧高于东侧的不对称温度分布规律。土壤含水率方面,其间B、C、D面含水率突然升高是由于21日对中间区域有浇水灌溉作业行为,故忽略含水率大幅升高后的数据,着重分析浇水前数据发现有两侧高于中间区域的含水率分布规律。

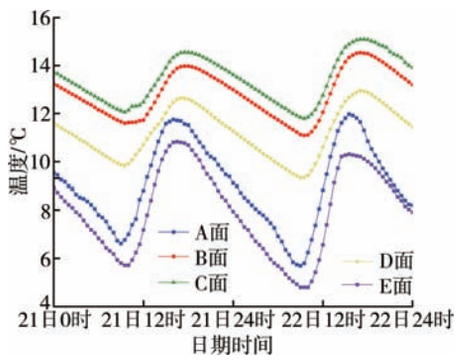


图12 长度方向各截面土壤平均温度变化曲线

Figure 12 Variation curves of average soil temperature in each section in the length direction

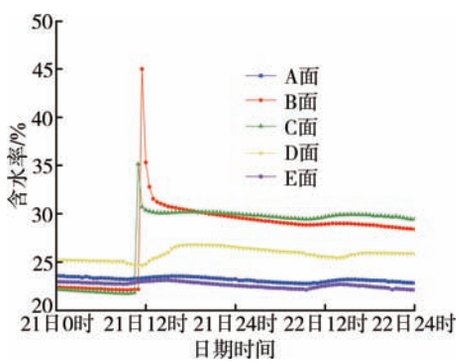


图13 长度方向各截面土壤含水率变化曲线

Figure 13 Variation curves of average soil water content in each section in the length direction

2.3.2 温室内土壤温度沿跨度方向的变化规律

日光温室内沿跨度方向在距离北墙1 m、4 m、7 m的采集点位置截取截面分析,分别定义为1面、2面、3面,选取温度变化幅度较小的0.25 m深度处不同截面的平均温度随时间的变化情况如图14所示。各测点的温度在昼夜之间表现出相同的周期波动,白天受太阳辐射影响温度上升,夜间则因散热作用温度下降,呈现良好的响应性和周期性。从温度分布规律可以得出,中部温度始终最高,昼夜均保持在12.34 ℃~13.58 ℃,热环境最为稳定;其次为靠近北墙部分,温度略低于中部,变化趋势基本一致;靠近南膜区域温度最低,尤其夜间降温明显,最低降至11.24 ℃,与中部温差可达2 ℃以上,昼夜温差也最为显著。从温度均值看,1面与2面温度相对较高,且温度波动较为平缓,3面温度变化幅度较大,尤其夜间温度明显低于其他两点,最低降至9 ℃左右,表明靠近前脚区域的保温能力相对较弱。进一步分析发现,日间温度变化趋势一致,但南侧区域夜间热量散失显著,降温速度更快,昼夜温差最大。温室内存在由中间向南北两侧温度递减趋势,且北侧温度略高,而南侧温度偏低且温度变化较大。含水率随时间变化如图15所示,由于21日有浇水灌溉作业对采集土壤含水率影响较大,但观察土壤含水率数据可以发现,含水率分布存在中间区域>靠近北墙区域>南膜前脚区域的规律。

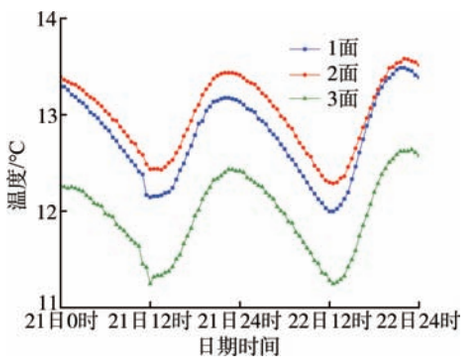


图14 跨度方向各截面土壤平均温度变化曲线

Figure 14 Variation curves of average soil temperature in each section in the span direction

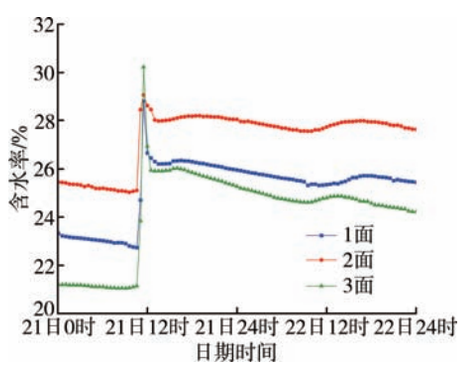


图15 跨度方向各截面土壤含水率变化曲线

Figure 15 Variation curves of average soil water content in each section in the span direction

