

河南香菇主产区大棚温度调控能力分析

吴杰, 孔维丽

(河南省农业科学院食用菌研究所·农业农村部黄淮海食用菌种质资源评价与利用重点实验室 郑州 450002)

摘要: 大棚是香菇生长发育的主要场所, 评价不同大棚温度调控能力, 为香菇产区大棚建设提供参考。以河南卢氏县、西峡县、原阳县的常用香菇大棚为样本, 采集棚内外温度数据, 以香菇菌棒生长和出菇两个时期所需温度条件为依据, 比较不同气象条件下大棚温度变化趋势及调控能力。3个地区选取6—8月为高温时段, 12至翌年2月为低温时段。高温时段中, 简易大棚对高温天气的日最高温度不具备降温能力, 棚内温度会升高0.2~2.3℃; 而简易标准型大棚、小型连栋温室、双网双膜拱形大棚、温室大棚分别具备1.8~5.0℃、5.0~8.3℃、3.2~7.9℃、3.0~7.4℃的降温能力; 在低温时段, 简易大棚、简易标准型大棚、小型连栋温室、双网双膜拱形大棚、温室大棚对低温天气的日最低温度分别具备2.5~4.2℃、3.0~5.6℃、6.2~9.8℃、4.5~10.1℃、5.6~9.8℃的升温能力和0.6~0.9℃、2.2~3.7℃、3.4~6.9℃、8.9~14.1℃和8.3~13.0℃的保温能力。不同类型的香菇大棚对温度的调控能力有所差别, 种植户应根据当地环境, 选择合适的香菇大棚, 减少因大棚控温能力不足而造成的经济损失。

关键词: 香菇; 大棚; 温度; 调控

中图分类号: S646.1¹²

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2025)06-068-16

Analysis of temperature control capacity in greenhouse in the main production areas of *Lentinula edodes* in Henan

WU Jie, KONG Weili

(Institute of Edible Fungi, Henan Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Germplasm Resource Evaluation and Utilization of Edible Fungi in the Huang-Huai-Hai Region, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Zhengzhou 450002, Henan, China)

Abstract: Greenhouse is the main place for the growth and development of *Lentinula edodes*. Evaluating the temperature regulation ability of different greenhouses can provide reference for the construction of greenhouse in *L. edodes* production areas. Taking commonly used *L. edodes* greenhouses from Lushi county, Xixia county and Yuanyang county in Henan as samples, temperature data from inside and outside the greenhouse were collected. Based on the temperature conditions required for *L. edodes* mycelium growth and fruiting, the temperature variation trends and regulation capacities of the greenhouse under different meteorological conditions were compared. These three regions selected June to August as the high-temperature period, and December to February as the low-temperature period. During the high-temperature period, the simple greenhouse showed no cooling capacity for daily maximum temperature under high-temperature conditions, with an internal temperature increase of 0.2 to 2.3 °C. The simple standard greenhouse, small linkage greenhouse, double-net double-film arched greenhouse, and greenhouse had cooling capacities of 1.8- 5.0 °C, 5.0-8.3 °C, 3.2-7.9 °C, and 3.0-7.4 °C, respectively. During the low-temperature period, the corresponding heating capacities for these greenhouses were 2.5-4.2 °C, 3.0-5.6 °C, 6.2-9.8 °C, 4.5-10.1 °C, and 5.6-9.8 °C, as well as the heat retention capacities of 0.6-0.9 °C, 2.2-3.7 °C, 3.4-6.9 °C, 8.9-14.1 °C, and 8.3-13.0 °C, respectively. Different types of *L. edodes* greenhouse exhibit varying temperature regulation capacities. Growers should choose appropriate greenhouse type based on the local environment to reduce economic losses caused by insufficient temperature control.

Key words: *Lentinula edodes*; Greenhouse; Temperature; Regulation

收稿日期: 2024-12-16; 修回日期: 2025-04-03

基金项目: 河南省现代农业产业技术体系(HARS-22-08-S, HARS-22-08G1)

作者简介: 吴杰, 男, 硕士, 主要从事食用菌育种等研究工作。E-mail: 884690543@qq.com

通信作者: 孔维丽, 女, 研究员, 主要从事食用菌育种等研究工作。E-mail: kongweili2005@126.com

香菇(*Lentinula edodes*)又名香信、香蕈、花菇等,属于木腐型真菌,因其独特的香味和营养价值而闻名^[1-2]。随着人们对健康饮食的重视,香菇的消费需求持续增长^[3]。据中国食用菌协会统计,2023年国内香菇产量1 303.75万t,占总体食用菌产量的31.2%,位列第一。2023年河南省食用菌产量居全国第一,达到630.08万t,产值474.12亿元,其中香菇430.8万t,占68.39%,成为山区农民增收的重要手段^[4]。

河南是香菇生产大省,主产区分布在伏牛山区的卢氏、西峡等县^[5-7]。卢氏、西峡两县香菇种植分布在海拔100~1500m。香菇种植需经历较长的发菌期、后熟期、转色期、催蕾期和出菇期等,大棚是香菇生长发育的主要场所,调控大棚内栽培环境的温度、空气相对湿度、通风量和基质含水量,才能达到优质、高产和高效的目的。河南香菇栽培模式有春栽、夏栽和秋栽。春栽香菇是河南主要的香菇栽培茬口,占比七成以上,采取1~3月制棒,4~5月转色,6~8月越夏,10月至翌年4月出菇。近年来,随着全球气温升高,夏季极端高温现象频发,导致越夏香菇菌棒“烧菌”烂棒率最高达10%,菇农损失惨重^[8-10]。香菇菌丝的生长对温度非常敏感,研究表明,高温可抑制菌丝的生长,特别是当温度超过30℃时,菌丝生长受到显著抑制,超过36℃则会导致菌丝死亡^[11]。香菇菌丝的耐热性因菌株而异,因此在高温季节,合理的温度控制措施显得尤为重要。在发菌期内,当棚内温度低于5℃时,接种后的菌棒菌穴不萌发。出菇时,棚内平均温度低于2℃,最高温度高于28℃,都会造成香菇菌棒不出菇或者出菇品质较差。通过对伏牛山区香菇种植户的调查发现,生产中香菇大棚种类繁多,其中简易型大棚占比24.7%,简易标准型大棚占比38.2%,拱形大棚占比34.1%,小型连栋温室型大棚占比2%,其他棚型占比1%。

食用菌生长发育不需要光合作用,因此大棚的建设与蔬菜大棚并不完全相同,食用菌大棚的设计要求及技术参数相关研究较少,对各类型大棚对高温和低温时段的调控能力鲜有评价,但其重要性不容忽视。比如部分种植户对菇棚调控能力认识不足,导致搭建的大棚无法适应当地气候条件变化,影响菌棒、菌丝的生长及出菇,造成经济损失。因此,迫切需要开展现有大棚类型的调查及温度调控能力评价,为后期大棚建设及棚型的选择提供依据。

笔者以河南省不同地区、不同类型的香菇大棚为研究对象,重点分析简易型大棚、简易标准型大棚、双网双膜拱形大棚、温室大棚、小型连栋温室大棚在高温和低温时段的棚内外温度变化,比较其温度调控能力。旨在系统评估现有香菇大棚在极端气候条件下的性能表现,填补当前设施栽培研究在棚型环境适应性方面的空白,从而帮助种植户因地制宜地选择和改造棚型结构,促进香菇产业高效、稳定发展。

1 材料和方法

1.1 材料

研究对象为位于原阳县河南现代农业研究开发基地的双网双膜拱形大棚和温室大棚;卢氏县朱阳关镇的简易标准型大棚、狮子坪乡的简易型大棚;西峡县重阳镇的小型连栋温室大棚。具体参数如下。

简易型大棚:大棚长根据场地10~30m、宽5.5m、高2.7m,使用竹木搭建成拱形骨架,拱形骨架上方覆盖一层黑色遮阳网,大棚外围插入4.5m的立柱,立柱上方加盖一层遮阳网。

简易标准型大棚:单个棚长30m,宽6m,高2.8m,使用镀锌钢管作为拱形骨架,棚顶安装喷淋装置,一般10个棚栋为一跨,2~3跨为基地,基地四周为4.5m的立柱,夏季立柱加盖2层遮阳网,冬季单个棚顶覆盖双层塑料薄膜。

小型连栋温室:长30m,宽15m,高5.5m,使用镀锌钢管作为拱形骨架,棚顶双层覆盖0.12~0.2mm的聚乙烯薄膜,棚内安装喷灌头,大棚外层安装可卷动的保温幕布,幕布下方加盖一层黑色遮阳网。大棚内部设有温度感应器,可随时记录棚内温度,大棚底部铺设沙石,能够保存喷淋设备的水分,在夏季达到很好的降温效果。

双网双膜拱形大棚:长30m,宽8m,高3.3m,使用热镀锌圆管作为骨架,大棚薄膜使用0.08~0.12mm的聚乙烯薄膜,顶膜双层覆盖,顶膜外围加盖一层PEP黑白膜保温层,裙膜的下端埋入土中深约10cm,顶膜的下端在裙膜的外侧,与裙膜重叠40cm。外层薄膜上覆盖防雨复合保温被,电动开启,棚内安装涡流雾化微喷头。

温室大棚:长40m、宽8.5m、高4.5m,使用热镀锌椭圆钢管间距1m搭建拱形骨架,大棚温室前坡覆盖10丝PO农膜,后坡及风口膜采用15丝抗老化编织膜,膜上加盖一层EVA无滴流消雾膜,顶

层覆盖防雨复合保温被,电动开启。大棚前坡及顶部开有 1200 mm 宽通风口,前坡通风口覆盖 40 目防虫网,顶坡布置防雨托水钢丝网。

1.2 方法

由河南省气象局提供原阳县、卢氏县、西峡县 2023 年 5 月至 2024 年 4 月的温度数据,确定一年时间内的高温时间段和低温时间段。在高温时间段内,日最高温度 35 °C 以上定义为高温天气;在低温时间段内,以日平均温度低于 5 °C 为低温天气。通过对比 2 个时间段的棚内外温度数据,确定大棚升温区间和降温区间以及降温和抗寒的能力。各类型大棚内安装环境监控仪器,仪器每间隔 1 h 记录棚内温度并存储,温度数据由河南省气象研究所提供。

1.3 数据分析

采用 Microsoft Excel 2019 软件进行数据整理并绘图。

2 结果与分析

2.1 三个地区一年中的月平均温度变化趋势

2023 年 5 月至 2024 年 4 月的 3 个地区月平均温度结果见表 1,一年中 6—8 月平均温度较高,确定为高温时间段;12 月至翌年 2 月平均温度较低,确定为低温时间段。该结果与历史记载的黄河流域温度变化相吻合^[12]。

2.2 高温时间段棚内外温度相对变化

2.2.1 简易型大棚 简易型大棚的棚内外月平均温度及日最高温度对比分析的结果如图 1-A 所

表 1 3 个地区一年中每月的平均温度

Table 1 Average temperature for each month of the year in three areas

地区 Area	2023								2024			
	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4
原阳县 Yuanyang county	20.88	27.19	28.54	26.66	23.24	18.71	8.90	0.60	0.80	2.85	11.18	17.73
卢氏县 Lushi county	22.43	24.15	27.46	26.77	22.46	17.01	10.35	4.10	4.45	5.04	12.19	18.64
西峡县 Xixia county	20.02	24.09	27.41	26.61	22.63	16.16	9.37	3.06	2.73	2.96	11.66	18.28

