

# 主动蓄热体内部空气热交换系统的 传热性能及参数调控

曹晏飞, 周海渊, 鲍恩财, 蒋程瑶, 孙亚琛, 邹志荣

(西北农林科技大学 园艺学院, 农业部西北设施园艺工程重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

**摘 要:**利用日光温室提供主动蓄热体参数研究所需的环境条件,测试了不同风速、空气温度以及空气-土壤温度差对主动蓄热体内空气-土壤热交换系统的管道内部温度、进出口温差以及蓄放热能力的影响规律,以期获得主动蓄热体内部管道通风系统的传热效率及优化调控参数。结果表明:同一风速条件下,进出口温差随室内空气温度增加而增加。放热阶段,当进风口以风速  $0.5 \sim 4.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  运行时,系统放热量随着风速增加而增加,平均放热流量为  $9.8 \sim 73.9 \text{ W}$ ;蓄热阶段,当进风口以风速  $0.5 \sim 2.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  运行时,系统蓄热量随风速增加而增加,平均蓄热流量为  $21.4 \sim 70.2 \text{ W}$ ,当进风口以风速  $2.0, 4.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  运行时,平均蓄热流量仅相差  $2.7 \text{ W}$ ,性能系数 COP 相差不大。同一风速条件下,随着室内空气-土壤温度差值不断增大,进出风口温差也不断增加,同时建议白天风机开启蓄热时设定的室内空气温度最少应该比蓄热体内土壤温度高  $4.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

**关键词:**日光温室;主动蓄热体;空气-土壤热交换系统;风速;温差;热流量

中图分类号:S 625.1 文献标识码:A 文章编号:1001-0009(2019)03-0084-10

日光温室作为我国北方地区冬季越冬茬喜温蔬菜生产的主要园艺设施,近年来在我国北方地区得到了大面积的推广<sup>[1-2]</sup>,其中墙体蓄放热性能是日光温室满足冬季喜温作物生产的关键因素之一,白天可作为蓄热体吸收太阳能蓄积热量,夜间作为放热体可向室内释放热量,使得室内气温维持较高水平<sup>[3-6]</sup>。不过,随着日光温室的发展,其自身所存在问题也逐渐凸显出来,如单体面积小,机械化水平低,劳动强度大<sup>[7-8]</sup>,部分墙体厚度达  $5 \sim 6 \text{ m}$ <sup>[9-11]</sup>,占地面积大,土地利用率低<sup>[12]</sup>,与现

代农业设施发展中所需要的标准化、机械化、自动化、智能化相矛盾<sup>[13-14]</sup>。实心承重墙体是制约日光温室大型化、机械化发展的关键因素之一,温室墙体未来发展趋势是采用聚苯乙烯、聚氨酯、发泡水泥等导热系数低的材料建造单一保温功能的墙体<sup>[3,15]</sup>,但是这种单一保温功能墙体的设施内部缺乏成本低、节能优的蓄热模块,导致室内夜间温度较低<sup>[16]</sup>,所以开发低成本节能的蓄热模块是十分必要的。

目前针对装配式温室蓄热模块的研究表明,在温室内安装以水为媒介的主动蓄放热系统,装配式日光温室的夜间空气温度较普通砖墙日光温室高  $4.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$  以上<sup>[17]</sup>;大跨度拱形钢骨架温室夜间平均空气温度较普通砖墙日光温室高  $1.2 \sim 3.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[18]</sup>;同时安装水循环蓄热系统和空气-地中热交换系统,可使彩钢板保温装配式日光温室夜间空气温度较普通土墙日光温室提高  $2.3 \sim 3.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[19]</sup>。但这种水循环蓄热系统造价贵,取材

第一作者简介:曹晏飞(1986-),男,湖南娄底人,博士,讲师,现主要从事设施能源利用与环境调控等研究工作。  
E-mail:bmxbx@126.com.

基金项目:现代农业产业技术体系建设专项资金资助项目(CARS-23-C05);宁夏回族自治区重点研发计划重大资助项目(2016BZ0901);陕西省科技统筹创新工程资助项目(2016KTCL02-02)。

收稿日期:2018-08-01

不便,运营成本高,不利于在西北干旱半干旱地区大面积推广。结合西北地区自然资源现状,采用土、沙、石作为蓄热模块材料,具有蓄放热性能好,就地取材、节约耕地资源等方面的优势。

传统实心土壤有效蓄热层厚度仅为 30~40 cm<sup>[3,20]</sup>,而在实心土壤内部安装管道通风蓄热系统可有效提高蓄热层厚度<sup>[21]</sup>。课题组前期工作表明,在土壤蓄热体内部安装管道通风蓄热系统可形成主动蓄热体,即白天将温室内部高温空气通过风机导入蓄热体内部进行储热,夜间再通过风机将蓄热体内部热量释放到温室中补充热量损失<sup>[22-24]</sup>。管道通风蓄热系统是主动蓄热体的关键组成部分,目前虽有关于不同材质管道对通风蓄热系统的蓄放热效果的报道<sup>[25]</sup>,但并未明确管道通风系统的具体调控参数,同时缺乏不同因素对热传递效率影响的深入研究。

该试验设计了一个主动蓄热体单元,并在实际温室环境条件下,探究不同因素对主动蓄热体内管道通风蓄热系统蓄热放热特性的影响规律,以期将来在大跨度、装配式温室中搭建主动蓄热体提供理论设计依据。

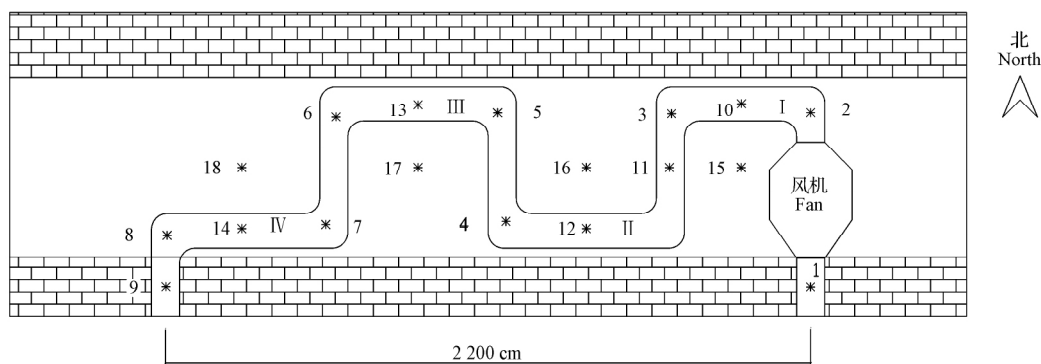
## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试日光温室位于陕西杨凌(北纬 34°16',东

