

全封闭温室降温方法研究

张敏^{1a,2}, 王国栋^{1a}, 薛绪掌², 樊强^{1b}, 李霞^{1a}, 李邵², 陈菲²

(1 西北农林科技大学 a 理学院, b 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100097)

[摘要] **【目的】**研究全封闭小温室的降温方法,为全封闭温室的降温及水分循环利用提供参考。**【方法】**采用不同的降温思路,设计不同的试验方案,研究不同覆盖层、空间延长及水循环方式对全封闭小温室温度的影响,比较不同方法的降温效果。**【结果】**(1)中空材料对全封闭环境内的降温效果不明显。在双层中空玻璃的4个受光面加入一层水后,能够显著降低高温时段温室内的温度。(2)延长空间对全封闭小温室能够起到一定的降温作用,平均可降低4℃。(3)利用水在全封闭小温室顶面和侧面循环,可使温室内温度降低,具有明显的降温效果。**【结论】**利用水循环方法能够起到较好的降温效果,空间延长法也可实现全封闭温室的降温,但需考虑延长空间的成本等因素。

[关键词] 全封闭温室;温室降温;降温方法;水循环

[中图分类号] S624.4⁺2

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2011)07-0129-06

Research on cooling methods for closed greenhouse

ZHANG Min^{1a,2}, WANG Guo-dong^{1a}, XUE Xu-zhang²,

FAN Qiang^{1b}, LI Xia^{1a}, LI Shao², CHEN Fei²

(1 a College of Science, b College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwestern A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2 National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China)

Abstract: **【Objective】**The experiment studied the cooling methods to provide references for cooling and hydrological cycling of closed greenhouse. **【Method】**Three methods were used and plans were designed to research temperature in the closed greenhouse affected by different cover layers, spatial extension and hydrological cycle, then the cooling effect was compared. **【Result】**The hollow materials have little effect on the temperature inside the greenhouse, but adding water into the double-layer hollow glasses can reduce temperature in the closed greenhouse. Extending the space can reduce the temperature of the greenhouse by 4 degrees. Hydrological cycle has a satisfactory cooling effect. **【Conclusion】**Using hydrological cycle has a satisfactory cooling effect, also with spatial extension method, but extending the space needs to consider factors like the costs.

Key words: closed greenhouse; greenhouse cooling; cooling methods; hydrological cycle

全封闭温室是指除进出门外,全部为密封型的类似植物工厂模式的温室,温室内植物生长发育不受外界自然条件的制约,是一种稳定、安全的生产模式。美国、日本等国家拥有代表当今世界最先进水

平的全封闭式生产体系,即应用人工补充光照、采用网络通讯技术和视频技术进行温室环境的远程控制与诊断、由机械人或机械手进行移栽作业,不仅具有节水节能的双重作用,而且在抑制病虫害的发生、提

* [收稿日期] 2010-12-17

[基金项目] 国家“863”计划项目“主要农作物节水高产农艺补偿技术研究”(2006AA100202-2)