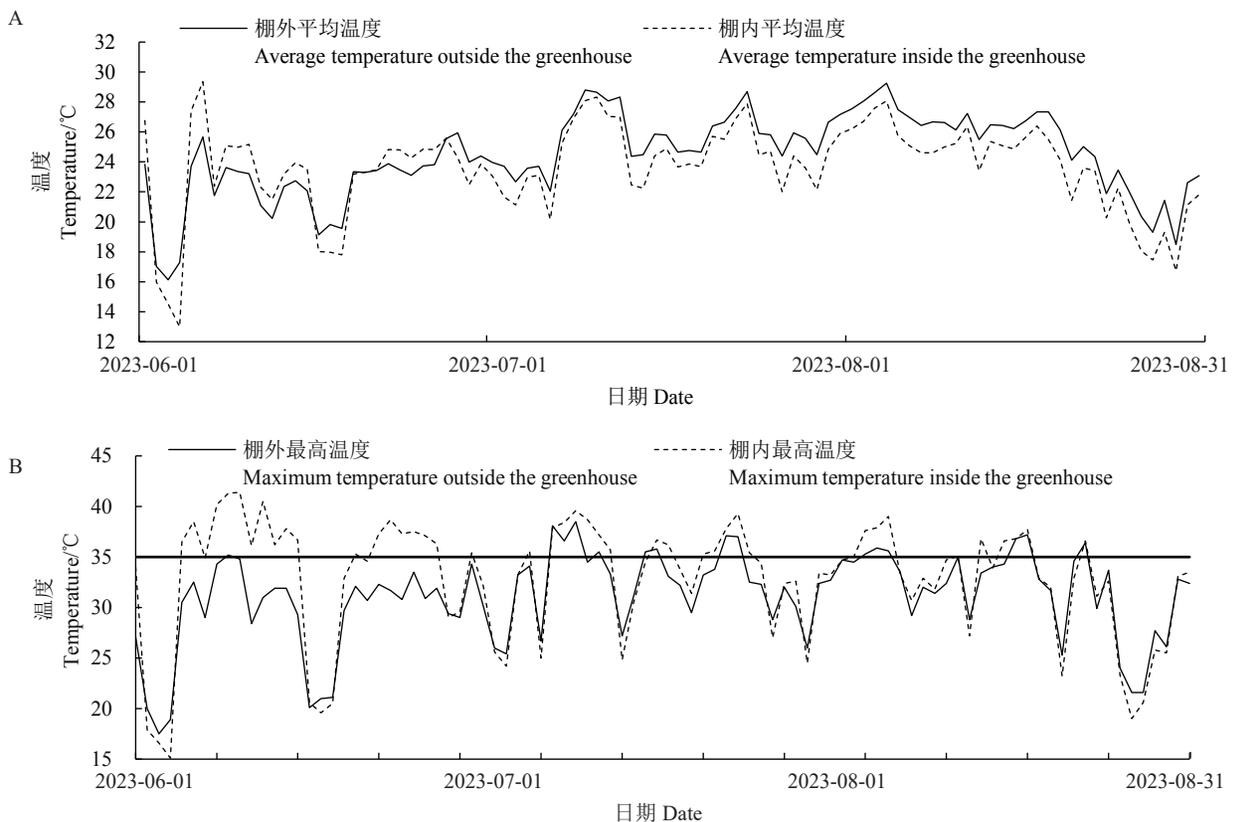


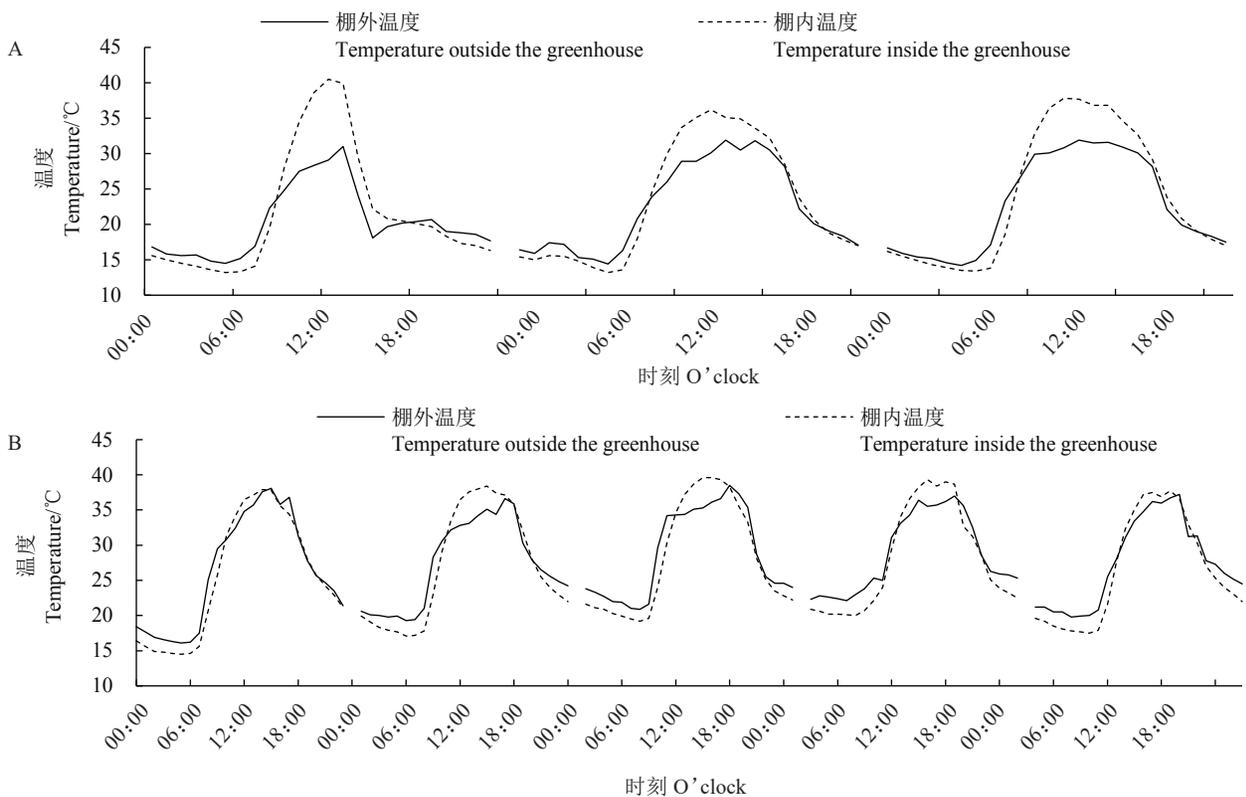
图 1 简易型大棚 6—8 月棚内外温度变化

Fig. 1 Temperature variation inside and outside the simple greenhouse from June to August

示。6月份简易型大棚的棚内外平均温度差异较为明显,棚内温度未能有效缓冲外界气温变化,高温时更热,低温时更冷,反映出该类大棚在该时期对外部环境的响应性较强,缺乏有效的保温或隔热能力。当棚外平均气温低于20℃时,才偶有棚内平均气温低于外界的情况发生,显示出其在温和气候下的缓冲调控能力相对较弱。随着夏季高温的到来,7—8月期间棚外平均气温明显升高,简易型大棚内的平均温度虽整体较外界略低,但仍处于较高水平,温差维持在0.5~2℃,表明此类大棚具备一定的降温效果。然而,这一降温能力有限,难以完全抵御持续性高温对香菇菌丝生长的不利影响。进一步分析日最高温度变化(图1-B)可以发现,从6月份开始,棚内便频繁出现高温现象,且持续时间较长。当棚外日最高气温达到30℃时,棚内温度常常超过35℃,显著高于菌丝适宜生长温度上限,极易造成“烧菌”等热害风险。尤其在7—8月期间,尽管棚内外的日最高温度差异相对缩小,但整体仍以棚内高于棚外为主,当棚外日最高气温达到35℃时,棚内温度可进一步升高,形成更为严峻的

热环境。经统计分析,6—8月期间棚外日最高温度超过35℃的时间共14d,而棚内达到或超过该温度的时间则多达42d,为棚外的3倍。

为分析狮子坪简易大棚在6月期间棚内外日最高温度差异较大的特殊情况,从中选取了3d棚外日最高温度分别为31.0℃、31.9℃和31.9℃的全天24h监测数据进行分析,对棚内外温度变化进行了对比(图2-A)。结果显示,在所选的3d中,棚内最高温度均超过35℃,且在10:00—17:00时间段内,棚内外温差明显增大。该时段恰为日间气温最高的时段,表明简易大棚在高温时段的蓄热效应明显。由于简易型大棚结构相对简单,仅在香菇架上覆盖黑色遮阳网,极易吸热,加之缺乏自动喷淋降温系统,降温主要依赖人工洒水及掀开遮阳网通风,降温效率有限。具体来看,3d中棚外达到日最高温度的时间分别为13:00、14:00和13:00,而棚内则分别在12:00、13:00和12:00达到最高温度,均较棚外提前约1h。此现象表明种植户虽然已提前采取一定的降温措施,但由于响应时效不足或措施效果有限,仍导致棚内温度迅速上升且持续偏高。



注:A.选取3d棚外日最高温度为30~32℃;B.选取5d高温天气。

Note: A. Three days selected with the outdoor daily maximum temperatures ranging from 30 to 32℃; B. Select 5 days of high temperature weather.