经 108°4'),温室长 52.0 m,净跨度 8.0 m,北墙高 2.2 m、厚 1.0 m,外加 10 cm 厚聚苯板,脊高 3.5 m,墙体材料为粘土砖,温室前屋面采用保温被覆盖。主动蓄热体单元置于温室中部,长 3.0 m,高 1.6 m,宽 500 mm,东西走向,蓄热材料为土壤,南北两侧砌 240 mm 砖作为蓄热体的围护支撑结构。

蓄热体通风管道进气口安装风机,将室内热空气送入蓄热体内部,通风管道由透气性管材与非透气性管材组合而成,为了延长管道内空气与土壤的换热时间,在墙体内部呈水平首尾相接串联型布置,长度为 3.7 m,进出风口距离为 2.2 m,距地面高度为 1.0 m(图 1)。蓄热体内部土壤蓄热过程(图 2)中通风管道中非透气性管材选用直径为 90 mm 的 PVC 管,每段 PVC 管长度为 350 mm。根据课题组前期研究,PVC 管的有效蓄热层厚度略大于 240 mm<sup>[25]</sup>,因此设计 2 根 PVC 管之间的距离为 550 mm。又根据研究透气性管道的有效蓄热层厚度远大于 240 mm<sup>[25]</sup>,因此蓄热体中东西方向布置的管道选用外部缠绕黑色地布的钢笼(steel cage surrounded by black cloth,SCSBC)。考虑到直径为 90 mm 的 PVC 管弯头直径为 110 mm,因此设计钢笼直径为 110 mm,长度为 2 根 PVC 管之间的距离,即 550 mm。



注:东西方向布置的 I、II、III、IV 号管道为 SCSBC,其它管道为 PVC; \* 表示温度测点。

Note: I, II, III, IV pipes arranged in the east-west direction are SCSBC and other pipes are PVC, \* indicates temperature measuring point.

图 1 蓄热体内换热管道水平布置

Fig. 1 Horizontal layout of heat exchange pipes inside heat storage body

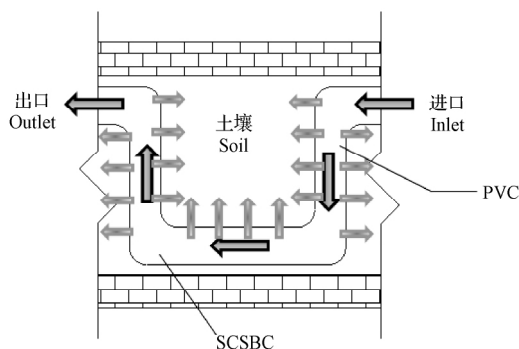


图2 蓄热体内土壤蓄热机理

Fig. 2 Heat storage mechanism of soil inside heat storage body

## 1.2 试验方法

为了更准确地了解通风换热管道内部的传热特性以及土壤的蓄放热特性,沿管道布置温度测点(图1, T1~T14)以及土壤温度测点(图1, T15~T18),管道温度测点与土壤温度测点在同一水平面上,距离地面高度为1.0 m, SCSBC、PVC管道上下表面布置温度测点。日光温室内布置1个空气温度测点,高度为1.0 m,布置在温室正中间位置。试验中温度传感器全部采用T型热电偶,测量精度为 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ,数据采集模块34901A,数据采集器为安捷伦34972A(美国是德科技公司),数据采集间隔为10 min。

风机为宁波真如环境科技有限公司生产的管道增压风机,安装于进气管道一端,风量为 $127\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ ,所对应的电机功率为22 W,运行时间为08:00—16:00,进出口风速采用分体式风速计AS8336(希玛仪表)测量,范围为 $0\sim 45\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,分辨率 $0.001\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。利用透气性棉布遮盖管道进风口调整风速,当进风口以 $0.5$ 、 $1.0$ 、 $2.0$ 、 $4.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的风速运转时,出风口风速分别为 $0.24$ 、 $0.60$ 、 $1.25$ 、 $2.15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

## 1.3 项目测定

试验温室内没有定植作物,室内气候干燥,为了计算方便,假设空气-土壤热交换过程中换热管内无冷凝现象,系统蓄热时,温室内高温空气流经换热管道时的热量交换量为蓄热量,单位时间内系统的蓄热量即为蓄热流量,计算式为

$$q_{\text{in}} = \frac{1}{4} C_{p, \text{air}} \rho v \pi d^2 (T_{xi} - T_{x0}) \quad (1),$$

式中: $q_{\text{in}}$  热交换系统的蓄热流量, W;  $C_{p, \text{air}}$  空气的比热,  $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$ , 取值  $1.004\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$ ;  $\rho$  空气的密度,  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , 取值  $1.29\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  $v$  出风口空气流速,  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $d$  换热管道管径, m;  $T_{xi}$  换热管道的进口温度,  $^\circ\text{C}$ ;  $T_{x0}$  换热管道的出口温度,  $^\circ\text{C}$ 。

空气-土壤热交换系统的蓄热量计算式为

$$Q_{\text{in}} = \sum q_{\text{in}} \Delta t \quad (2),$$

式中: $Q_{\text{in}}$  热交换系统的蓄热量, kJ。

空气-土壤热交换系统散热时,温室内低温空气流经换热管道时的热量交换量为散热量,单位时间内系统的散热量即为散热流量,计算式为

$$q_{\text{out}} = \frac{1}{4} C_{p, \text{air}} \rho v \pi d^2 (T_{x0} - T_{xi}) \quad (3),$$

式中: $q_{\text{out}}$  热交换系统的散热流量, W。

空气-土壤热交换系统的散热量计算式为

$$Q_{\text{out}} = \sum q_{\text{out}} \Delta t \quad (4),$$

式中: $Q_{\text{out}}$  热交换系统的散热量, kJ。

空气-土壤热交换系统的性能系数 COP (Coefficient of performance) 计算式为

$$\text{COP} = Q/P \quad (5)。$$

式中: $Q$  空气-土壤热交换系统单位时间换热量,  $P$  风机功率, W。

## 1.4 数据分析

采用 Excel 2007、SigmaPlot 10.0 软件进行数据分析及图表制作;利用软件 SPSS 20.0 统计软件进行显著性和线性回归分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 空气温度与风速变化的影响