2.3.3 温室内土壤温度沿深度方向的变化规律

在温室内环境沿竖直方向选取0.05 m、0.15 m、0.25 m共3个不同深度,截面平均温度、含水率随时间的变化情况如图16和图17所示,从图中可以看出,不同深度测量点都表现出相同趋势的昼夜波动特性。白天0.05 m深度处的温度最高,峰值超过16 ℃,明显高于0.15 m和0.25 m深度处;夜间0.05 m深度处温度明显下降,低于其他两深度层测点约2 ℃。温度变化幅度方面,在0.25 m处温度变化幅度最小,0.05 m处温度变化幅度最大,呈现出随深度增加温度变化曲线越为平稳的趋势。含水率方面有随着土壤深度的增加含水率上升的规律。

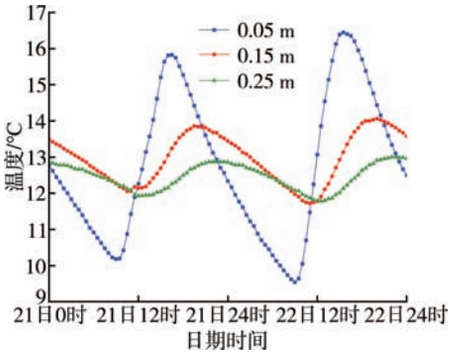


图 16　深度方向各截面土壤平均温度变化曲线

Figure 16　Variation curves of average soil temperature in each section in depth direction

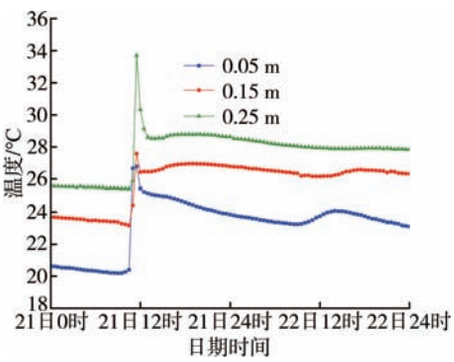


图 17　深度方向各截面土壤含水率变化曲线

Figure 17　Variation curves of average soil water content in each section in the depth direction

2.4　温室区域空间分布规律

双层膜日光温室内部空气和土壤温度呈现出一定的变化规律。在长度方向呈现出中间高于两侧的分布规律，这是因为侧墙受外界气温环境影响较大，存在一定热损耗。根据 5 个东西向测点的温度均值，可以得到中部区域最高并向两端逐步递减，且温室中部的温度波动幅度最小，曲线走势平稳，表明其受外部气候变化影响较小，因此具有热环境稳定的优势。在南北方向上形成的温度差异，主要受温室结构影响。南侧为双层膜拱棚结构，保温性能相对较弱，夜间热量流失更快，导致靠近前脚面区域温度显著偏低；而北墙为实心墙体，具备良好的蓄热能力，夜间仍可缓慢释放热量，对北部靠近墙的区域形成热补偿效应。中部区域热量汇聚，受两侧边界热干扰较小，因此温度更高、更稳定。温室内存在明显的南北向温度梯度，南侧区域热环境稳定性较差，是潜在的低温敏感区。在竖直纵向方向上的分布规律表明，温度随高度的增加变化幅度和变化速率都随之加快，土壤深度越深受到辐射和地面热交换的影响较小，白天地表在太阳辐射下快速升温，热量通过地面向上传导，导致近地表层温度迅速上升；夜间地表散热快，热量迅速损失，温度反而低于上层。0.15 m 深度处的温度曲线始终居中，波动幅度适中，在昼夜之间起到过渡作用。

中部区域在整体空间分布中变化幅度较小且平均温度较高，这是因为中部区域采光充足、距离墙体较远、热环境稳定。温室中部的热环境稳定性较好，可作为主作物种植区域的优选位置，也可以作为温室内的代表性测点。经严寒天气日光温室热湿环境研究验证，可以得到本温室设施在极端低温条件下仍然可以具备显著的保温效果和湿度调节作用。此温度区间可有效满足多种温带观赏植物的越冬栽培需求，该温控性能已通过连续两个生长季的实地监测数据验证。结合本文分析所得出的温湿度分布规律，在本温室中部区域种植具有一定耐旱性的郁金香进行试验，如图 18 所示郁金香长势良好且具有一定的观赏性和经济价值，进一步验证了温室结构在无辅助加热条件下的保温性能。