图2 高温时间段简易型大棚的棚内外温度24h逐时监测结果

Fig. 2 Hourly monitoring results of the indoor and outdoor temperatures of the simple-type greenhouse during the high-temperature period

从5 d 棚外日最高温度 35 °C 高温样本中可以看出(图 2-B),棚外在每日凌晨 04:00—06:00 达到当天最低温度,温度范围为 16.1~22.1 °C。棚内当天最低温度通常出现在 05:00—06:00,较棚外延迟 0~2 h,温度范围为 14.5~20 °C。棚内的日最低温度低于棚外,温差在 1.6~2.1 °C 之间。开始升温后,棚外温度在 15:00—16:00 之间达到当日最高值,温度范围为 37~38.5 °C。棚内温度在 13:00—15:00 达到最高温值,比棚外最高温度提前 1~3 h,温度范围为 37.7~39.6 °C。除个别时段外,棚内的日最高温度通常高于棚外,温差在 0.2~2.3 °C。与 6 月选取的 3 d 数据相比,该 5 d 高温样本中棚内外最高温度差异明显减小,说明种植户的降温措施在一定程度上实现了响应,但受限于简易大棚结构及设施条件,降温效果依然有限,未能有效抑制棚内温度快速升高的趋势。

2.2.2 简易标准型大棚 6—8 月简易标准型大棚的棚内外平均温度和最高温度结果见图 3。由图 3-A 可见,该地区的高温天气主要集中在 7 月中旬至 8 月中旬,为夏季高温的主要时段。在平均温度方面,当棚外气温低于 28 °C 时,棚内外平均温度基

本保持同步变化,温差较小,说明大棚对外界温度变化的响应较为直接,隔热能力有限。然而,当棚外平均温度超过 28 °C 后,棚内温度表现出一定的稳定性,基本维持在 28 °C 左右,表明大棚具备一定的高温缓冲作用。此时,棚内外平均温度差在 0.81~3.14 °C,显示出简易标准型大棚在高温环境下具有初步的降温能力,有助于缓解高温对香菇菌丝生长的抑制影响。从图 3-B 中可进一步观察到,棚内外日最高温度的变化趋势。在整个 6—8 月期间,棚外日最高温度达到或超过 35 °C 的时间为 26 d,而棚内仅有 7 d 出现超过 35 °C 的情况,表明简易标准型大棚在极端高温天气下具备一定的高温抑制能力。值得注意的是,在这 7 d 中,棚外的最高气温几乎均超过 37 °C,而棚内温度未再继续升高,说明 37 °C 可能是该类大棚所能实现的棚内温度调控极限。

从 5 个日最高气温超过 35 °C 的高温样本中可见(图 4),棚外日最低气温通常出现在凌晨 04:00—06:00,温度范围为 18.2~25.2 °C。棚内在相同时间段达到最低温度,温度范围为 18.4~25 °C,棚内外最低温度的温差仅为 0.2~1.2 °C。开始升温后,棚外在 15:00—17:00 达到当日最高温度,温度

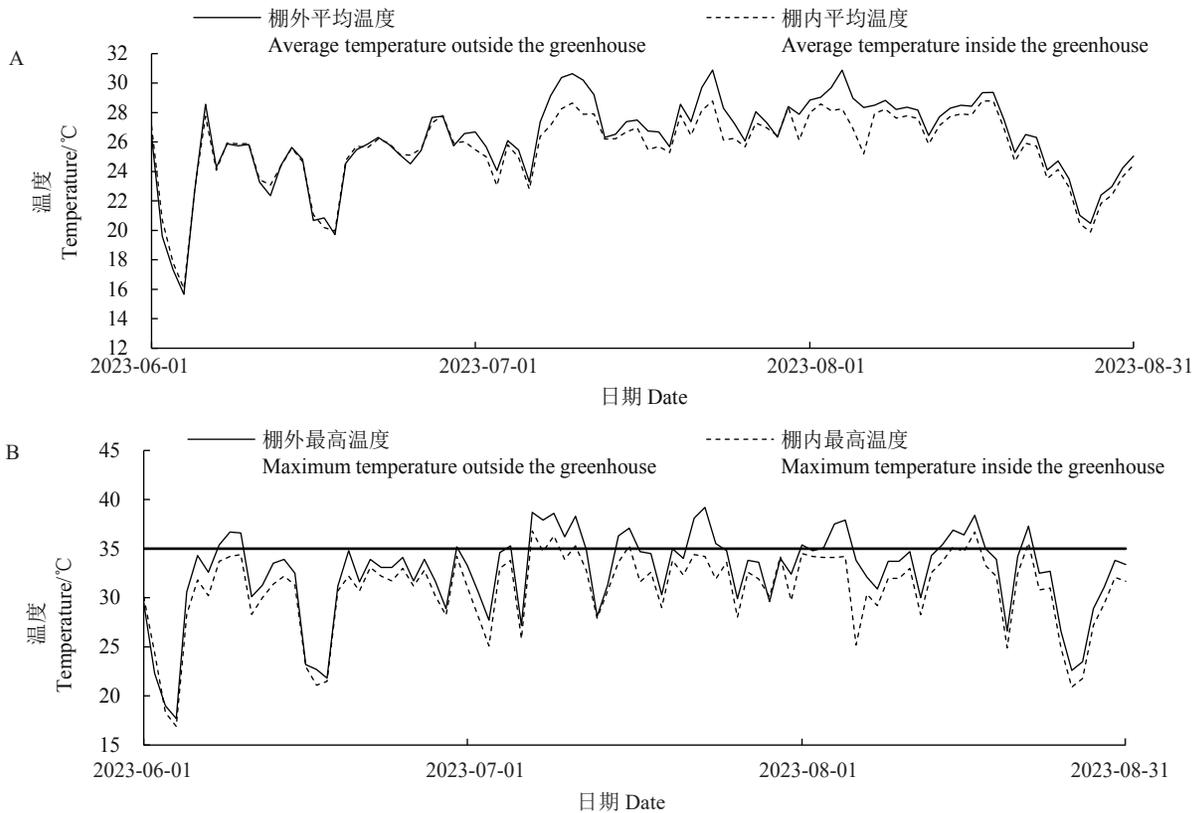


图 3 简易标准型大棚 6—8 月棚内外温度变化

Fig. 3 Temperature variation inside and outside the simple standard greenhouse from June to August

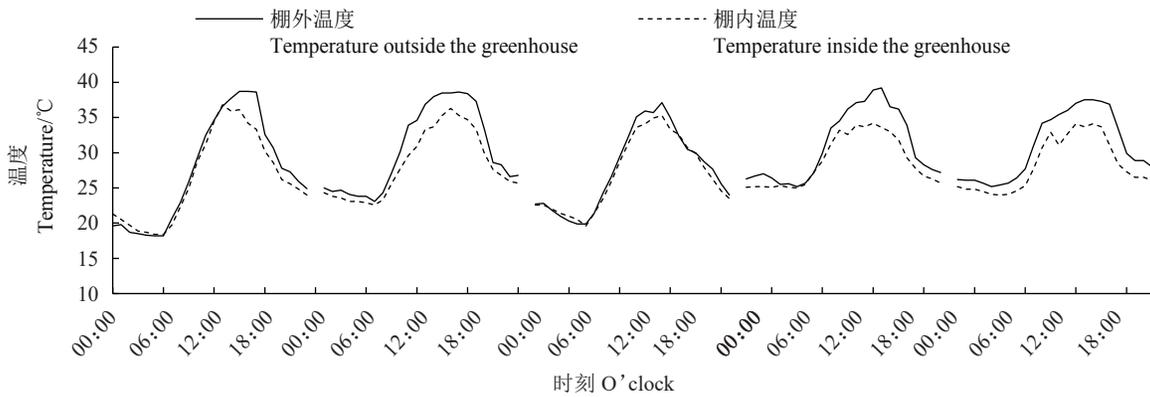


图4 简易标准型大棚5d高温天气的棚内外温度24h逐时监测结果

Fig. 4 The 24-hour hourly temperature monitoring results inside and outside the simple standard greenhouse during 5 days of high temperature weather

为37.1~39.2℃。相比之下,棚内在13:00—16:00达到最高温度,比棚外提前0~2h,温度范围为34.2~36.8℃。棚内日最高温度在5个样本中均低于棚外,且两者温差范围为1.8~5.0℃,显示出该类型大棚在高温环境下具有一定的降温调控能力。

2.2.3 小型连栋温室 6—8月小型连栋温室的棚内外平均温度和最高温度结果见图5。从图5-A可以看出,整个6—8月期间,棚外平均气温始终高于

棚内,且两者之间的平均温差维持在1.5~3.6℃之间,最大日平均温差可达3.6℃,表明小型连栋温室在持续性高温环境下具有稳定的降温能力。与简易型或简易标准型大棚相比,该温室大棚在日间强辐射影响下能够更有效地隔绝外界热量传导,维持较低的棚内温度。如图5-B所示,7月份为全年最热时段,棚外日最高气温一度升至43.50℃,为监测期内的极端高温值。在7月中旬,还出现了连续

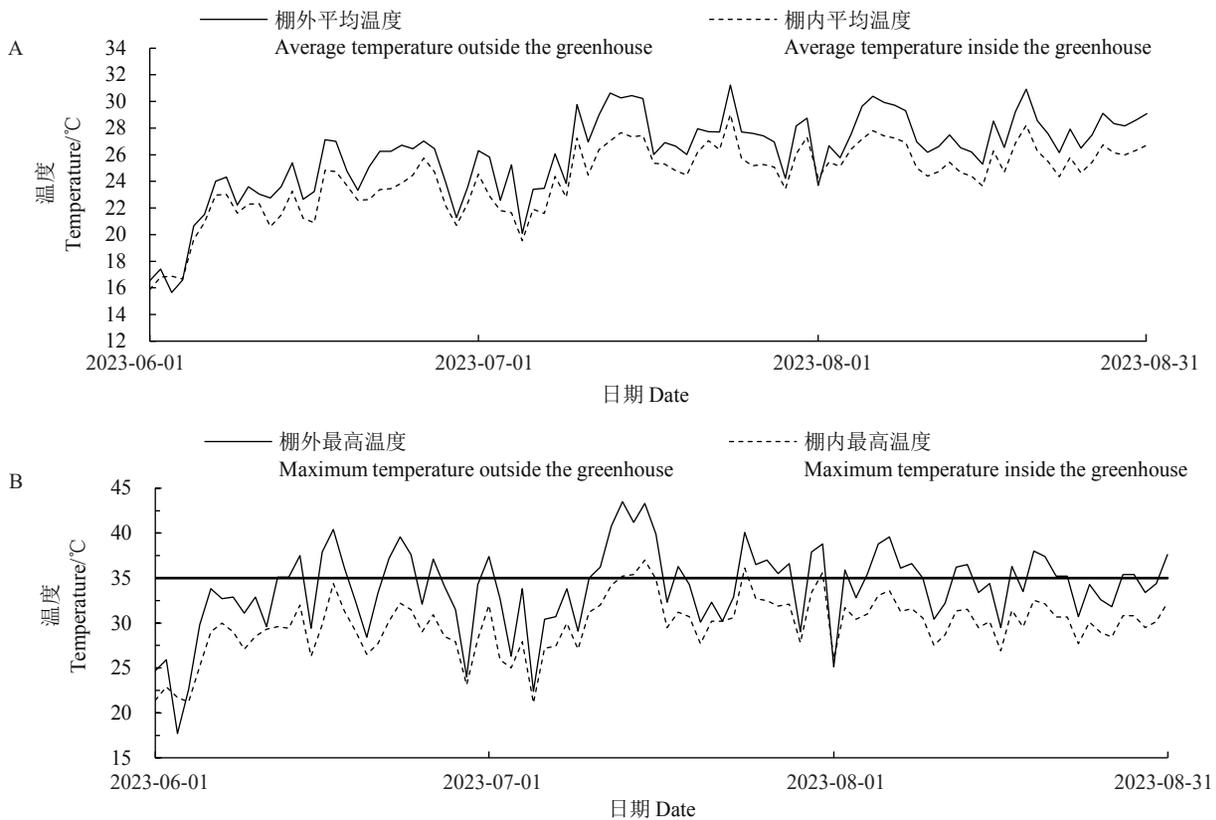


图5 小型连栋温室6—8月棚内外温度变化

Fig. 5 Temperature variation inside and outside the small linked greenhouse from June to August

4 d 棚外温度超过 40 °C 的极端热浪过程,显示出外部气候对香菇栽培构成严重威胁。整个 6—8 月期间,棚外出现日最高温度大于 35 °C 的高温天气共 41 d,而棚内高温时间仅为 5 d,大棚明显缓解了高温影响。此外,棚内外日最高温度的最大差值达到 8.3 °C,进一步说明小型连栋温室在高温条件下的降温能力。