#### 2.1.1 日光温室室内空气温度变化规律

为了尽量减少不同天气条件下室内空气温度不一致对空气-土壤热交换系统性能影响分析所带来的误差,该研究统一选用典型晴天进行分析(下同2.2.1),进风口风速为 $0.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (2017-12-20)、 $1.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (2017-12-19)、 $2.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (2017-12-18)、 $4.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (2017-12-23),研究日光温室室内空气温度在风机运行期间(08:00—16:00)的变化(图3)。可知,不同风速下日光温室室内空气温度变化趋势一致。进风口风速为 $0.5$ 、 $1.0$ 、 $2.0$ 、 $4.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 条件下,风机运行期间

日光温室室内平均空气温度分别为 32.0、29.1、31.2、31.4℃,不存在显著性差异( $P<0.05$ )。由此可知,风机运行期间不同风速下日光温室室内平均空气温度差距较小,空气-土壤热交换系统性能的差异不是由不同天气室内温度差异造成的。

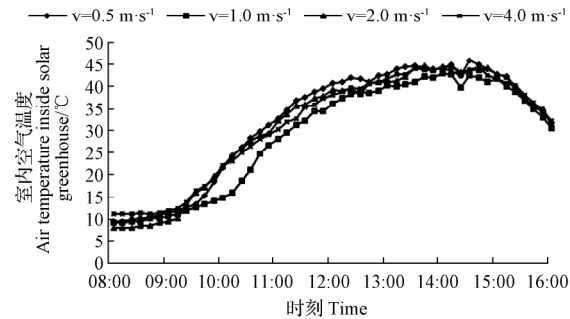


图 3 不同晴天室内空气温度在 08:00—16:00 期间的变化

Fig 3 Variations of indoor air temperature during 08:00—16:00 under different sunny days

2.1.2 空气温度与风速对换热管道内温度的影响  
典型晴天条件下,进风口风速分别为 0.5 m·s<sup>-1</sup> (2017-12-20)、1.0 m·s<sup>-1</sup> (2017-12-19)、2.0 m·s<sup>-1</sup> (2017-12-18)、4.0 m·s<sup>-1</sup> (2017-12-23)时,研究沿换热管道各测点温度在不同室内

空气温度下的变化。由表 1 可知,同一风速条件下,随着室内空气温度上升,进出风口温差不断增加。以进风口风速 0.5 m·s<sup>-1</sup> 为例,当室内空气温度为 10.0℃时,温差为-6.3℃,表明该温度条件下温室内低温空气经换热管道后,空气温度增加,空气-土壤热交换系统处于放热状态;当室内空气温度上升到 31.2℃时,温差增加到了 5.8℃,说明该温度条件下室内高温空气经换热管道后,空气温度下降,空气-土壤热交换系统已经处于蓄热状态;当室内空气温度继续上升到 40.8℃时,温差可达到 11.3℃,说明风速 0.5 m·s<sup>-1</sup> 条件下,空气温度每上升 10℃,温差平均增加 5.9℃。当风速为 1.0、2.0、4.0 m·s<sup>-1</sup> 时,空气温度每上升 10℃,温差分别平均增加 5.7、4.9、3.8℃,说明随着风速的增加,温差增加幅度在逐渐减少。

同一空气温度条件下,随着入口风速的增加,空气-土壤热交换系统进出口温差逐渐下降,这与文献[26]结果一致。这是由于风速越大,空气-土壤热交换系统内空气与土壤换热时间越短,土壤与换气换热越不充分。同一入口风速条件下,随着空气温度不断增加,空气-土壤热交换系统进出口温差不断增加。

表 1 不同风速和空气温度下沿管道不同测点温度的变化

Table 1 Variation of temperatures at different measuring points along pipelines under different air velocities and air temperatures

|                                                 |                 | 0.5 m·s <sup>-1</sup> (2017-12-20) |      |      |      | 1.0 m·s <sup>-1</sup> (2017-12-19) |      |      |      | 2.0 m·s <sup>-1</sup> (2017-12-18) |      |      |      | 4.0 m·s <sup>-1</sup> (2017-12-23) |      |      |      |
|-------------------------------------------------|-----------------|------------------------------------|------|------|------|------------------------------------|------|------|------|------------------------------------|------|------|------|------------------------------------|------|------|------|
| 空气温度                                            |                 | 10.0                               | 21.6 | 31.2 | 40.8 | 10.1                               | 21.2 | 31.4 | 40.4 | 10.2                               | 21.9 | 32.4 | 40.9 | 11.4                               | 21.9 | 32.0 | 40.8 |
| 测点                                              | Air temperature |                                    |      |      |      |                                    |      |      |      |                                    |      |      |      |                                    |      |      |      |
|                                                 | T1              | 13.9                               | 20.9 | 28.8 | 36.3 | 9.6                                | 18.0 | 27.5 | 36.2 | 9.4                                | 18.5 | 28.1 | 36.2 | 10.9                               | 18.9 | 28.3 | 37.3 |
|                                                 | T2              | 19.5                               | 24.5 | 31.1 | 37.3 | 15.3                               | 21.3 | 29.5 | 37.8 | 13.4                               | 21.3 | 29.6 | 37.9 | 13.8                               | 20.8 | 29.7 | 38.3 |
|                                                 | T3              | 19.8                               | 23.5 | 28.5 | 33.8 | 15.7                               | 20.8 | 28.1 | 35.7 | 13.7                               | 20.6 | 28.3 | 36.0 | 13.9                               | 20.6 | 29.4 | 37.5 |
|                                                 | T4              | 20.5                               | 22.6 | 26.2 | 29.9 | 16.8                               | 20.4 | 26.3 | 32.6 | 14.6                               | 20.1 | 26.5 | 33.0 | 15.1                               | 20.2 | 27.9 | 35.2 |
|                                                 | T5              | 20.5                               | 22.4 | 25.3 | 28.2 | 17.3                               | 20.4 | 25.6 | 31.1 | 15.1                               | 19.9 | 25.4 | 31.5 | 15.6                               | 20.3 | 27.3 | 34.3 |
|                                                 | T6              | 20.3                               | 21.9 | 24.2 | 26.9 | 17.5                               | 20.0 | 24.6 | 29.8 | 15.2                               | 19.4 | 24.6 | 30.2 | 15.9                               | 20.2 | 27.0 | 33.6 |
|                                                 | T7              | 20.3                               | 21.6 | 23.9 | 26.3 | 17.5                               | 19.9 | 24.3 | 29.1 | 15.3                               | 19.2 | 24.3 | 29.6 | 16.2                               | 19.9 | 26.6 | 32.9 |
|                                                 | T8              | 20.4                               | 21.3 | 23.3 | 25.2 | 18.0                               | 19.9 | 23.7 | 27.9 | 15.7                               | 19.2 | 23.4 | 28.3 | 16.9                               | 20.0 | 25.8 | 31.9 |
|                                                 | T9              | 20.2                               | 21.4 | 23.0 | 25.0 | 18.1                               | 19.9 | 23.5 | 27.6 | 15.9                               | 19.0 | 23.1 | 27.9 | 16.9                               | 20.1 | 25.8 | 31.7 |
| 进出口温差                                           |                 |                                    |      |      |      |                                    |      |      |      |                                    |      |      |      |                                    |      |      |      |
| Temperature difference between inlet and outlet |                 | -6.3                               | -0.5 | 5.8  | 11.3 | -8.5                               | -1.9 | 4.0  | 8.6  | -6.5                               | -0.5 | 5.0  | 8.3  | -6.0                               | -1.2 | 2.5  | 5.4  |