[作者简介] 张敏(1982—),女,陕西扶风人,实验师,在读博士,主要从事环境生物物理学研究。

E-mail: zhangmin70863@gmail.com

[通信作者] 薛绪掌(1967—),男,陕西韩城人,研究员,博士,主要从事农业节水技术研究。E-mail: xuexz@nrcita.org.cn

高劳动生产率和产品产出率等方面都有明显的优势^[1-2]。由于全封闭温室结构的封闭性,极易使温室形成不利于植物生长的高温高湿环境,如何在完全封闭的温室内实现夏季高温降温,是长期困扰温室设施研究者的问题。目前,用于温室降温的方法有很多,具体方法要依据周围的环境条件、作物生长所需要的条件、温室的结构、覆盖材料的种类等因素而定^[3-4]。对于普通的半封闭型温室而言,主要的降温措施有自然通风降温、湿帘风机降温、遮阳降温、除湿降温、高压喷雾降温和屋顶雾帘降温系统等^[5-6]。而对于全封闭温室的降温,Speetjens 等^[7]和 Bot 等^[8]发现,利用温室内竖起的双层太阳能烟囱和热交换器可以降低全封闭温室的温度,其原理是上升到烟囱顶部的热空气经过顶部的热交换器后,变为冷空气,然后回到温室下部,从而实现了冷、热气体在全封闭温室内的循环变化,降低了全封闭温室内植物生长区附近的温度。Davies 等^[9]和 Panton 等^[10]在特内里费岛建立的全封闭海水温室中,也创造了一个低温的环境,该温室应用特殊材料做成的屋顶,可将不适合作物光合作用的光滤掉,从而明显降低了温室的温度。日本的植物工厂在全封闭环境中使用太阳以及发光二极管和荧光灯作为光源,降低了由多余热量造成的温室内温度的升高,通过计算机实现光照、温度和养分的综合控制,为解决粮食、环境问题等开辟了一条新途径^[11]。李霞等^[12]运用“温差”热交换原理调控全密闭盆栽小环境内的温湿度发现,利用“水—气温差”进行热交换时的降温除湿效果显著;而利用“地—气温差”进行热交换时,在夜晚的降温除湿效果不明显。这些方法虽然取得了一定的降温效果,但还存在区域性太强、降温效果较差、所需成本过高、影响作物品质等不足,因此不适合在我国大面积推广和使用。本研究采用 3 种降温思路设计不同的试验方案,比较分析全封闭小温室在不同覆盖层、空间延长及水循环等降温方法下的降温效果,以期调控全封闭温室的高温高湿环境提供参考,也为进一步开展全封闭温室水分循环利用奠定基础。

1 试验设计及装置

1.1 不同覆盖层对全封闭小温室温度和空气相对湿度的影响

1.1.1 试验设计思路 在现代建筑中考虑更多的是节能环保等因素,尤其是在寒冷的北方,多使用双层的中空玻璃保暖,双层玻璃中间是不流动的空气,

除能起到良好的隔音、保温效果外,还能起到隔热作用。这主要是因为空气的导热系数很低,从而减少了室外多余的阳光辐射热进入室内,减少了通过玻璃的瞬变传导热^[13]。同时水会有效吸收和反射太阳光谱中对植物光合作用无用的近红外辐射部分。试验中将双层中空玻璃以及加了一层水层的中空玻璃应用到全封闭小温室的设计建造中,研究不同覆盖层全封闭玻璃温室在夏天的降温效果。

1.1.2 试验设计 试验于 2009-04-06 在北京市农林科学院内进行。试验用小温室长×宽×高=40 cm×40 cm×40 cm(后墙高 50 cm),其前表面、左侧面、右侧面、上表面为 5 mm 厚的玻璃,后面为 0.3 mm 厚的透明 PVC 板,共 9 套装置。小温室覆盖层有 3 种,分别为:单层玻璃;空气层厚度为 9 mm 的双层中空玻璃;在空气层厚度为 9 mm 的双层中空玻璃的 4 个受光面上分别再加 1 层玻璃,夹层厚度为 10 mm,并在这一层中加入水,由此建立了 3 种不同覆盖层处理的全封闭试验装置,以下分别简称为单层、双层、3 层小温室。每处理 3 次重复。将装置摆放在种植有小油菜的小区。图 1 为不同覆盖层全封闭小温室试验装置实物图。



图 1 不同覆盖层全封闭小温室试验装置实物图
Fig.1 Test device of different cover layers of the closed greenhouse

1.1.3 测定方法 使用便携式温湿度露点记录仪(Nercita),采集并观测温度和空气相对湿度的变化,将其探头外置的温、湿度传感器悬吊于全封闭小温室的植株生长点上方,设定记录仪每隔 30 min 读取存储数据 1 次,取平均值,比较各种处理的温、湿度。在试验过程中,选取晴天和多云 2 种典型天气测定数据。