从 5 个日最高气温超过 35 °C 的高温样本(图 6)进行分析发现,棚外最低气温均出现在 06:00,温度范围为 20.7~23.1 °C。棚内最低气温与棚外出现时间一致,温度范围为 19.4~21.8 °C。棚内日最低

温度低于棚外,温差在 1.3~1.8 °C。开始升温后,棚外在 15:00—17:00 达到当日最高温度,温度为 39.9~43.5 °C。棚内日最高温度也在 15:00—17:00,但温度相对较低,仅为 34.2~37.0 °C,与棚外相比存在 5.0~8.3 °C 的温差。

2.2.4 双网双膜拱形大棚 6—8 月双网双膜拱形大棚的棚内外平均温度和最高温度变化结果见图 7。从图 7-A 可以看出,6 月初至 7 月中旬为棚外气温的主要高峰期,此阶段外界平均温度和最高温度波动明显,且持续处于较高水平。与之相比,大棚内部的平均温度与最高温度始终明显低于棚外,表

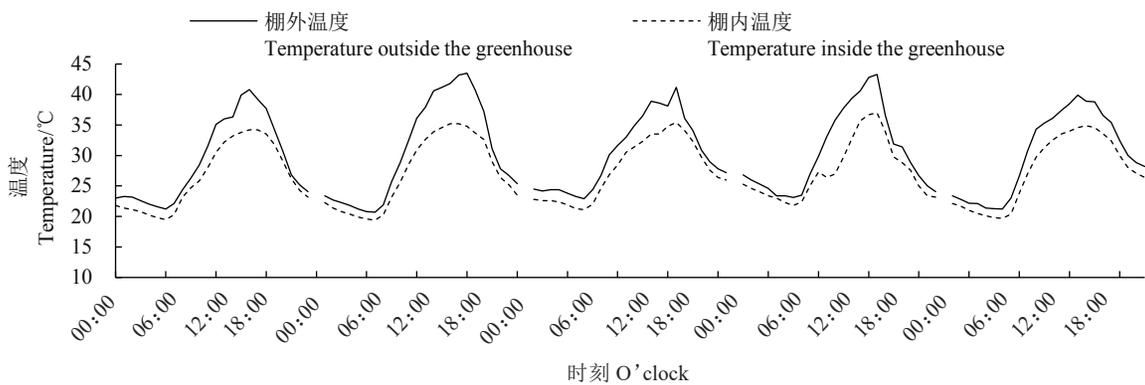


图 6 小型连栋温室 5 d 高温天气的棚内外温度 24 h 逐时监测结果

Fig. 6 The 24h hourly temperature monitoring results inside and outside the small linked greenhouse during 5 days of high temperature weather

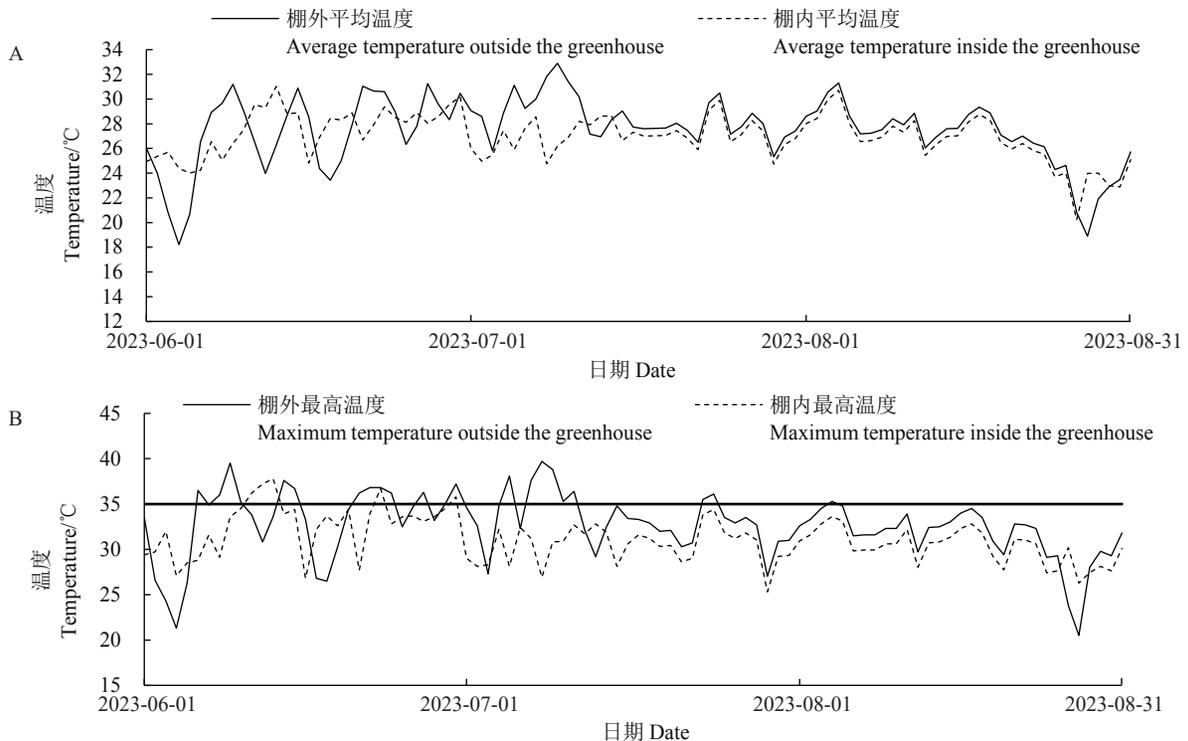


图 7 双网双膜拱形大棚 6—8 月棚内外温度变化

Fig. 7 Temperature variation inside and outside the double-net double-membrane arch greenhouse from June to August

明该类大棚在强辐射和高温胁迫下具备较好的隔热与降温能力。进入7月中旬至8月以后,外界气温逐渐下降,高温天气出现频率减少。在此期间,棚内外温度变化趋势趋于一致,呈现出较强的同步性,但棚内温度水平仍普遍低于棚外。从高温时间统计结果来看,6—8月期间棚外日最高温度超过35℃的时间为24 d,而棚内对应的高温时间仅为5 d,大幅减少了香菇菌丝遭受热害的风险。这表明双网双膜拱形大棚在高温环境下具有较强的缓冲与调控能力,能够有效延迟和削弱外界热量对棚内的直接影响。此外,从图7-A和7-B可观察到,

在6月4日和8月27日两个时间节点,棚外温度出现明显下降。与之对应,棚内温度则变化平缓,波动幅度较小,呈现出良好的温度稳定性。

从5个日最高气温超过35℃的高温样本中(图8)可以看出,棚外日最低气温出现在05:00—06:00之间,温度范围为16.8~24.1℃。棚内最低气温出现在相同时间段,温度为19.9~25.5℃。在前4 d样本中,棚内最低气温均高于棚外,温差为2.1~6.4℃;而在最后一天,棚内最低气温低于棚外,温差为1.6℃。随着气温升高,棚外在15:00—16:00达到当日最高温度,温度范围为36.2~37.6℃。棚

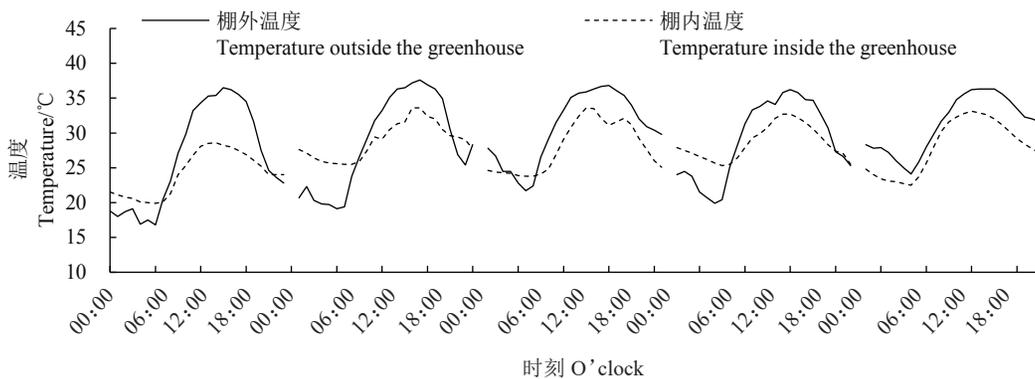


图8 双网双膜拱形大棚5 d高温天气的棚内外温度24 h逐时监测结果

Fig. 8 The 24 h hourly temperature monitoring results inside and outside the double-net double-membrane arch greenhouse during 5 days of high temperature weather

内最高气温出现在13:00—15:00之间,比棚外提前0~3 h,温度范围为28.6~33.6℃,棚内日最高温度低于棚外,温差在3.2~7.9℃。

2.2.5 温室大棚 6—8月温室大棚的棚内外平均温度和最高温度变化结果见图9。从图中可以看出,温室大棚和双网双膜拱形大棚在6—8月的平均温度和最高温度整体上没有明显差别,在个别高温天气下温室大棚能够比双网双膜拱形大棚的降温能力更强。原因可能是两个大棚在同一香菇种植场地,管理方式相同,较小的温差是由于大棚自身的性能导致的。

从5个棚外日最高气温超过35℃的高温样本中(图10)可以看出,棚外最低气温出现在05:00—06:00达到当天最低温度,温度范围为16.8~24.1℃。棚内最低气温也出现在相同时间段,温度范围为20.0~25.6℃。在前4 d样本中,棚内最低气温均高于棚外,温差为2.6~6.5℃;而在最后一天,棚内最低气温低于棚外,温差为0.4℃。随着气温升高,棚外在15:00—16:00达到当日最高温度,范

围为36.2~37.6℃。棚内气温峰值则出现在13:00—14:00,较棚外提前1~3 h,温度为29.1~33.8℃,与棚外相比存在3.0~7.4℃的温差,说明棚内温度整体较为稳定。

2.3 低温时间段棚内外温度相对变化

2.3.1 简易型大棚 2023年12月至翌年2月简易型大棚的棚内外平均温度和最低温度变化结果见图11。从图11-A可见,12月至翌年1月中旬,棚内外平均温度变化趋势基本一致,呈现出高度同步的波动。棚内外平均温度差异较小,大多数时间段温差维持在2℃以内,显示出简易型大棚在低温初期仅具备弱缓冲作用。然而,自2024年1月中旬起,棚内温度相较于棚外逐渐升高,温差开始扩大,最大温差可达7℃。进入2月后,外界气温逐步回升,棚内平均温度在多数时间段稳定保持在5℃以上。从图11-B可以进一步观察到,棚外日最低气温在整个监测期内仅有3 d高于5℃,其余时间均处于较低水平。而棚内最低气温变化趋势虽与棚外一致,但温差相对较小,始终维持在3℃以内。