当室内空气温度大于 21℃后,墙体空气-土壤热交换才开始逐渐进入蓄热阶段,因此在不考虑风机的条件下,选择以 2 号测点作为换热管道的起始

点,在进风口风速为 0.5、1.0、2.0、4.0 m·s<sup>-1</sup>下,研究沿管道内部测点温度随室内空气温度的变化(图 4)。

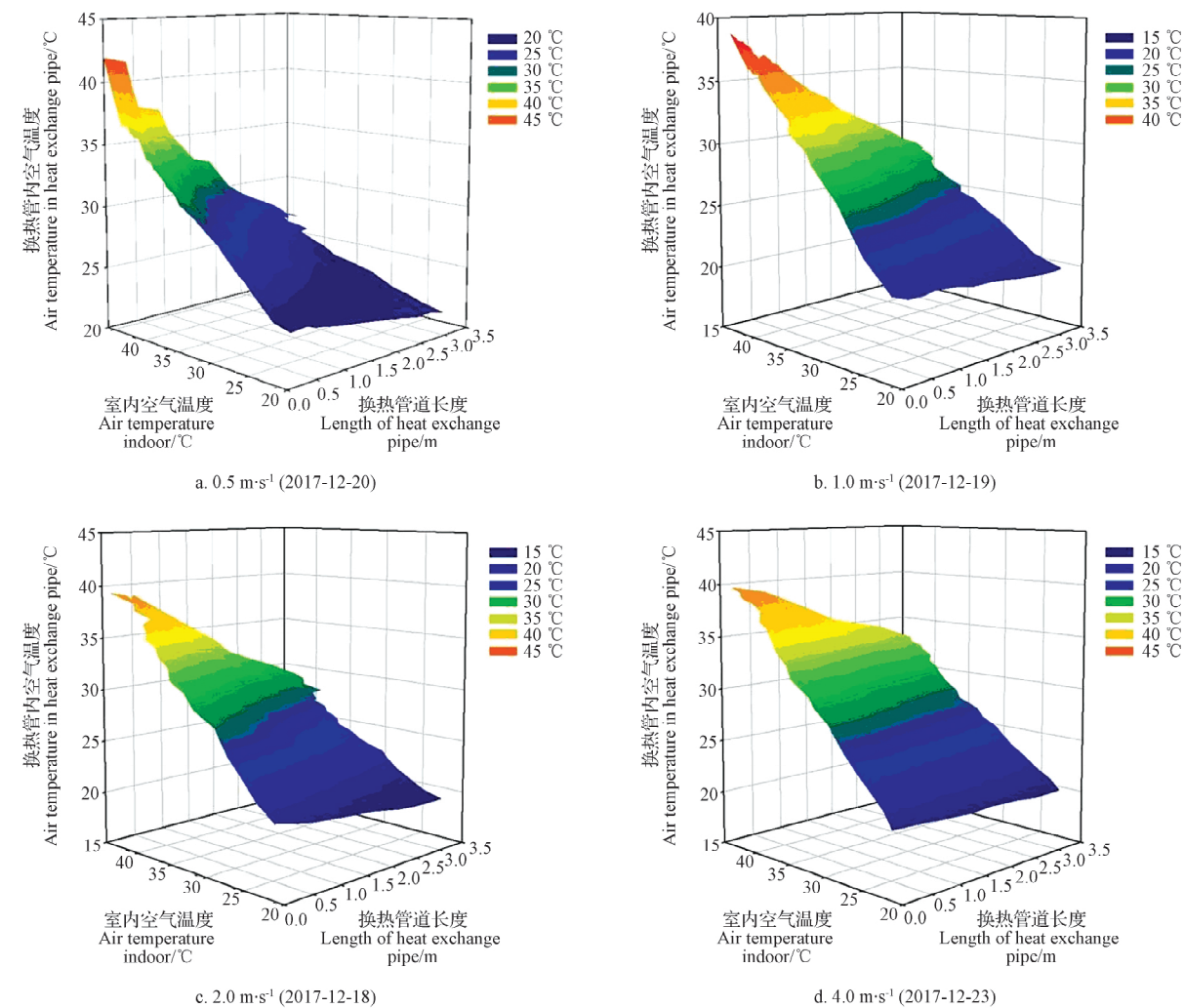


图4 蓄热阶段不同风速下换热管道内部温度变化

Fig.4 Variation of internal temperature of heat exchange pipe under different wind speeds in the heat storage stage

由图4可知,随着室内空气温度的上升,管道内部各测点温度不断增加。随着换热管道长度的增加,温度上升幅度减小。不同进风口风速下管道内各测点温度上升的幅度也并不相同。0.5、1.0、2.0、4.0 m·s<sup>-1</sup> 风速下换热管道内部温度 Z 与管道长度 X<sub>1</sub>、室内空气温度 X<sub>2</sub> 的线性回归方程如表2所示,说明不同风速下线性回归方程的相关性系数 R<sup>2</sup> 均大于 0.9,说明相关性较好。