1.2 空间延长对全封闭小温室温度的影响
1.2.1 试验设计思路 在对温室内的温度进行测定时发现,由于在温室的位置不同,温度值的变化也

比较大。一般而言,相同高度处南边的温度高于北边。如果能将温室的后墙进行适当后移,延长温室不受光部分的空间,实际上是为整个全封闭温室内温度值的升高提供了一定的缓冲空间,即降低了全封闭温室的温度。在此延长空间内可以种植一些喜阴植物以达到良好的经济效益。我国荒漠化土地总面积占全国国土面积的 27.3%^[14],但由于技术、资金及其他方面的一些原因,至今这些荒漠化土地未得到充分的开发利用。如果将延长空间的全封闭温室应用在年降水量少于 200 mm 的地区,如新疆和内蒙古的干旱半荒漠与荒漠地带,可以将每年的降水收集起来,加上全封闭温室自身蒸散水的循环利用,那么每年这数量不多的水资源就足够供给全封闭温室全年的生产用水。用西部荒漠地带较为丰富的土地资源来换取宝贵的水资源,这为西部荒漠地区的发展提供了广阔的前景。为此本试验延长了全封闭小环境内不受光部分的空间,观测其对全封闭温室内温度的影响。

1.2.2 试验设计 试验于 2009-08 在北京市农林科学院内进行。用厚度为 0.3 mm 的透明 PVC 板做成长×宽×高分别为 40 cm×40 cm×50 cm 和 80 cm×40 cm×50 cm 的长方体,其中 2 面为空面,1 个空面放在地面上,另外 1 个空面连接在长×宽×高为 40 cm×40 cm×40 cm(后墙高 50 cm)的单层玻璃小温室后面,再用锡箔纸将 PVC 板的长方体包裹起来,用于反射不必要的太阳辐射,这使得全封闭小温室有了不同长度的空间延长,将以上 2 种装置分别简称空间延长 80 和 40 cm 小温室,并以单层玻璃小温室作为对照温室。试验装置如图 2 所示。

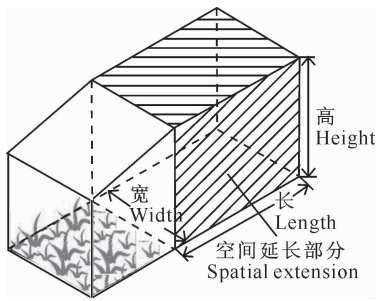


图 2 不同空间延长对全封闭小温室温度影响试验的装置
Fig. 2 Schematic diagram of cooling the closed greenhouse by different spatial extensions

1.2.3 测定方法 使用便携式温湿度露点记录仪(Nercita),采集和观测温度的变化,将其探头外置的温度传感器置于距离全封闭玻璃小温室前、左、右

及地面各 20 cm 的位置,设定记录仪每隔 30 min 读取存储数据 1 次。

1.3 水循环方式对全封闭小温室温度的影响

1.3.1 试验设计思路 水有很大的比热容,在发生相变时可吸收大量的热量。利用水在蒸发时吸收和反射大量的光能,将水分别以不同的贮存方式(温室内修水槽、水池或者让水在温室内空间循环)加入到全封闭温室的水环境中,使其在高温环境中蒸发的同时,还能吸收大量的空气潜热,从而起到很好的降温作用。通过观测全封闭小温室内的温度变化情况,比较不同水循环方式对降温效果的影响。

1.3.2 试验设计 试验于 2009-08 在北京市农林科学院内进行。用宽度为 60 cm、厚度为 0.3 mm 的透明 PVC 板绕内径为 30 cm 的盆体做成圆筒,封好筒顶盖作为试验装置,试验装置共设 4 个处理:对照装置.将高 0.6 m 的 PVC 全封闭圆筒置于土壤上;A 装置.将高 1.2 m 的 PVC 双层全封闭圆筒置于内径 30 cm、装有 1.5 m 深水的水桶之上,用水泵将水桶内的水抽到间距为 1 cm 的双层全封闭圆筒之间的顶部再流回到水桶中(图 3);B 装置.将高 1.2 m 的 PVC 全封闭圆筒置于内径 30 cm、深 0.4 m 的空桶之上;C 装置.将高 0.6 m 的 PVC 全封闭圆筒置于内径 30 cm、装有 0.4 m 深水的水桶之上。