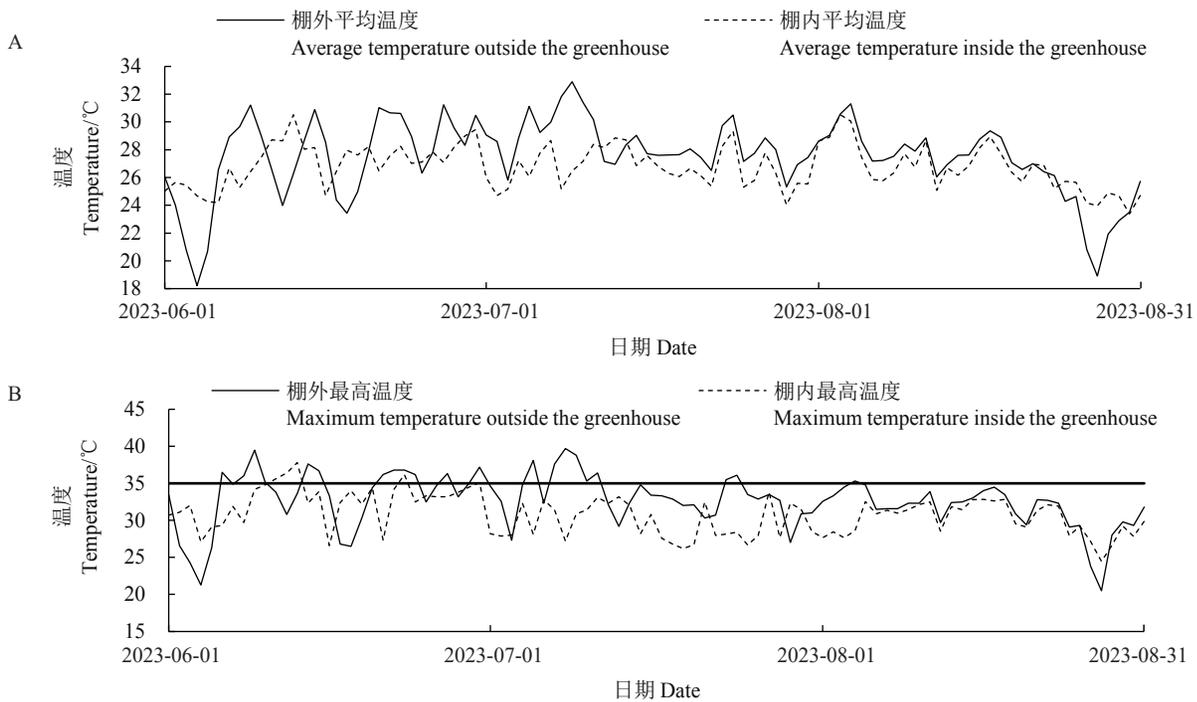


图9 温室大棚6—8月棚内外温度变化

Fig. 9 Temperature variation inside and outside the greenhouse from June to August

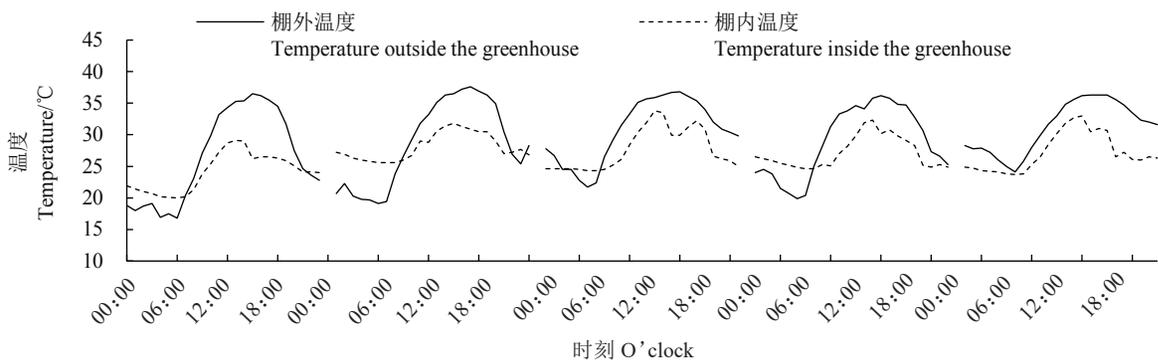


图10 温室大棚5 d 高温天气的棚内外温度24 h 逐时监测结果

Fig. 10 The 24 h hourly temperature monitoring results inside and outside the greenhouse during 5 days of high temperature weather

统计显示,整个12月至2月期间,棚外出现低温天气的时间共76 d,棚内有65 d,说明简易型大棚在冬季总体缺乏明显的抗寒性能。

从5 d 棚外日均温度在5 °C以下的典型样本中(图12)可见,棚外最低气温在凌晨04:00—05:00之间,温度范围为-2.2~-1.6 °C。棚内最低气温出现在相同时间段,温度为-2.8~-2.3 °C。棚内最低气温都要低于棚外,温差在0.6~0.9 °C之间。随着温度的升高,棚外在12:00—14:00之间达到最高气温,温度为6.2~12.2 °C;而棚内最高气温同样出现在12:00—14:00之间,温度为8.7~14.9 °C,比棚

外高出2.5~4.2 °C。

2.3.2 简易标准型大棚 2023年12月至翌年2月简易标准型大棚的棚内外平均温度和最低温度变化结果见图13。根据图13-A可知,简易标准型大棚在12月至翌年2月的棚内外平均温度和最低温度保持着一致的变化,且都要高于棚外,棚内要稳定高于棚外2.0~4.0 °C,极个别日期会出现高于棚外6~8 °C的情况。如图13-B所示,该地区12月至翌年2月的低温天气主要集中在中下旬,月初会出现温度回暖的现象,不会出现长久的连续低温,但最低温度基本均低于5 °C。3个月内棚外低温天气

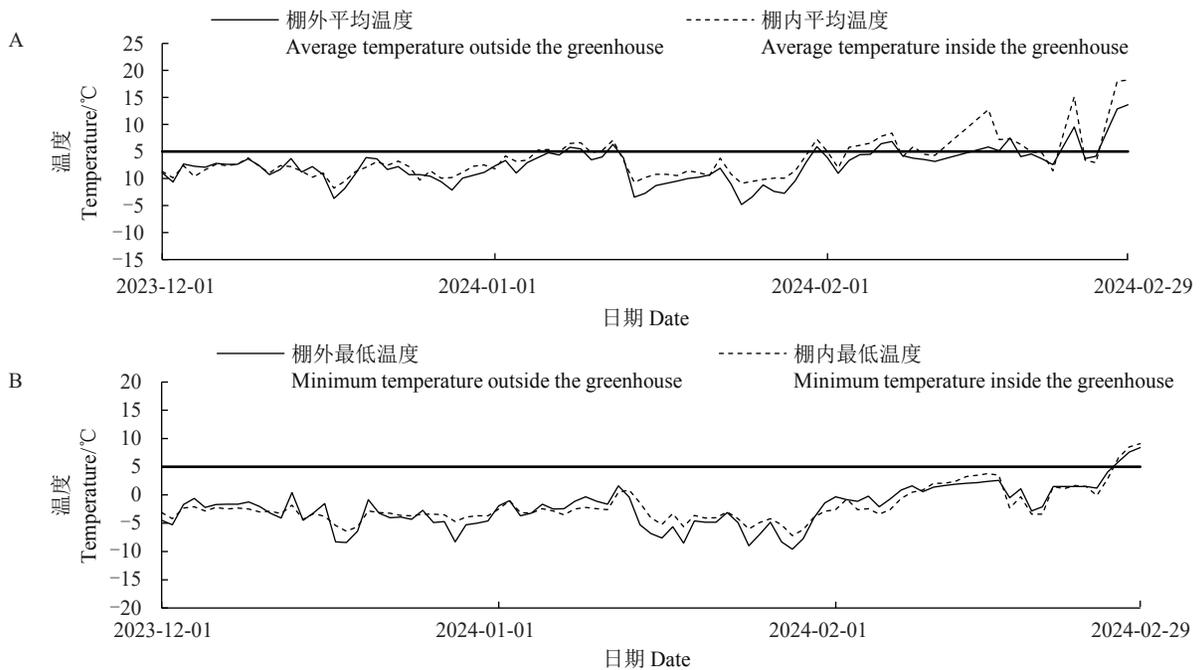


图 11 简易型大棚 12 月至翌年 2 月棚内外温度变化

Fig. 11 Temperature variation inside and outside the simple greenhouse from December to February

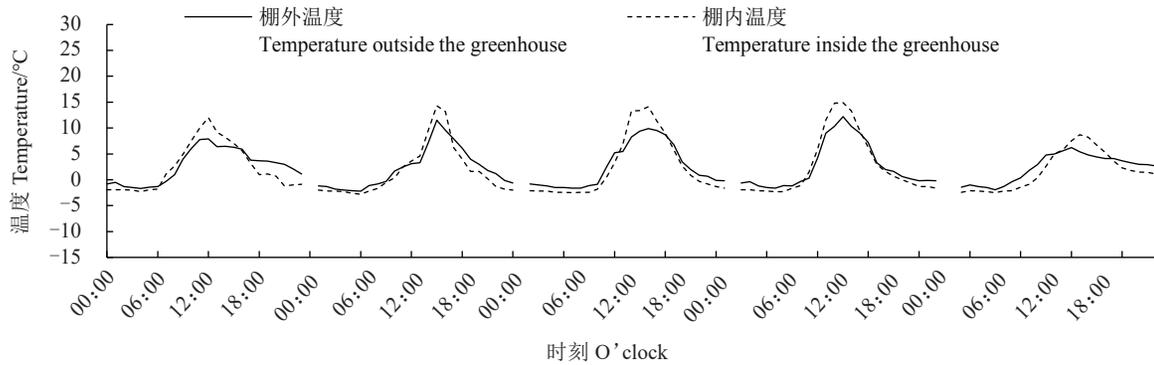


图 12 简易型大棚 5 d 低温天气的棚内外温度 24 h 逐时监测结果

Fig. 12 The 24 h hourly temperature monitoring results inside and outside the simple greenhouse during 5 days of low temperature weather

的时间为 55 d,棚内为 14 d,对于该地区,此简易标准型大棚具有较好的低温抵抗能力。

从 5 d 棚外日平均温度低于 5 °C 的样本中可以看出(图 14),棚外在 05:00—06:00 达到当天最低温度,温度为-2.3~1.1 °C。棚内最低温度出现在 05:00—07:00,比棚外最低温度延迟 0~2 h,温度为 2.2~3.7 °C。这 5 d 中棚外最低温度均低于棚内,温差为 2.0~4.5 °C。棚外在 13:00—14:00 达到当天最高温度,温度为 4.8~6.9 °C。棚内的最高温度出现在 13:00—14:00 之间,比棚外最高温度提前 0~1 h,温度为 8.6~12.4 °C,温差为 3.0~5.6 °C。

2.3.3 小型连栋温室 2023 年 12 月至翌年 2 月小型连栋温室的棚内外平均温度和最低温度变化结果见图 15。从图 15-A 可见,小型连栋温室在整个冬季期间始终保持棚内温度高于棚外,无论是平均温度还是最高温度均明显优于外界环境,表现出良好的保温性能。该地区的低温天气主要集中在 2023 年 12 月中下旬、2024 年 1 月中旬以及 2 月初。此外,冬季气温波动幅度较大,棚外平均气温的极值分别为 12.47 °C 与-7.24 °C,二者之间差值达 19.71 °C,体现出外界环境的不稳定性。而在大棚内部,由于其结构密闭性及保温材料的作用,棚