文献[22]描述当入口风速为 1.7 m·s<sup>-1</sup>,空气温度为 30℃,出口温度为 9℃时,风道 20 m 之后温度基本与墙体温度一致。由表2可知,入口风速为 2 m·s<sup>-1</sup> 的线性回归方程,当空气温度 X<sub>2</sub> 为 30℃,管道内部温度 Z 为 9℃时,计算得出管道长度 X<sub>1</sub> 为 8.7 m,再根据目前通风系统进出

口距离与管道长度的比例,计算得出通风系统进风口距离为 5.2 m,意味着通风管道按照这种“弓”字型布置,仅需建造长度为 5.2 m 墙体,而按照文献[22]的通风管道布置方式,需要建造墙体的长度达 20 m。

表2 不同风速下线性回归方程

Table 2 Linear regression equation under different wind speed

| 风速<br>Wind speed<br>/(m·s <sup>-1</sup> ) | 线性回归方程<br>Linear regression<br>equation           | 相关系数 R <sup>2</sup><br>Correlation<br>coefficient |
|-------------------------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| 0.5                                       | Z=17.495-3.166X <sub>1</sub> +0.439X <sub>2</sub> | 0.905                                             |
| 1.0                                       | Z=10.315-2.234X <sub>1</sub> +0.627X <sub>2</sub> | 0.958                                             |
| 2.0                                       | Z=8.721-2.272X <sub>1</sub> +0.668X <sub>2</sub>  | 0.958                                             |
| 4.0                                       | Z=6.286-1.450X <sub>1</sub> +0.749X <sub>2</sub>  | 0.984                                             |

### 2.1.3 空气-土壤热交换系统的蓄放热变化规律

风机在 08:00—16:00 期间运行,温室揭帘时间为 08:30—09:00,研究不同风速下换热管道进出口温差(图 5)及流量变化(图 6)。由图 6 可知,空气-土壤热交换系统在 10:00—10:30 以前一直处于放热状态,风速为 0.5、1.0、2.0、4.0  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  所对应的最大温差分别为 6.4、9.3、8.9、6.9  $^{\circ}\text{C}$ ,所对应的最大散热流量分别为 12.7、46.0、91.4、122.0 W, COP 值分别为 0.58、2.09、4.15、5.55,平均温差分别为 5.0、6.6、5.6、4.2  $^{\circ}\text{C}$ ,平均散热流量分别为 9.8、32.5、57.4、73.9 W,单位长度管道平均散热流量分别为 2.6、8.8、15.5、20.0  $\text{W} \cdot \text{m}^{-1}$ ,单位长度墙体平均散热流量分别为 4.5、14.8、26.1、33.6  $\text{W} \cdot \text{m}^{-1}$ ,说明通风管道采用“弓”字型布置,不同风速下单位长度墙体平均散热流量分别提高了 73.1%、68.2%、68.4%、68%,总散热量分别为 70.5、292.3、413.4、576.5 kJ。说明随着进风口风速的增加,空气-土壤热交换系统的散热量不断增加,这与文献[27]的研究结果一致。

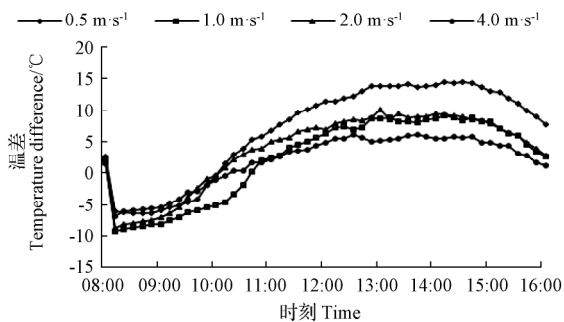


图 5 不同风速下热交换管道进出口温差变化

Fig. 5 Variation of temperature difference between inlet and outlet of heat exchange pipe under different wind speeds

在 10:00—10:30 空气-土壤热交换系统处于蓄热状态,风速为 0.5、1.0、2.0、4.0  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  所对应的最大温差分别为 14.5、9.2、10.1、6.2  $^{\circ}\text{C}$ ,所对应的最大蓄热流量分别为 28.6、45.2、104.1、109.1 W, COP 值分别为 1.30、2.05、4.73、4.96,平均温差分别为 10.8、6.4、6.8、4.1  $^{\circ}\text{C}$ ,平均蓄热流量分别为 21.4、31.5、70.2、72.9 W,单位长度管道平均蓄热流量分别为 5.8、8.5、19.0、19.7  $\text{W} \cdot \text{m}^{-1}$ ,单位长度墙体平均蓄热流量分别

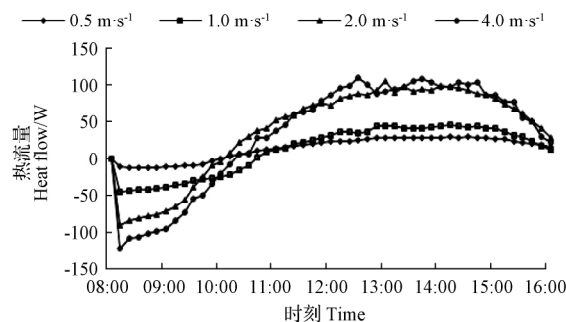


图 6 不同风速下空气-土壤热交换系统热流量变化

Fig. 6 Variation of heat flow in earth to air heat exchanger system under different wind speeds

为 9.7、14.3、31.9、33.1  $\text{W} \cdot \text{m}^{-1}$ ,说明通风管道采用“弓”字型布置,不同风速下单位长度墙体平均蓄热流量分别提高了 67.2%、68.2%、67.9%、68%,总蓄热量分别为 462.4、623.8、1517.1、1530.2 kJ。说明当进风口以风速 0.5 ~ 2.0  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  运行时,系统蓄热量随风速增加而不断增加,这与文献[28]的研究结果一致,而当系统进风口以风速 2.0、4.0  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  运行时,蓄热流量相差不多。