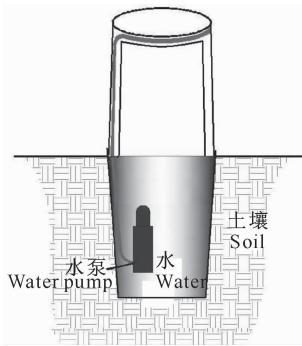


图 3 水循环方式对全封闭小温室温度影响试验的装置
Fig. 3 Schematic diagram of cooling the closed greenhouse by hydrological cycle

1.3.3 测定方法 使用便携式温湿度露点记录仪(Nercita),采集和观测温度的变化,将其探头外置的温度传感器悬吊于距全封闭小温室顶部 30 cm 处,每隔 30 min 记录数据 1 次。试验第 1 天,早 08:00 开启 A 装置中的水泵,中午 12:00 关闭水泵,到 18:00 结束当天测量;试验第 2 天从中午 12:00 开启 A 装置中的水泵,直到 18:00 结束测定。

2 结果与分析

2.1 不同覆盖层对全封闭小温室温度和空气相对湿度影响

图 4 为不同覆盖层全封闭小温室内以及外界温度的变化曲线,其中第 1 天为晴天,第 2 天为多云天气(图 5 同)。由图 4 可知,晴朗天气条件下,不同覆盖层全封闭小温室内温度的日变化与外界温度的变化趋势一致,均呈单峰曲线,且均于 13:00 达到最高值。单层和双层小温室内温度差异不显著,但 00:00—06:00 和 13:30—23:30,双层小温室内的温度一直高于单层玻璃小温室,最大差值为 2.4℃。说明双层玻璃温室由于结构上的特点,其升温较单层小温室慢,温室内、外最高温度出现时间存在一定

的时间差,且在中午 13:30 以后,单层小温室的温度随着外界温度的降低而降低,而双层小温室因其保温性能优于单层小温室,其温度值的降低滞后;与单层和双层小温室相比,加入了 10 mm 厚水层的 3 层小温室,其白天的降温效果最为显著,晚上温度值也略高于其他 2 种小温室,其中与单层小温室的温度相比差异达显著水平,白天最大温差为 5.9℃,晚上最大温差为 2.3℃,说明 3 层小温室中加入的 10 mm 厚的水层,由于吸收和反射了部分太阳辐射的能量,从而在白天有效地降低了小温室内的温度,晚上又起到了一定的保温作用。多云天气条件下,不同覆盖层全封闭小温室内温度值之间的差异较晴天不明显。但是加入了 10 mm 厚水层的 3 层小温室较单层小温室的温度低 1~2℃。

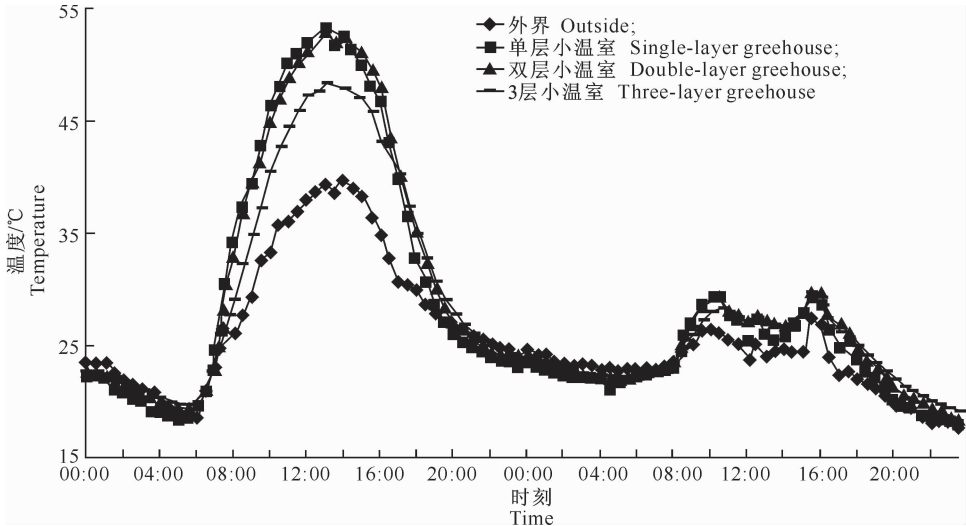


图 4 不同覆盖层全封闭小温室内、外温度的变化

Fig. 4 Changes of the temperature between the closed greenhouse and the outside at the different cover layers