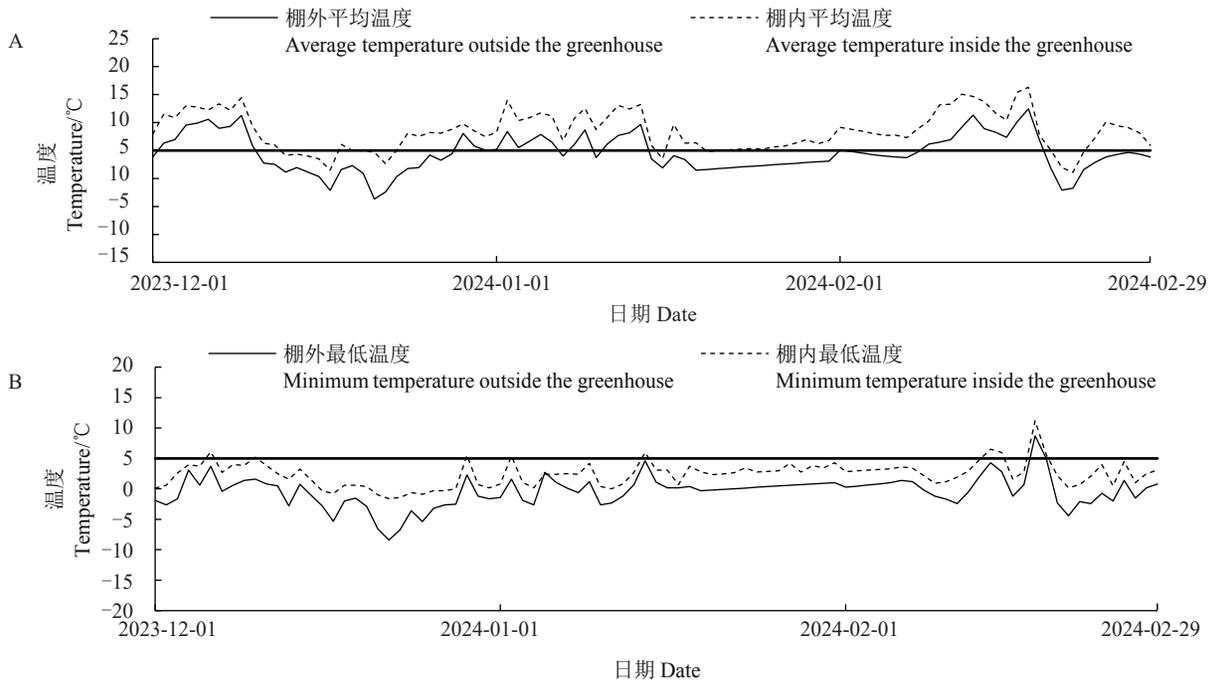


图 13 简易标准型大棚 12 月至翌年 2 月棚内外温度变化

Fig. 13 The temperature variation inside and outside the simple standard greenhouse from December to February

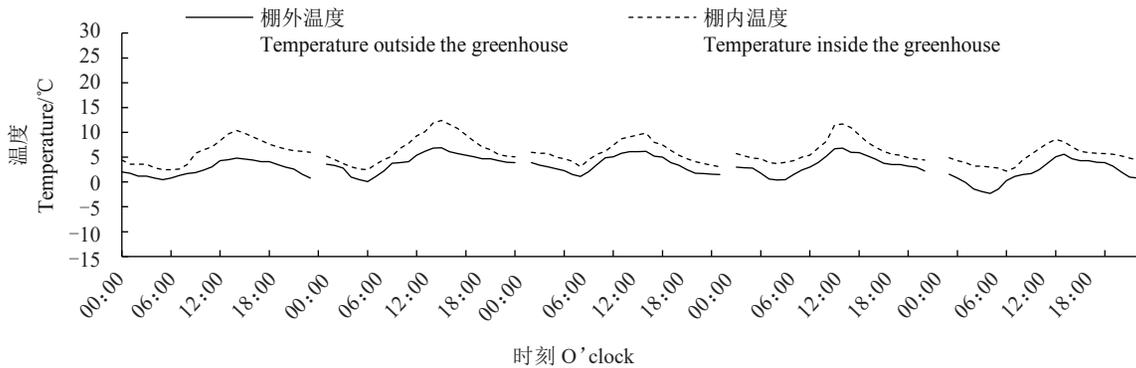


图 14 简易标准型大棚 5 d 低温天气的棚内外温度 24 h 逐时监测结果

Fig. 14 The 24 h hourly temperature monitoring results inside and outside the simple standard greenhouse during 5 days of low temperature weather

内温度变幅明显减小。尽管棚内外温度变化趋势整体保持同步,但温差长期维持在 2~6 °C 之间。从图 15-B 中可以看到,在监测期内,棚外日最低温度低于 5 °C 的时间为 50 d,而棚内仅有 14 d 低于此临界值。说明在绝大多数时间段内,小型连栋温室能够有效将棚内最低温度维持在 5 °C 以上。

从 5 d 棚外日平均温度 5 °C 以下的低温样本中可以看出(图 16),日最低气温普遍出现在凌晨 04:00—06:00 之间,温度范围为-9.1~-0.6 °C。棚内最低气温亦出现在相同时间段,温度范围为-2.3~2.8 °C。在这 5 d 中,棚内最低气温始终高于棚外,

最低温度的差值为 3.4~6.9 °C。开始升温后,棚外在 12:00—14:00 达到当天最高温度 4.1~12.7 °C。棚内在 13:00—15:00 达到当天最高温度,比棚外最高温度延迟 0~1 h,温度为 13.4~19.2 °C,温差在 6.2~9.8 °C。

2.3.4 双网双膜拱形大棚 2023 年 12 月至翌年 2 月双网双膜拱形大棚的棚内外平均温度和最低温度变化结果见图 17。从图 17-A 可见,原阳地区冬季温度波动幅度较大,如 12 月 8—11 日,棚外平均温度从 13.95 °C 骤降至 -1.69 °C,降幅达 15.64 °C,仅历时 3 d。而棚内温度变化相对平稳,始终维持

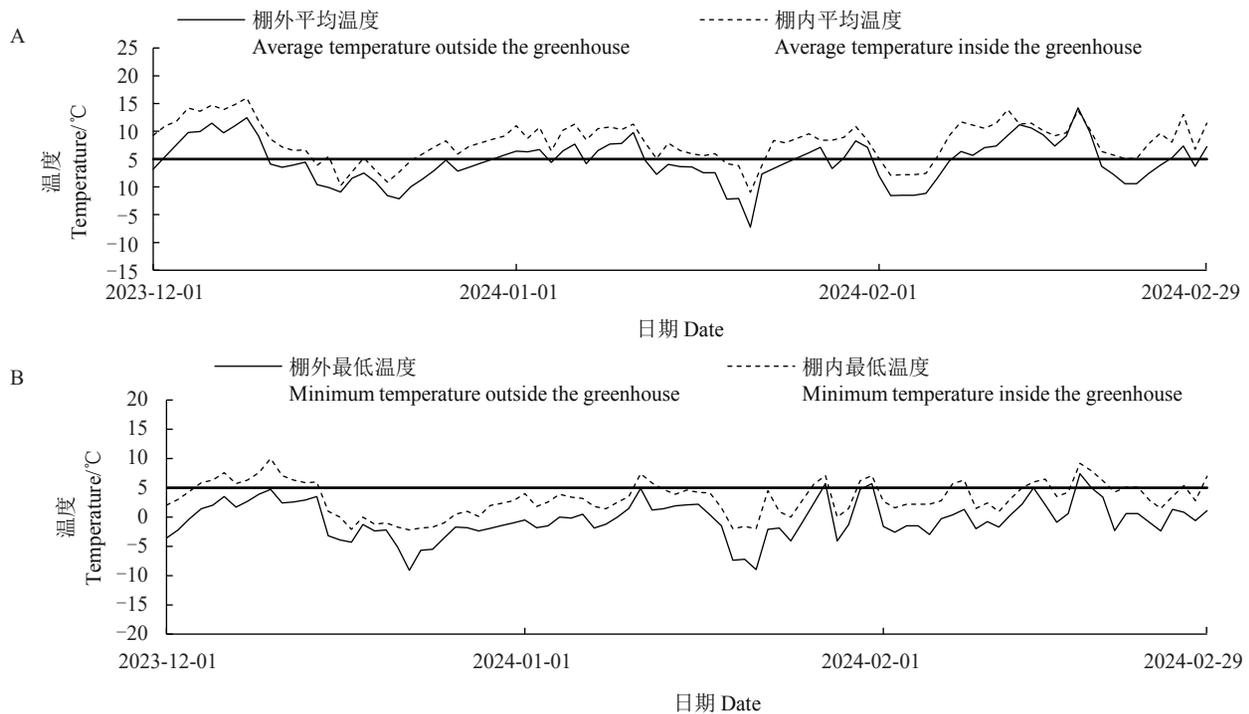


图 15 小型连栋温室 12 月至翌年 2 月棚内外温度变化

Fig. 15 The temperature variation inside and outside the small linked greenhouse from December to February

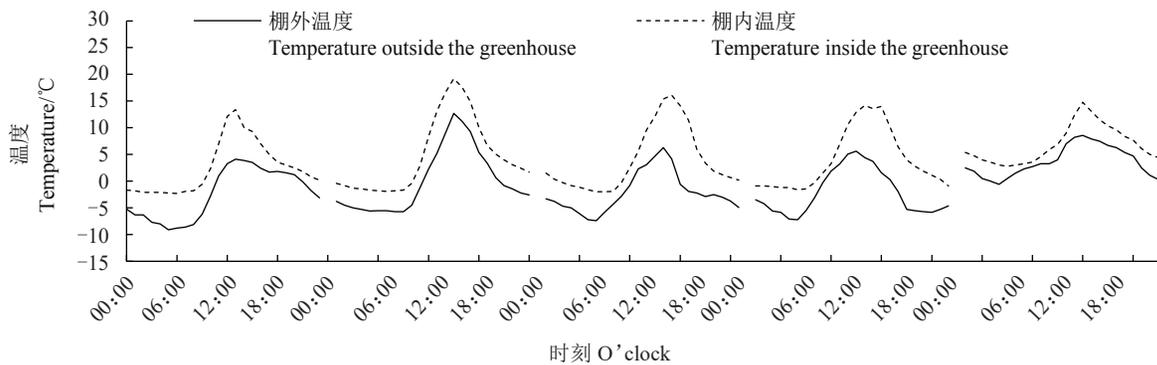


图 16 小型连栋温室 5 d 低温天气的棚内外温度 24 h 逐时监测结果

Fig. 16 The 24 h hourly temperature monitoring results inside and outside the small linked greenhouse during 5 days of low temperature weather

在 2~6 °C 的范围内。图 17-B 进一步揭示了该地区冬季低温天气的持续性特征。自 2023 年 12 月 10 日起直至翌年 2 月 9 日,棚外平均气温几乎持续处于 5 °C 以下,仅有 2 d 超过该临界值。在此期间,棚外的低温时间为 73 d,棚内则为 58 d。尽管棚内低温时间未出现大幅度减少,但这并不代表双网双膜拱形大棚保温能力不足,而是说明该大棚在更为极端的低温环境中仍展现出稳定性与保护作用。因为在 2023 年 12 月 20—24 日,棚外最低气温连续 5 d 低于 -10 °C,为本监测期内的极端低温阶段,而