图 18　花卉种植情况图

Figure 18　Picture of flower planting

3　结论

本研究针对在极端严寒天气（－25.72 ℃）条件下，双层膜日光温室中部区域表现出显著的热稳定性。中部区域在长度与跨度方向上温度波动幅度最小且均值最高（冬季持续≥5 ℃），可维持种植区温度不低于 3.61 ℃，能够有效满足郁金香、百日菊等观赏作物的越冬需求。该区域兼具低温缓冲与湿度均衡特性，可优先布局高经济价值花卉种植，也可作为温室热湿环境监测的典型代表点位，为寒冷干旱地区设施农业越冬栽培空间优化及环境调控设定提供科学依据。北方寒冷干旱地区严寒气候条件下的双层膜日光温室，开展了三维空间多点布设的热湿环境动态监测与对比分析，得出以下主要结论。

1）揭示双层膜日光温室的 3 阶段温湿循环变化规律。双层膜日光温室内部最低气温通常出现在清晨 7:00－9:00 期间，即太阳升起后的保温被卷起时刻，分别在最低－25.72 ℃和－22.07 ℃的外部环境情况下

维持温室内空气温度在3.61 ℃和4.43 ℃以上。最高气温一般出现在13:00—15:00之间,分别在室外温度—16.21℃和—14.54℃的情况下,室内温度达到29.16 ℃和31.11 ℃。热湿环境随时间推移呈现从太阳升起伴随的升温阶段、正午过后的快速降温阶段和夜晚缓慢降温阶段。温度随太阳升起伴随的升温阶段有沿东西长度方向上从东向西逐渐降低,沿南北跨度方向上从南向北逐渐降低,沿竖直高度方向上从高至低逐渐降低的变化规律;温度在太阳正午过后的缓慢降温阶段有沿东西长度方向上从西到东温度逐渐降低,沿南北跨度方向上从北到南逐渐降低,沿竖直高度方向上从低到高逐渐降低的变化规律。相对湿度在两日相同的条件下,变化范围维持在51.09%~98.90%和45.04%~98.91%之间,同样呈现3阶段周期性变化规律,具体变化规律与温度呈负相关。

2)探究出温室土壤热环境时空变化特征。双层膜温室不仅空气温度受控,土壤热环境也具有较强调节能力,为作物根系提供良好的温度条件,在严寒天气下仍能维持整体温度变化范围在4.79 ℃~15.09 ℃区间内,昼夜温差为6 ℃左右。土壤温度沿长度方向热环境存在显著空间差异,温室中部区域温度明显高于两端,昼夜温度更为稳定,说明热量在中部更易积聚,保温效果更佳;沿跨度方向存在中部区域高于北部区域高于南部区域的温度分布特性,且北墙区域昼夜温度均高于前脚区域,体现出墙体结构的蓄热优势和前脚区域的热量易散失问题;垂直方向土壤温度呈现随深度增加,温度变化幅度降低,温度稳定性增加的规律。土壤温度时空分布规律研究表面双层膜温室在严寒条件下能有效维持内部热环境的整体稳定性,但东西两端仍存在一定热量散失,且需考虑南部前脚区域受外界温度影响较大的保温薄弱性。

3)明确指出温室三维空间热环境差异显著,尤其中部区域热稳定性最优。从空气温湿度来看,0.25 m深度土壤中部温度始终最高,昼夜均保持在12.34 ℃~13.58 ℃,较两侧温度差达2 ℃以上。中部截面在不同时间段内始终保持相对较高的温度水平和适中的湿度环境,昼夜温差小,热波动幅度低,表明其受外界气候波动影响较弱,具备更强的缓冲与调节能力。特别是在严寒夜间,温室中部区域仍可维持较高的最低温度,为作物越冬提供了可靠的热保障。从土壤热环境层面分析,中部区域土壤温度同样高于东西两端和南北边缘,且温度曲线波动平缓、昼夜差值较小,说明该区域地表热量积聚能力强、下传热流稳定,能够为根系提供更加恒定的生长微环境。此外,土壤垂向分析表明温度随深度增加而波动减弱,中部下层土壤具有良好的热惰性和蓄热能力,有助于防止夜间土壤剧烈降温造成根系冻害。