图 5 为不同覆盖层全封闭小温室内、外空气相对湿度

对湿度的日变化曲线。

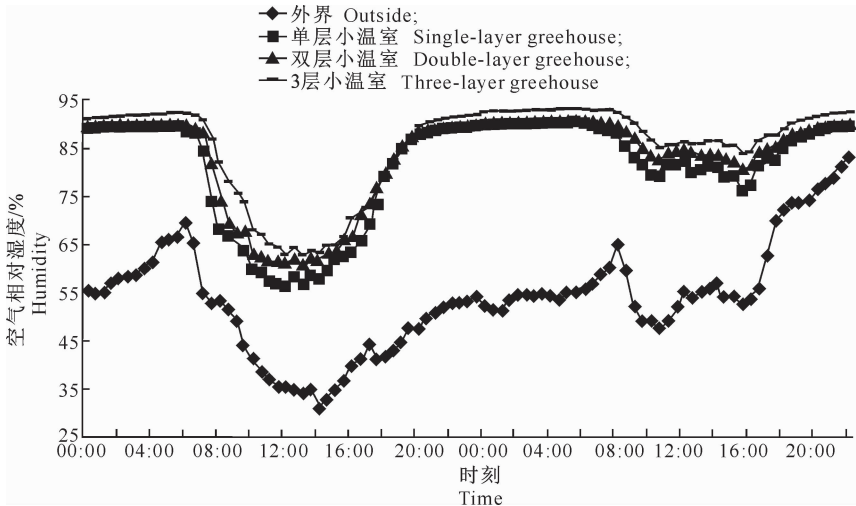


图 5 不同覆盖层全封闭小温室内、外空气相对湿度的变化

Fig. 5 Changes of the humidity between the closed greenhouse and the outside at the different cover layers

由图 5 可知,不同覆盖层全封闭小温室空气相对湿度差异显著。晴天天气条件下,在 07:00 之前和 20:00 之后,不同覆盖层全封闭小温室内的空气相对湿度均在 90%左右;07:00—20:00,随着温度的升高,空气相对湿度呈先降低后升高的趋势,最低降至 60%左右。在加入了 10 mm 厚水层的 3 层小温室,其空气相对湿度一直高于其他 2 种小温室,差异最大时较单层小温室高 14%左右。在多云天气条件下,由于白天温度不高,所以各个小温室内的

空气相对湿度较高。

2.2 不同空间延长对全封闭小温室温度的影响

空间延长对全封闭小温室温度的影响如图 6 所示。测定日为晴天,气温较高,当日最高气温出现在 14:30,为 40.5℃。与对照温室相比,空间延长 40 cm 小温室未表现出明显的降温效果,两者之间差异不大;而空间延长 80 cm 小温室有明显降温效果,全天温度平均降低 4℃。

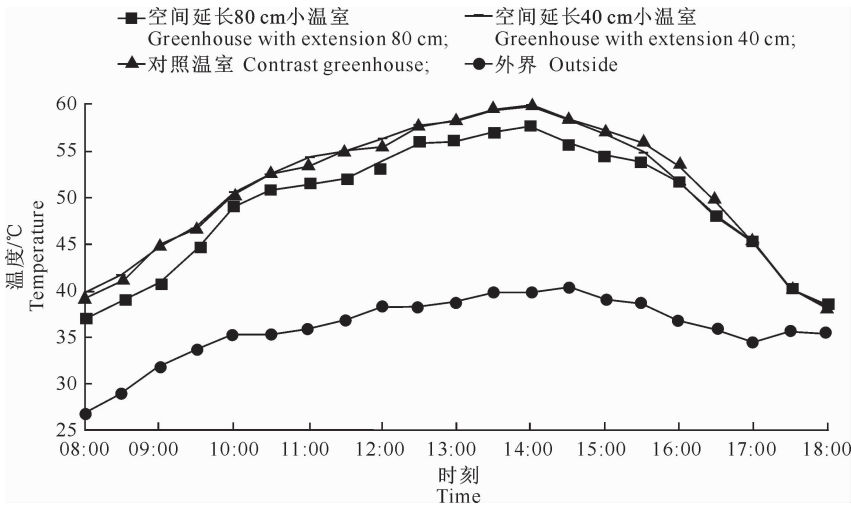


图 6 不同空间延长对全封闭小温室温度的影响

Fig. 6 Changes of temperature of the closed greenhouse affected by different spatial extensions