此期间棚内最低温度始终维持在 0.0~1.4 °C 之间,棚内外最低温度的最大差值达到 14.4 °C,具有较强的保温能力。

从 5 d 棚外日平均温度 5 °C 以下的低温样本中可以看出(图 18),棚内温度 24 h 都要高于棚外。棚外在 07:00—08:00 达到当天最低温度,温度为 -13.9~-7.7 °C。棚内在相同的时间段达到当天最低温度,温度为 0~1.5 °C,棚内外最低温度的温差为 8.9~14.1 °C。开始升温后,棚外在 13:00—15:00 达到当天最高温度 -4.9~2.6 °C。棚内在 14:00—

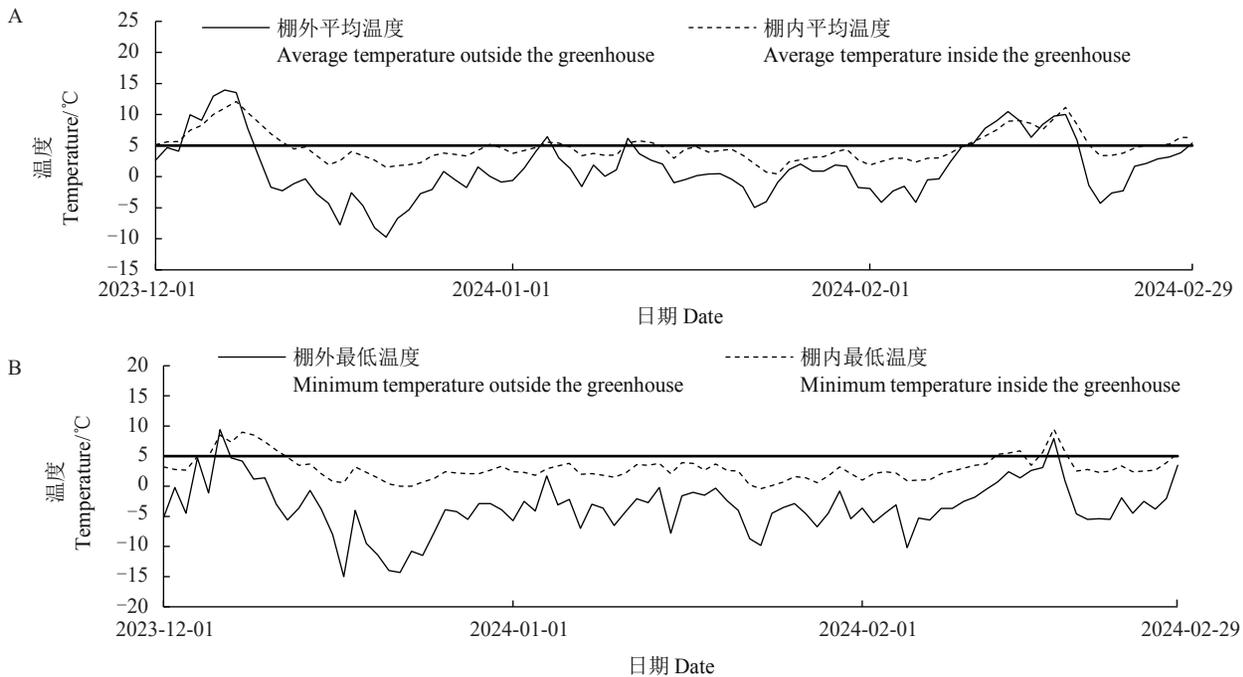


图 17 双网双膜拱形大棚 12 月至翌年 2 月棚内外温度变化

Fig. 17 The temperature variation inside and outside the double-net double-film arched greenhouse from December to February

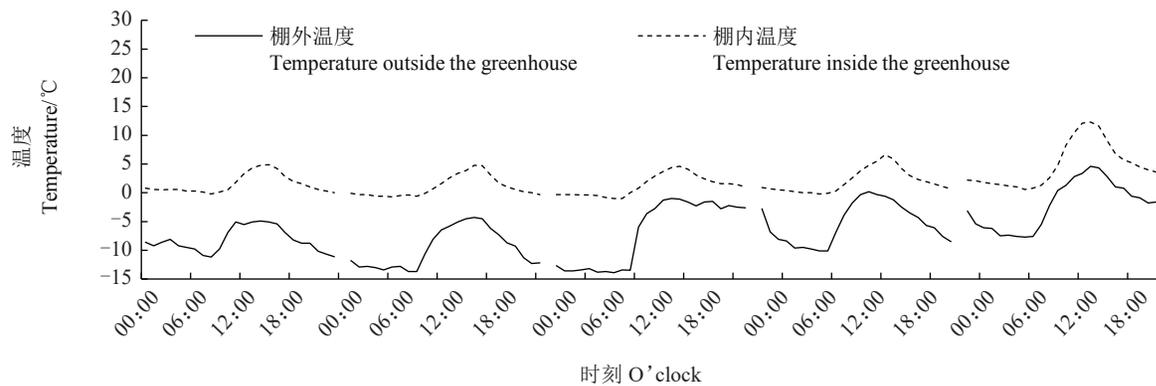


图 18 双网双膜拱形大棚 5 d 低温天气的棚内外温度 24 h 逐时监测结果

Fig. 18 The 24 h hourly temperature monitoring results inside and outside the double-net double-film arched greenhouse during 5 days of low temperature weather

15:00 达到当天最高温度,比棚外最高温度延迟 0~1 h,温度为 3.6~7.5 °C,温差在 4.5~10.1 °C。

2.3.5 温室大棚 2023 年 12 月至翌年 2 月温室大棚的棚内外平均温度和最低温度变化结果见图 19。温室大棚与双网双膜拱形大棚在同一地区,从图中可见,相较于双网双膜拱形大棚,温室大棚在整个监测期间表现出更为稳定的棚内温度控制能力。其内部温度不仅波动幅度小于拱形大棚,且整体温度水平明显高于外界。在多数低温天气过程中,棚内平均温度基本维持在 5 °C 左

右。温度差统计显示,温室大棚棚内外的日平均温度最大温差达到 10 °C,而最低温度的最大差值更是高达 13.3 °C。温室大棚的低温时间为 35 d,相比之下,拱形大棚同期低温时间为 58 d,差值为 23 d。这一差异充分说明温室大棚在持续性低温背景下具有更优的热稳定性与抗寒性能。

温室大棚所选取相同的 5 d 低温样本,从图 20 中可知,温室大棚 24 h 的棚内温度都要高于棚外。温室大棚棚内在 05:00—08:00 达到当天最低温度,比棚外最低温度提前 0~2 h,温度为-1~0.6 °C,

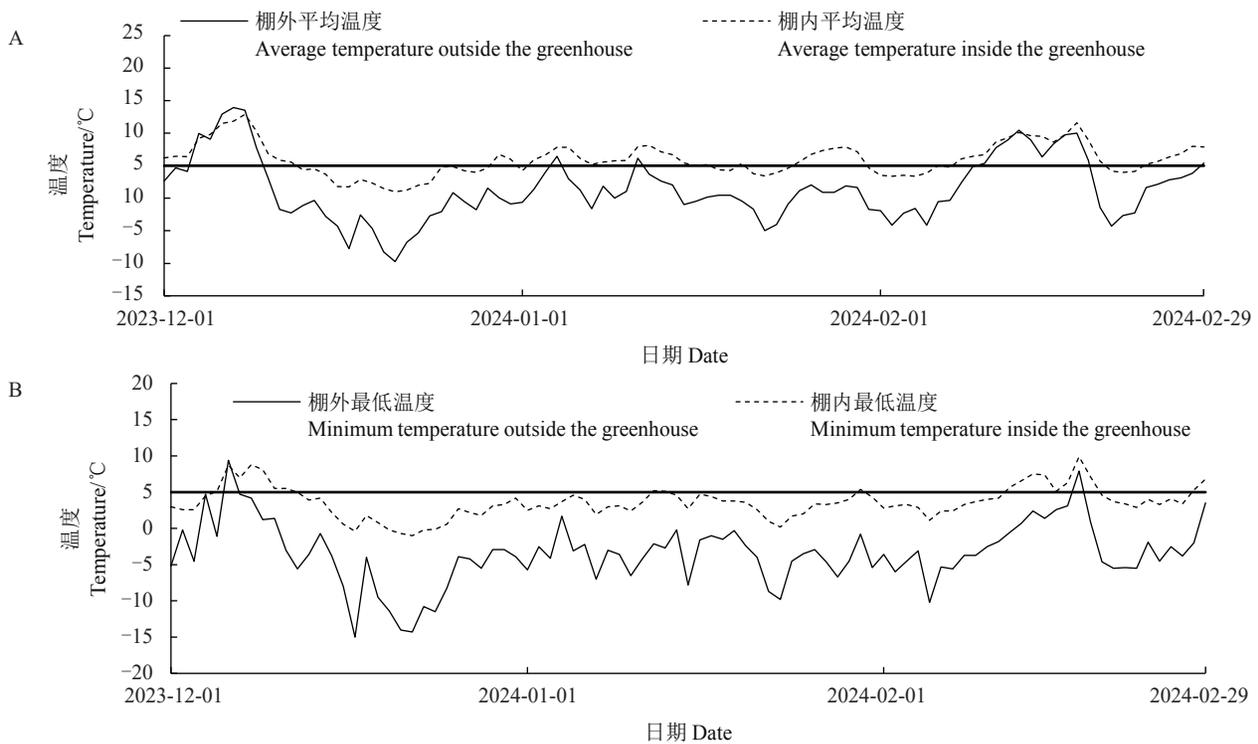


图 19 温室大棚 12 月至翌年 2 月棚内外温度变化

Fig. 19 The temperature variation inside and outside the greenhouse from December to February

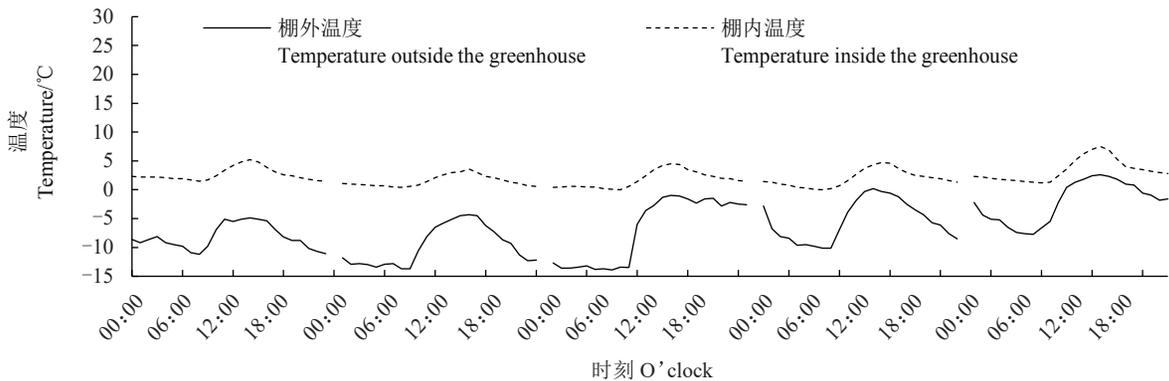


图 20 温室大棚 5 d 低温天气的棚内外温度 24 h 逐时监测结果

Fig. 20 The 24 h hourly temperature monitoring results inside and outside the greenhouse during 5 days of low temperature weather