本研究在严寒气候条件下,系统开展了双层膜温室三维空间温度动态监测与比较分析,揭示了多方向热环境不均的内在特征,为双膜温室热环境调控优化提供了基础数据支撑和理论依据,也为日光温室设计、布点优化与智能调控策略提供实践参考。研究建议在后续设计和运行中进一步优化通风结构与墙体保温性能,重点加强南部前脚区域的保温设计,提升温室整体热效率与温度均匀性;在传感器布设、温控系统和作物布局中,应优先考虑中部区域的代表性与调控核心作用。空气与土壤层面的热湿环境特征一致表明,温室中部区域在全天候条件下均表现出良好的环境稳定性与热能利用效率,是作物安全越冬、稳产高产的首选区域。双层膜日光温室在寒冷干旱气候区低温环境下可以稳定运行,在温室中部区域所种植的郁金香长势良好进一步验证了双层膜日光温室能够在严寒天气下有效提高室内温度和湿度的稳定性,有效减少了热量流失、能源消耗和外部环境对作物生长的影响,可以为作物提供适宜的生长环境。未来可以进一步探索双层膜温室的优化设计,并结合智能控制系统,模拟适合不同作物生长的温湿度环境,实现北方冬季严寒地区温室农作物的稳产高产,解决冬季“农闲”等问题,为其带来更可观的经济收益。

参 考 文 献

[1] 李强, 郭峰, 江稔. 日光温室的研究现状与发展趋势[J]. 煤气与热力, 2023, 43(10): 34—37.
LI Qiang, GUO Feng, JIANG Nian. Research status and development trend of solar greenhouses [J]. Gas & Heat, 2023, 43(10): 34—37.

[2] 颜瑞, 贺湘楠, 李哲敏, 等. 设施农业环境监测技术与装备研究进展[J]. 中国农业信息, 2024, 36(2): 47—59.
YAN Rui, HE Xiangnan, LI Zhemin, et al. Research progress of environmental monitoring technology and equipment for facility agriculture [J]. China Agricultural Information, 2024, 36(2): 47—59.

[3] 丁亚会, 张云鹤, 孙宁, 等. 我国设施农业发展的国际经验与启示[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(16): 1—8.
DING Yahui, ZHANG Yunhe, SUN Ning, et al. International experience and enlightenment on development of China's facility agriculture [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2023, 51(16): 1—8.

[4] 孙秋菊, 秦洪卫. 加快推动我国设施农业发展对策研究[J]. 中国农民合作社, 2024(7): 49—50.

[5] 农业农村部. 农业农村部关于加快推进设施种植机械化发展的意见[EB/OL]. (2020—06—27)[2025—03—01].

https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020－06/30/content_5522757.htm.

[6] 新华社. 中共中央 国务院关于做好2023年全面推进乡村振兴重点工作的意见[EB/OL]. (2023－02－13)[2025－03－01]. https://www.gov.cn/zhengce/2023－02/13/content_5741370.htm.

[7] 农业农村部，国家发展改革委，财政部，等. 全国现代设施农业建设规划[EB/OL]. (2023－06－09)[2025－03－01]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202306/content_6887551.htm.

[8] 内蒙古自治区人民政府. 内蒙古自治区“十四五”推进农牧业农村牧区现代化发展规划[EB/OL]. (2021－12－31)[2025－03－01]. https://www.nmg.gov.cn/ztzl/sswghjh/zxgh/nmls/202204/t20220418_2040496.html.

[9] 内蒙古自治区农牧厅. 内蒙古数字农牧业农村牧区发展规划(2023－2025)[EB/OL]. (2020－01－10)[2025－03－01]. https://nmt.nmg.gov.cn/gk/zfxxgk/fdzdgknr/ghjh/202311/t20231109_2408010.html.

[10] 唐世文，何晓莹. 迪庆州高寒藏区日光温室蔬菜生产现状及发展对策[J]. 农业科技通讯，2019(1)：137－139.

[11] 宋成宝. 日光温室温湿度耦合异布规律及主动通风排湿策略研究[D]. 泰安：山东农业大学，2024.
SONG Chengbao. Research on the coupling heterogeneous distribution of temperature and humidity and dehumidification strategy based on active ventilation in solar greenhouse [D]. Tai′an: Shandong Agricultural University, 2024.