## 2.2 空气-土壤温度差的影响

### 2.2.1 日光温室室内空气温度变化规律

以典型晴天进行分析,进风口风速为 4.0  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,研究不同土壤温度条件下日光温室室内空气温度在风机运行期间(08:00—16:00)的变化。由图 7 可知,不同风速下日光温室室内空气温度变化趋势一致。土壤温度为 13.8  $^{\circ}\text{C}$

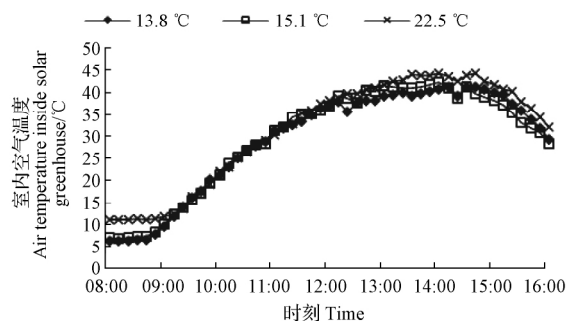


图 7 不同晴天室内空气温度在 08:00—16:00 期间的变化

Fig. 7 Variations of indoor air temperature during 08:00—16:00 under different sunny days

(2017-12-09)、15.1℃(2017-12-15)、22.5℃(2017-12-23)条件下,风机运行期间日光温室室内平均空气温度分别为29.3、29.5、31.4℃,不存在显著性差异( $P<0.05$ )。由此可知,3个典型晴天(2017-12-09、2017-12-15、2017-12-23)日光温室室内平均空气温度差距较小,可减少空气温度给试验结果带来的偏差。

### 2.2.2 空气-土壤温度差对换热管道内温度的影响

典型晴天条件下,进风口风速为 $4.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,00:00—08:00平均土壤温度分别为13.8℃(2017-12-09)、15.1℃(2017-12-15)、22.5℃(2017-12-23),研究沿换热管道各测点温度在不同室内空气温度下的变化。由表3可知,同一土壤温度条件下,随着室内空气温度上升,空气-土

壤温度差是不断增加的,进出风口温差是不断增加的。以土壤温度13.8℃为例,当室内空气温度为11.7℃时,空气-土壤温度差为-2.1℃,进出口温差为-2.5℃,表明空气温度小于土壤温度,空气-土壤热交换系统处于放热状态;当室内空气温度上升到21.3℃时,空气-土壤温度差为7.5℃,进出口温差增加到了1.4℃,说明空气温度大于土壤温度,空气-土壤热交换系统已经处于蓄热状态;而当土壤温度为15.1、22.5℃时,空气-土壤温度差分别为6.2、-0.6℃,进出口温差分别为0、-1.2℃,说明同一空气温度条件下,空气-土壤热交换系统有可能处于放热状态,也有可能处于蓄热状态,应根据空气-土壤温度差来进行判定,这可为空气-土壤热交换系统的自动化控制提供参考。

表3 不同空气温度和土壤温度下沿管道不同测点温度的变化

Table 3 Variation of temperatures at different measuring points along pipelines under different air temperatures and soil temperatures ℃

| 平均土壤温度<br>Average soil temperature                          |    | 13.8℃(2017-12-09) |      |      |      | 15.1℃(2017-12-15) |      |      |      | 22.5℃(2017-12-23) |      |      |      |
|-------------------------------------------------------------|----|-------------------|------|------|------|-------------------|------|------|------|-------------------|------|------|------|
| 空气温度<br>Air temperature                                     |    | 11.7              | 21.3 | 31.9 | 40.0 | 12.3              | 21.3 | 31.3 | 40.4 | 11.4              | 21.9 | 32.0 | 40.8 |
| 空气-土壤温度差<br>Air-soil temperature difference                 |    | -2.1              | 7.5  | 18.1 | 26.2 | -2.8              | 6.2  | 16.2 | 25.3 | -11.1             | -0.6 | 9.5  | 18.3 |
| 测点<br>Measuring points                                      | T1 | 9.9               | 17.5 | 27.2 | 35.9 | 9.7               | 17.6 | 26.4 | 34.0 | 10.9              | 18.9 | 28.3 | 37.3 |
|                                                             | T2 | 11.7              | 18.8 | 27.9 | 36.3 | 11.9              | 19.3 | 27.2 | 35.0 | 13.8              | 20.8 | 29.7 | 38.3 |
|                                                             | T3 | 11.7              | 18.2 | 27.1 | 35.3 | 11.9              | 18.8 | 26.4 | 34.1 | 13.9              | 20.6 | 29.4 | 37.5 |
|                                                             | T4 | 11.9              | 17.5 | 25.0 | 32.5 | 12.1              | 18.1 | 24.7 | 31.7 | 15.1              | 20.2 | 27.9 | 35.2 |
|                                                             | T5 | 12.1              | 17.1 | 24.4 | 31.2 | 12.5              | 17.9 | 24.0 | 30.7 | 15.6              | 20.3 | 27.3 | 34.3 |
|                                                             | T6 | 12.0              | 16.7 | 23.7 | 30.4 | 12.5              | 17.5 | 23.4 | 29.9 | 15.9              | 20.2 | 27.0 | 33.6 |
|                                                             | T7 | 12.1              | 16.7 | 23.0 | 29.7 | 12.4              | 17.2 | 22.9 | 29.2 | 16.2              | 19.9 | 26.6 | 32.9 |
|                                                             | T8 | 12.3              | 16.4 | 22.1 | 28.2 | 12.6              | 16.9 | 22.2 | 28.0 | 16.9              | 20.0 | 25.8 | 31.9 |
|                                                             | T9 | 12.4              | 16.1 | 22.0 | 27.9 | 12.9              | 17.6 | 21.9 | 27.8 | 16.9              | 20.1 | 25.8 | 31.7 |
| 进出口温差<br>Temperature difference<br>between inlet and outlet |    | -2.5              | 1.4  | 5.2  | 8.0  | -3.2              | 0    | 4.5  | 6.2  | -6.0              | -1.2 | 2.5  | 5.4  |

当室内空气温度达到40.0~40.8℃时,土壤温度分别为13.8、15.1、22.5℃时,空气-土壤温度差则分别为26.2、25.3、18.3℃,进出口温差分别为8.0、6.2、5.4℃。说明同一空气温度条件下,空气-土壤温度差越大进出口温差越大,蓄热效果越好。