棚内外最低温度的温差为 8.3~13 °C。开始升温后,棚内在 15:00 达到当天最高温度,比棚外最高温度延迟 0~2 h,温度为 4.6~12.3 °C,温差在 5.6~9.8 °C。

2.4 不同类型大棚的温度调控能力及成本对比

从表 2 可知,小型连栋温室在高温条件下的降温效果最佳,降温能力可达 5.0~8.3 °C。双网双膜拱形大棚和温室大棚的降温能力上相对较强,分别具备 3.2~7.9 °C和 3.0~7.4 °C的降温能力,在稳定性方面要弱于小型连栋温室。简易标准型大棚降温效果相对较低,降温区间在 1.8~5.0 °C。相比之下简易大棚受结构限制,在高温天气下棚内温度会出

现高于棚外的情况,可高达 2.3 °C。近年来,全球气候变暖加剧,河南地区夏季极端高温现象日益频繁。香菇菌丝在超过 35 °C的环境中容易受到抑制,甚至死亡。因此,温室大棚、双网双膜拱形大棚和小型连栋温室等具备较强温控能力的大棚能够有效降低高温对菌丝的负面影响,确保香菇的正常生长。尽管简易型和简易标准型大棚在降温方面仍有较大的提升空间,但由于其成本低廉,这些大棚更受贫困地区种植户的青睞。

在低温时段,温室大棚和双网双膜拱形大棚表现出较强的保温能力,棚内温度可分别比棚外高

表2 不同类型大棚的温度调控能力与经济性分析

Table 2 Temperature control capabilities and economic analysis of different greenhouse types

地区 Area	大棚类型 Greenhouse type	建造成本/元 Construction cost/Yuan	使用年限 Service life/a	高温天气降温能力 Cooling capacity in high-temperature weather/°C	低温天气升温能力 Heating capacity in low-temperature weather/°C	低温天气保温能力 Insulation capacity in low-temperature weather/°C
卢氏县狮子坪乡 Shiziping township of Lushi county	简易大棚 Simple greenhouse	5000	5	-2.3~-0.2	2.5~4.2	0.6~0.9
卢氏县朱阳关镇 Zhuyanguan town of Lushi county	简易标准型大棚 Simple standard greenhouse	50 000	8	1.8~5.0	3.0~5.6	2.2~3.7
西峡县重阳镇 Chongyang town of Xixia county	小型连栋温室 Simple linkage greenhouse	150 000	10	5.0~8.3	6.2~9.8	3.4~6.9
原阳县 Yuanyang county	双网双膜拱形大棚 Double-net and double-film arched greenhouse	80 000	10	3.2~7.9	4.5~10.1	8.9~14.1
	温室大棚 Greenhouse	100 000	10	3.0~7.4	5.6~9.8	8.3~13.0

出 8.3~13.0 °C 和 8.9~14.1 °C,能有效降低冬季极端低温带来的冷害风险。与此同时,这两类大棚在升温能力方面也表现突出,棚内白天温度较外界升高幅度分别为 5.6~9.8 °C 和 4.5~10.1 °C,有利于在较短时间内积累出菇所需的热量,提升温度调控效率。相比之下,小型连栋温室、简易标准型大棚和简易大棚的保温能力相对一般,分别为 3.4~6.9 °C、2.2~3.7 °C 和 0.6~0.9 °C;其升温能力分别为 6.2~9.8 °C、3.0~5.6 °C 和 2.5~4.2 °C。虽然温控效果不如温室类和拱形结构大棚明显,但仍具备一定的保温调节能力,特别适合温带地区或气温变化不剧烈的区域使用。在西峡、卢氏等香菇主产区,香菇主要集中于冬季进行出菇生产,若棚内温度持续偏低,将无法达到出菇期所需的有效积温,进而影响香菇的出菇产量与整体品质。因此,具备较强升温与保温能力的大棚类型,不仅能够稳定保障出菇期的热量供应,还能有效延长出菇周期,提升冬季产能与效益,对寒冷季节的香菇高效生产至关重要。

通过对不同类型大棚的降温能力、升温能力、建造成本和使用年限等参数对比分析,笔者建议根据地区的气候特点与实际需求选择合适的大棚类型。简易型大棚的建造成本较低,仅为 5000 元·667 m²,使用年限为 5 a,在伏牛山区主要是中老年人居家的小规模种植,或者社区集体种植。该类型大棚的降温 and 升温能力较弱,适用于气候较温暖、低温天气不严重的地区,如南方的江浙一带、广东、广西等

地。考虑到使用简易大棚主要是小规模种植且种植户经济条件有限,若能增加适当的降温或升温措施,简易大棚仍然是一个低成本的选择;否则,可以考虑使用简易标准型大棚来提高温度控制能力。因为简易标准型大棚在降温和升温能力方面表现得较为平衡,建造成本为 50 000 元·667 m²,使用年限为 8 a,适合中长期使用。简易标准型大棚的缺点是高温控制能力并不完备,比如不足以应对朱阳关镇的高温天气(棚外温度超过 37 °C 时)。因此建议朱阳关镇的种植户可以考虑使用小型连栋温室或双网双膜拱形大棚等类型的大棚。小型连栋温室的建造成本为 150 000 元·667 m²,使用年限为 10 a,适合长期使用并且对温控要求较高的地区,能够在长时间高温条件下保证棚内温度适宜。小型连栋温室的缺点是建造成本较高,适用于有一定资金和技术支持的种植者,一般由一些小型公司使用,具有较大的规模和更高的技术水平。双网双膜拱形大棚建造成本为 80 000 元·667 m²,使用年限为 10 a,在降温和升温方面都有较强的能力,能够应对温差较大和极端气候变化的挑战,因此也适合用于高温频繁的地区,相对较低的成本和较好的性价比使其成为许多种植户的首选,然而其对极寒天气的适应能力有限。温室大棚建造成本为 100 000 元·667 m²,使用年限为 10 a。该大棚的温度控制能力非常强,适用于温差较大和极端气候频繁的大规模种植地区,特别是商业化生产和长期使用,但其建造成本较高,不适合预算较低的种植户。

3 讨论与结论

笔者首次分析了河南省香菇主产区不同类型大棚(简易型大棚、简易标准型大棚、小型连栋温室、双网双膜拱形大棚、温室大棚)的温度调控能力,结果表明,各类型大棚在高温和低温期间的控温效果存在较大差异。部分大棚在高温条件下降温效果不佳,甚至出现棚内温度高于棚外的情况;而低温条件下保温效果参差不齐,难以确保达到出菇所需的有效积温。高效温控设施如温室大棚表现出较强的温度控制能力,但其高昂的建造成本限制了推广;相反,简易型大棚成本较低,但温控性能不足,难以应对极端气候。目前,国内外香菇研究主要集中在品种改良^[13-14]、功能成分和基因组学^[15-17]等方面,香菇生长环境的重要性常被忽视。香菇大棚不仅调节温湿度,保障香菇生长环境^[18],还能隔离外界环境干扰,降低病虫害风险,减少杀虫剂和杀菌剂的使用,提升食品安全性。此外,大棚为种植者提供了集中管理的空间,有助于降低人工和运营成本,并通过节水灌溉与自动化技术实现资源的高效利用,符合现代农业可持续发展的要求。因此,香菇生长环境,尤其是大棚的建设和管理,是提升香菇产业整体水平的重要环节,应得到更多地关注与研究。

综上所述,不同类型香菇大棚在高温和低温条件下的温度控制能力存在明显差异,香菇大棚类型的选择应充分考虑当地气候变化。在气候温暖的地区,简易型大棚适合小规模种植,而简易标准型大棚适合中长期种植;而在高温或低温天气频发的地区,推荐使用小型连栋温室、双网双膜拱形大棚或温室大棚,以确保香菇的健康生长和稳定产量。除此之外,种植户也要综合考虑香菇菌龄、温型、有效积温等香菇自身特性,这样才能最大化地提高香菇的生长效率和出菇质量,从而在有限的生长季节内获得更高的产量和更好的经济效益,打破香菇一年只能种植一季的壁垒,实现全年出菇的目标。

参考文献

- [1] 阮海星,张卫国,付家华,等.香菇多糖及营养成分分析[J].微量元素与健康研究,2005,22(2):35-36.
- [2] 李延年,王文亮,贾凤娟,等.香菇呈味物质研究进展及产品开发[J].食品研究与开发,2021,42(10):186-192.
- [3] 杨杰,徐爱东.香菇的营养价值及深加工食品质量安全研究进展[J].农产品加工,2024(20):98-103.
- [4] 中国食用菌协会.2023年度全国食用菌统计调查结果分析[J].中国食用菌,2025,44(1):120-129.
- [5] 孔维丽,康源春,袁瑞奇,等.河南省高温香菇栽培的四种出菇模式[J].中国食用菌,2016,35(2):79-82.
- [6] 张辉,闻亚美,党帅,等.河南省食用菌产业地位及发展策略[J].中国蔬菜,2019(10):9-13.
- [7] 贾冰.基于SCP范式的河南省食用菌产业分析[J].农村经济与科技,2023,34(9):102-104.
- [8] 莫丽萍,武婉丽,张国民,等.气象灾害对香菇生产的影响及防范[J].食用菌,2015,37(4):36-37.
- [9] 胡莉婷,杨光仙,李梦夏,等.河南香菇越夏高温气候特征及其与菌棒坏袋率的关系分析[J].中国瓜菜,2024,37(5):98-106.
- [10] 赵霆,张国民,莫丽萍,等.香菇越夏烂袋原因调查分析[J].食用菌,2015,37(3):27-28.
- [11] 师子文,吴杰,胡素娟,等.高温对香菇菌丝生理特性的影响及胁迫等级构建[J].食用菌学报,2024,31(5):53-63.
- [12] 姚宛艳,吴迪.近50a来黄河流域温度和降水基本特征和变化趋势分析[J].中国农村水利水电,2014(8):104-109.
- [13] 崔婉华,姚方杰,王婷,等.香菇自交菌株优良种质筛选研究[J/OL].菌物研究,1-8(2024-10-25).<https://doi.org/10.13341/j.jfr.2024.1761>.
- [14] 李巧珍,刘建雨,章炉军,等.香菇自交选育新菌株及其亲本子实体的氨基酸特征及蛋白质营养价值[J].食用菌学报,2019,26(3):51-57.
- [15] 艾洪湖,程艳芬,云少君,等.香菇中麦角甾醇的提取纯化、表征及其抗氧化活性[J].食品研究与开发,2024,45(20):25-34.
- [16] 李俊生,管丽,李嘉慧,等.香菇多糖提取、结构特征及生物活性研究进展[J].中国调味品,2024,49(9):208-214.
- [17] 赵旭.基于多组学联合分析的香菇高温胁迫研究[D].合肥:中国科学技术大学,2019.
- [18] 李红梅.科学搭建遮阳棚确保香菇安全越夏[J].食用菌,2016,38(4):61-62.