[12] 王振. 严寒地区日光温室结构参数的优化设计[D]. 长春：吉林农业大学，2022.
WANG Zhen. Optimization design of structural parameters of solar greenhouse in cold region [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2022.

[13] 拉巴，格桑卓玛. 高原温室大棚的气候条件分析[J]. 西藏科技，2020(1)：47－48，59.

[14] 吕欢欢，牛源艺，韩雨晓，等. 日光温室作物冠层夏季光照强度与空气温湿度时空变化规律研究[J]. 农业机械学报，2024，55(5)：368－378.
LÜ Huanhuan, NIU Yuanyi, HAN Yuxiao, et al. Spatiotemporal variation of crop-canopy light intensity and air temperature and humidity in summer solar greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(5): 368－378.

[15] 杨定伟. 不同墙体结构主动蓄热日光温室的热湿性能分析[D]. 杨凌：西北农林科技大学，2023.
YANG Dingwei. Different wall structures actively store heat and humidity of solar greenhouse performance analysis [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2023.

[16] 邹豪，王晨曦，余佳琦，等. 炎热气候下基于光谱管理和辐射制冷的温室薄膜材料(英文)[J]. 科学通报，2023，68(14)：1493－1496.
ZOU Hao, WANG Chenxi, YU Jiaqi, et al. Solar spectrum management and radiative cooling film for sustainable greenhouse production in hot climates [J]. Science Bulletin, 2023, 68(14): 1493－1496.

[17] 程丽，张国辉，杨帅，等. 高寒地区冬季不同类型日光温室内环境的比较[J]. 北方园艺，2023(12)：44－50.
CHENG Li, ZHANG Guohui, YANG Shuai, et al. Comparative analysis of internal environment of different types of solar greenhouses in winter in alpine regions [J]. Northern Horticulture, 2023(12): 44－50.

[18] 叶新华，钟军，魏玉强，等. 阿克苏地区两种不同结构日光温室冬季保温性能研究[J]. 新疆农业科技，2023(5)：39－41.

[19] 陆清清. 内遮阳保温幕在冬夏季对温室内部环境影响的研究[D]. 上海：东华大学，2022.
LU Qingqing. Study on the effect of internal thermal screens on the internal environment of greenhouse in winter and summer [D]. Shanghai: Donghua University, 2022.

[20] 李乐乐，钞锦龙，杨朔，等. 不同光照强度对温室大棚温湿环境的影响[J]. 浙江农业科学，2022，63(3)：517－523.
LI Lele, CHAO Jinlong, YANG Shuo, et al. Effect of light intensity on temperature and humidity of greenhouse [J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2022, 63(3): 517－523.

[21] 胡怡文. 不同覆盖材料对玻璃温室温度场和辐射场的影响研究[D]. 成都：四川农业大学，2023.
HU Yiwen. A study on the effects of different covering materials on the temperature field and radiation field of glass greenhouses [D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2023.

[22] 李文科，陈辰，李楠，等. 不同天气状况下日光温室气温与外界气象条件定量关系[J]. 湖北农业科学，2021，60(15)：65－68，140.
LI Wenke, CHEN Chen, LI Nan, et al. The relationships between inside and outside temperature of solar greenhouse under different weather conditions [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2021, 60(15): 65－68, 140.

[23] 乐章燕，石茗化，魏渠成，等. 大长度日光温室东西方向的温度变化特征[J]. 贵州农业科学，2022，50(8)：94－102.
LE Zhangyan, SHI Minghua, WEI Qucheng, et al. Temperature variation characteristics in east-west direction of solar greenhouse with large length [J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2022, 50(8): 94－102.

[24] 顾金寿，杨林艳，柴云娥，等. 双膜日光温室春季室内环境试验研究[J]. 智慧农业导刊，2024，4(10)：55－58.