由图8可知,随着空气-土壤温度差的增加,进出口温度差不断增加,计算得出相关系数 $R$ 大于0.9,说明模拟效果较好。在目前关于空气-土

壤通风蓄热系统中白天风机开启时间缺少理论依据,控制方法多种多样,如文献[24]中风机启动时间根据室外光伏板自动供电系统来控制,文献[21]中风机晴天启动时间设定为10:00—15:00,文献[29]中风机启动设定温度为25℃。该研究发现土壤-热交换系统蓄热开始时间与室内空气温度、土壤温度有关,根据图8线性方程 $Y=0.3616(T_{\text{air}}-T_{\text{soil}})-1.6439$ ,则土壤-热交换系统蓄热开始空气温度 $T_{\text{air}}=T_{\text{soil}}+4.5$ ,意味着白

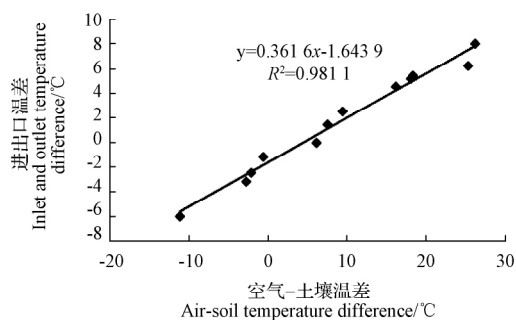


图8 进出口温差随空气-土壤温差的变化

Fig. 8 Variations of inlet and outlet temperature difference with air-soil temperature difference

天蓄热风机开启时,室内空气温度最少应该大于蓄热体土壤温度  $4.5^{\circ}\text{C}$ 。

### 2.3 墙体内部土壤温度变化规律

选取典型晴天(2017-12-18—19),进风口风速为  $2.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,研究墙体内部不同测点土壤温度变化。由图9可知,测点 T15 的平均土壤温度为  $21.0^{\circ}\text{C}$ ,比测点 T16、T17、T18 分别高  $1.2$ 、 $1.3$ 、 $2.6^{\circ}\text{C}$ ,说明距进风口越近,土壤温度越高。其中,在 08:00—10:30 期间空气-土壤热交换系统处于放热过程,土壤向换热管道释放热量,土壤温度不断下降,距离进风口位置不同时,土壤降温效果不同,测点 T15 土壤温度的降温幅度最大,为  $0.3^{\circ}\text{C}$ ,而其它点土壤温度变化平缓。在 10:30—16:00 期间,空气-土壤热交换系统处于蓄热过程,土壤吸收空气中的热量,土壤温度不断上升。距离进风口位置不同时,土壤升温效果不同,测点 T15 土壤温度的升温幅度最大,为  $1.8^{\circ}\text{C}$ ,而其它测点土壤变化平缓。18:00 至翌日 08:00 期间,测点 15 土壤温度缓慢下降,而测点 T16、T17、T18 土壤温度缓慢上升,这可能是由于不同测点之间的土壤温度相差较大,土壤之间存在热量传递。翌日 08:00 不同测点的土壤温度较前一天 08:00 的土壤温度有所提高,平均提高了  $1.6^{\circ}\text{C}$ ,其中测点 T15、T16、T17、T18 土壤温度分别升高了  $1.8$ 、 $1.6$ 、 $1.5$ 、 $1.4^{\circ}\text{C}$ 。由 2.1.2 可知,风速  $2.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,总散热量为  $413.4\text{ kJ}$ ,总蓄热量为  $1517.1\text{ kJ}$ ,说明有  $1103.7\text{ kJ}$  的热量蓄积在墙体土壤中用于提高土壤温度。李明等<sup>[30]</sup>在泡沫砖墙温室内砌筑高度为  $2\text{ m}$  的墙体,

内部填充厚度为  $45\text{ cm}$  的土壤进行蓄放热,晴天放热区域为  $17\text{ cm}$ ,可满足温室生产。土壤温度测点 T15、T16、T17、T18 在一天中的温度波动幅度分别为  $2.3$ 、 $1.8$ 、 $1.6$ 、 $1.6^{\circ}\text{C}$ ,依据文献[3]提出的温波法,该试验中距南墙距离为  $49\text{ cm}$  的土壤处于蓄热层中,说明该主动蓄热墙体可直接应用于仅有保温隔热单一功能的围护结构墙体温室进行储放热。

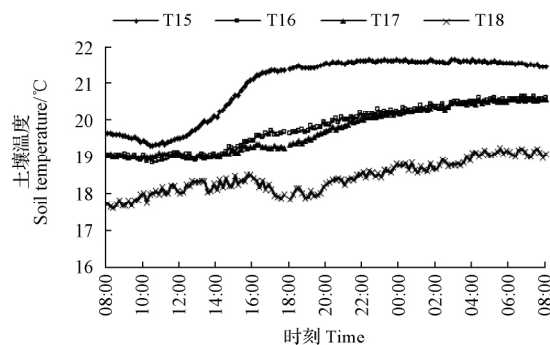


图9 墙体内部土壤温度变化(2017-12-18—19)

Fig. 9 Variation of soil temperature inside wall (2017-12-18—19)

### 2.4 换热管道表面温度变化规律分析

选取典型晴天(2017-12-18—19),进风口风速为  $2.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,研究不同材料换热管道表面温度变化。由图10可知,SCSBC与PVC管道表面温度变化趋势一致,在 08:00—16:00 二者温度相差较大。风机开启后,由于室内低温空气进入空

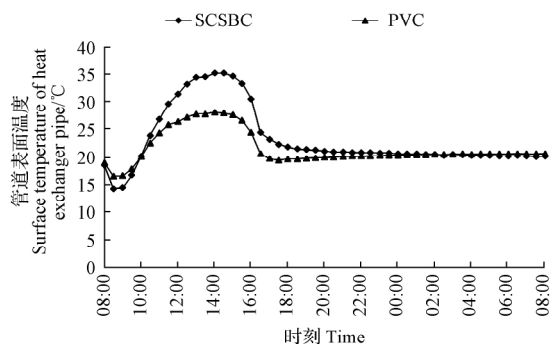


图10 典型晴天换热管道表面温度变化(2017-12-18—19)

Fig. 10 Variation of surface temperature of heat exchanger pipe in a typical sunny day (2017-12-18—19)