2.3 不同水循环方式对全封闭小温室温度的影响

不同水循环方式对全封闭小温室温度的影响见 图 7。

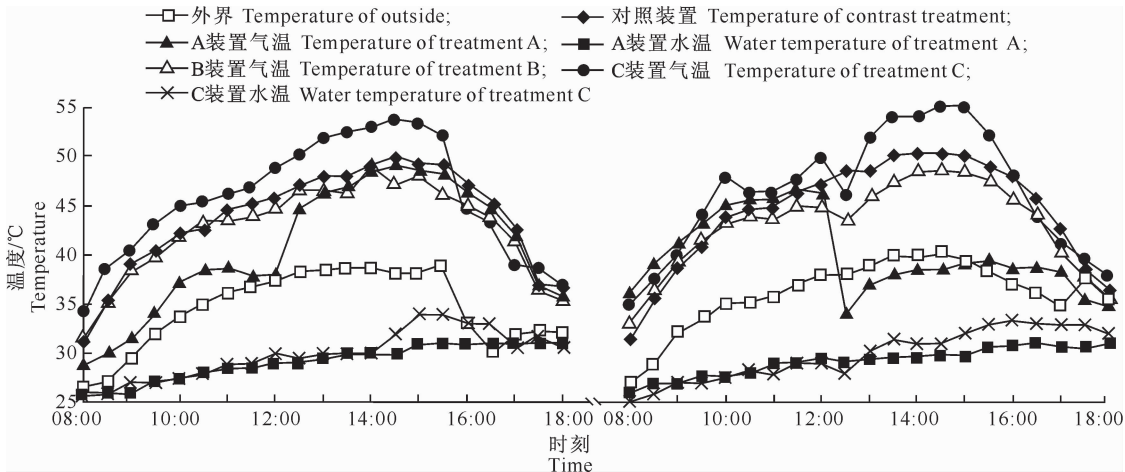


图 7 不同水循环方式对全封闭小温室温度的影响

Fig. 7 Changes of temperature in the closed greenhouse affected by hydrological cycle

从图 7 可以看出,不同水循环方式对全封闭小温室内的温度变化均有一定的影响。相比于对照装置而言,B 装置在 11:00 以后,有一定的降温作用,白天温度最大降幅为 4.8℃(第 2 天 12:30)。随着外界温度的降低,两者之间差距变小,降温效果不明显。这一方面是由于 1.2 m 高的 PVC 全封闭圆筒空间增大了 1 倍,另一方面是因为从地表到土壤深度 60 cm 处,深度每增加 10 cm,地温最高值出现的

时间要落后 2 h 左右^[15]。若土层深度 10 cm 处地温最高值出现的时间是 16:00,则土层深度 20 cm 处地温最高值出现的时间是 18:00,土层深度 30 cm 处地温最高值出现的时间是 20:00,这样滞后的地温会对温室的气温升高有一定缓冲而使其温度降低。对于 C 装置,其气温较对照装置明显增加,说明水桶中的水未能降低全封闭圆筒中的气温。在 1 d 的测量中发现,C 装置水的温度升高了 7℃,经过一夜后,水温与气温会达到一个新的平衡。

A 装置中,用 220 V、3 W 的水泵将水桶中的水抽取到双层圆筒的夹缝中再流回水桶,使水在全封闭圆筒的顶面和侧面循环利用,从而实现了水在全封闭小温室各受光面的循环。由本试验测定结果可知,第 1 天关闭水泵后,A 装置内的温度从高于外界 0.4℃升高至高于外界 6.5℃;第 2 天开启水泵后,该装置内的温度从高于外界 8.1℃降低至低于外界 3.8℃,说明开启水泵实现了小温室的大幅度降温。由此可见,静止在水桶中的水并不能有效降低全封闭小温室中的温度,而若将水在全封闭小温室各受光面循环,能起到很好的降温效果。本试验发现,在 1 d 的测量中,A 装置中水温也有 5℃左右的升高,与 C 装置相比其水温变化平滑缓慢,外界气温对其影响很小。经过一夜后,水温与气温也达到了一个新的平衡。