[25] 焦勇翔. 温室土壤温度动态变化规律及其对热环境影响

研究[D]. 北京：北京工业大学，2024.
JIAO Yongxiang. Study on the dynamic change pattern of greenhouse soil temperature and its impact in thermal environment [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2024.
[26] 刘叶瑞，刘孝敏，柴云娥，等. 寒冷气候区双膜日光温室室内环境因子试验研究[J]. 甘肃科学学报，2023，35(3)：54－60.
LIU Yerui, LIU Xiaomin, CHAI Yue'e, et al. Experimental study on indoor environmental factors of double-film solar greenhouse in cold region [J]. Journal of Gansu Sciences, 2023, 35(3): 54－60.
[27] 邱威，邬伊浩，周慧能，等. 温室风幕式施药装置设计与试验[J]. 南京农业大学学报，2023，46(2)：405－415.
QIU Wei, WU Yihao, ZHOU Huineng, et al. Design and test of greenhouse air curtain spraying device [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2023, 46(2): 405－415.
[28] 王琛，马业，李伟，等. 基于物联网技术的大蒜冷库温湿度监测系统设计[J]. 智能化农业装备学报(中英文)，2022，3(1)：37－45.
WANG Chen, MA Ye, LI Wei, et al. Design of monitoring system for temperature and humidity of garlic cold storage based on the Internet of Things technology [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization (in Chinese and English), 2022, 3(1): 37－45.
[29] 张彩虹，王国强，姜鲁艳，等. 低能耗组装式深冬生产型日光温室环境因子变化及番茄性状分析[J]. 新疆农业科学，2024，61(8)：2043－2053.
ZHANG Caihong, WANG Guoqiang, JIANG Luyan, et al. Variation of environmental factors and analysis of tomato traits in low-energy assembly-type deep-winter production solar greenhouse [J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2024, 61(8): 2043－2053.

Experimental study on the indoor heat and humidity environment of a double-film solar greenhouse in severe cold weather

WANG Weiming[1], TA Na[1*], LIU Kunyu[2], ZHEN Qi[1, 3]

(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot* 010018, *China*; 2. *Institute of Grassland Research of the Chinese Academy of Agricultural Sciences, Hohhot* 010010, *China*; 3. *College of Energy and Transportation Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot* 010018, *China*)

Abstract: With the continuous advancement of facility agriculture, the application of solar greenhouses in northern China is becoming increasingly popular, and double-film solar greenhouses, as an effective agricultural facility, have significantly improved the crop growth environment. This study focuses on double-layered film solar greenhouses in cold and arid northern regions under frigid weather conditions. January 21st and 22nd, the two days with the lowest average temperatures in January 2024, were taken as the research object, and the thermal insulation performance of the greenhouse and the temporal and spatial variation of the internal thermal and humid environment under severe cold weather conditions were discussed through the analysis of its internal thermal and humid environment. The study shows that the double-film solar greenhouse can maintain a relatively stable indoor temperature and humidity in the severe cold weather after heavy snowfall, which greatly improves the growth environment of winter crops. The internal temperature of the double-film solar greenhouse showed three stages, including the heating stage accompanied by the rising sun, the rapid cooling stage after noon, and the slow cooling stage at night. The warming phase accompanied by the rise of the sun gradually decreased from east to west along the east-west length direction, from south to north along the north-south span direction, and gradually decreased from high to low along the vertical height direction. In the slow cooling stage after noon, the temperature gradually decreased from west to east along the east-west length direction, from north to south along the north-south span direction, and gradually decreased from low to high along the vertical height direction. Relative humidity also showed a three-stage periodic variation law, and the specific change was negatively correlated with the temperature variation law. The spatial distribution of soil temperature decreasing from the middle to the east and west along the length direction also showed a decreasing spatial distribution. The

span direction decreased from the middle to the north and south, and the temperature of the north wall area was higher than that of the southern front foot. In the vertical direction, the temperature fluctuation decreased with the increase of depth, indicating that the underlying soil had stronger thermal stability. The results show that the double-film solar greenhouse can also keep the planting area not lower than 3.61 ℃ in extreme weather, and the stable cultivation conditions of the ambient temperature of the planting area higher than 5 ℃ in winter. The results of this study further reveal the characteristics of the hot and humid environment of the double-film solar greenhouse under severe cold weather conditions, and provide a scientific basis and data support for the precise regulation of environmental factors in the greenhouse.

Keywords: facility agriculture; severe cold weather; double-film solar greenhouse; hot and humid environment; environmental factors

Foundation items: Inner Mongolia Autonomous Region Graduate Research and Innovation Project (KC2024038B); Inner Mongolia Natural Science Foundation Project (2024QN03058、2022MS03040); First-class Discipline Research Project (YLXKZX-NND-009)

First Author: WANG Weiming, E-mail: wwmnmgnydx@163.com

* **Correspondence Author:** TA Na, E-mail: jdtana@163.com