3 结论与讨论

1)利用不同覆盖层对全封闭小温室进行降温时,中空材料对全封闭温室内的降温效果不明显。但在双层中空玻璃小温室的 4 个受光面加入水层之后,在白天高温时段能明显降低全封闭小温室的温度,达到了较理想的降温效果。

2)利用空间延长法能够起到一定的降温作用,其中延长 80 cm 的空间可使全封闭小温室温度平均降低 4℃左右,空间延长 40 cm 时没有明显的降温作用。

3)利用水在全封闭小温室顶面和侧面的循环,可明显降低全封闭小温室的温度,降低最大可达 11.9℃。

综上所述,改传统的单层温室材料为双层中空材料对温度影响不大,而空气相对湿度在白天却有显著降低,但是由于各个覆盖层小温室内的空气相对湿度在白天时基本都处于适合植物生长的范围内,考虑到成本对双层中空材料暂不考虑。在小温室的 4 个受光面分别加入一层水之后,在高温时段

明显降低了全封闭小温室的温度,取得了比较理想的降温效果;此外,在晚上低温时段可以提高封闭小温室的温度,起到良好的保温作用,对冬天全封闭温室的保温设计有一定的参考价值。

空间延长对全封闭小温室有一定的降温效果,但只有在空间延长达到一定范围时,才能获得较理想的降温效果,而空间的延长必然会带来投资成本的增加,如何优化各个因素以取得更高的经济效益,以及对空间延长部分的结构、材料等还需要进一步研究与探索。

[参考文献]

- [1] Davise W J, Jianhua Z. Root signals and regulation of growth and development of plants in drying soil [J]. *Ann Rev Plant Physiol Plant Mol Biol*, 1991, 42: 55-76.
- [2] 葛志军, 傅理. 国内外温室产业发展现状与研究进展 [J]. *安徽农业科学*, 2008, 36(35): 15751-15753.
Ge Z J, Fu L. Development and current research of greenhouse industry in domestic and foreign [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2008, 36(35): 15751-15753. (in Chinese)
- [3] 赵纯清, 张继元, 丁淑芳. 除湿降温系统用于温室降温的可行性探索 [J]. *农机化研究*, 2004(5): 77-78.
Zhao C Q, Zhang J Y, Ding S F. The feasibility exploring about the dehumidifying and cooling system applying to greenhouse [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2004(5): 77-78. (in Chinese)
- [4] 李红莲, 邢文刚, 张娟, 等. 不同降温措施对连栋玻璃温室内温度的影响 [J]. *沈阳农业大学学报*, 2006, 37(2): 241-244.
Li H L, Xing W G, Zhang J, et al. Temperature influenced by different cooling measures in a multi-span greenhouse [J]. *Journal of Shenyang Agriculture University*, 2006, 37(2): 241-244. (in Chinese).
- [5] 胡建, 李伟清. 现代温室夏季降温技术研究 [J]. *农机化研究*, 2007(6): 18-21.
Hu J, Li W Q. Cooling technology of modern greenhouse in summer [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2007(6): 18-21. (in Chinese)
- [6] 王吉庆, 张百良. 几种降温措施在温室夏季降温中的应用研究 [J]. *农业工程学报*, 2006, 22(9): 257-260.
Wang J Q, Zhang B L. Application of some cooling measures for greenhouse cooling in summer [J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(9): 257-260. (in Chinese)
- [7] Speetjens S L, Stigter J D, van Straten G. Physics-based model for a water-saving greenhouse [J]. *Biosystems Engineering*, 2010, 105(2): 149-159.
- [8] Bot G P A, Challa H, Hemming S, et al. The Solar Greenhouse: State of the art in energy saving and sustainable energy supply [J]. *Acta Horticulturae*, 2005, 691(2): 501-508.