气-土壤热交换系统后吸收热量,SCSBC与PVC管道表面温度均下降,下降幅度分别为3.8、2.2℃。空气-土壤热交换系统进入蓄热状态后,SCSBC与PVC管道表面温度均上升,最大温度分别为35.3、28.0℃,08:00—16:00 SCSBC管道表面平均温度为27.4℃,比PVC管道表面平均温度高3.6℃,说明白天有更多的热量可以通过SCSBC管道传递到土壤中。17:00盖帘后,SCSBC与PVC管道表面之间温度差异不断变小。其中,20:30至翌日08:00 SCSBC与PVC管道表面之间温度差异在1℃以内。

### 3 结论

该研究对不同风速、空气温度和空气-土壤温度差下的温室墙体空气-土壤热交换系统的蓄放热性能进行了分析,得出如下结论。

1)冬季晴天,同一风速条件下,随着室内空气温度不断增加,进出口温差不断增加,空气-土壤热交换系统的蓄热量不断增加,其中当空气温度为40.4~40.9℃时,风速0.5、1.0、2.0、4.0 m·s<sup>-1</sup>所对应的进出风口温差可分别达到11.3、8.6、8.3、5.4℃,不过由于实际生产日光温室中植物生长所需的最高温度远小于40℃,因此下一步有必要研发在不影响室内作物正常生长的条件下,同时又能来提升进风口空气温度的增温装置。

2)通风管道首尾相接串联型布置有助于延长空气-土壤热交换系统中空气与土壤的换热时间,提升单位长度蓄热体的蓄放热流量。

3)进风口风速在0.5~4.0 m·s<sup>-1</sup>范围内,空气-土壤热交换系统的放热量随着风速增加而不断增加;当风速小于2.0 m·s<sup>-1</sup>时,系统蓄热量随风速增加而增加,当风速以2.0、4.0 m·s<sup>-1</sup>运行时,系统蓄热量相差不大,COP值也相差不大,因此建议土壤-空气热交换系统运行风速设置为2.0 m·s<sup>-1</sup>。

4)同一风速条件下,随着室内空气-土壤温度差值增大,进出风口的温差不断增加,蓄热量也不断增加。建议白天风机开启蓄热时设定的室内空气温度最少应该大于蓄热体内土壤温度4.5℃。

### 参考文献

[1] 徐凡,马承伟,曲梅,等.华北五省区日光温室微气候环境调

查与评价[J].中国农业气象,2014,35(1):17-25.

[2] 魏晓明,周长吉,曹楠,等.中国日光温室结构及性能的演变[J].江苏农业学报,2012,28(4):855-860.

[3] 李明,周长吉,魏晓明.日光温室墙体蓄热层厚度确定方法[J].农业工程学报,2015,31(2):177-183.

[4] 马承伟,卜云龙,籍秀红,等.日光温室墙体夜间放热量计算与保温蓄热性评价方法的研究[J].上海交通大学学报(农业科学版),2008,26(5):411-415.

[5] SETHI V P,SHARMA S K. Survey and evaluation of heating technologies for worldwide agricultural greenhouse applications[J]. Solar Energy,2008,82(9):832-859.

[6] 李建设,白青,张亚红.日光温室墙体与地面吸放热量测定分析[J].农业工程学报,2010,26(4):231-236.

[7] 张锐.日光温室机械化作业严重不足应予重视[J].农机科技推广,2013(9):40.

[8] 张永钦,陈希锋.推广大棚蔬菜生产机械化技术的实践与思考[J].现代农机,2015(2):20-22.

[9] 陈青云.日光温室的实践与理论[J].上海交通大学学报(农业科学版),2008,26(5):343-350.

[10] 史宇亮,王秀峰,魏琨,等.日光温室不同厚度土墙体蓄放热特性比较[J].农业机械学报,2017,48(11):359-367.

[11] 曹晏飞.寿光下沉型日光温室性能测试及光环境影响因素分析[D].北京:中国农业大学,2011.

[12] 周长吉,刘晨霞.提高日光温室土地利用率的方法评价[J].中国果菜,2009(5):16-20.

[13] 邹志荣,鲍恩财,申婷婷,等.模块化组装式日光温室结构设计与实践[J].农业工程技术,2017,37(31):55-60.

[14] 郭洪恩,刘波,王晓,等.山东省日光温室现状及发展对策[J].农业科技通讯,2016(10):4-5,8.

[15] 周长吉.日光温室墙体“变形记”[N].中国花卉报,2013-02-03(004).

[16] 周长吉.周博士考察拾零(六十八)一种以涤棉轻质保温材料为墙体和后屋面的组装式日光温室[J].农业工程技术,2017,37(13):51-54.

[17] 周波,张义,方慧,等.装配加温除湿系统的轻简装配式日光温室设计及性能试验[J].农业工程学报,2016,32(11):226-232.

[18] 周升,张义,程瑞峰,等.大跨度主动蓄能型温室温湿度环境监测及节能保温性能评价[J].农业工程学报,2016,32(6):218-225.

[19] 孙周平,黄文永,李天来,等.彩钢板保温装配式节能日光温室的温光性能[J].农业工程学报,2013,29(19):159-167.

[20] 李小芳.日光温室的热环境数学模拟及其结构优化[D].北京:中国农业大学,2005.

[21] 鲍恩财,朱超,曹晏飞,等.固化沙蓄热后墙日光温室热工性能试验[J].农业工程学报,2017,33(9):187-194.

[22] 张勇,高文波,邹志荣.日光温室主动蓄热后墙传热CFD模拟及性能试验[J].农业工程学报,2015,31(5):203-211.

[23] 高文波,张勇,邹志荣,等.主动采光蓄热型日光温室性能初探[J].农机化研究,2015(7):181-186.

[24] 王昭,陈振东,邹志荣,等.青海型主动蓄热日光温室应用性

能分析[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(8): 116-123.

[25] 鲍恩财, 张勇, 曹晏飞, 等. 不同材质传热风道性能及蓄热土壤温度场 CFD 模拟[J]. 农业工程学报, 2018, 34(4): 232-238.

[26] 范毅, 杜震宇, 余敏, 等. 土壤空气换热器换热特性的模拟研究[J]. 可再生能源, 2016, 34(10): 1517-1524.

[27] 王永维, 梁喜凤, 程绍明, 等. 空气流速对温室地下蓄热系统加温时热湿传递的影响[J]. 农业机械学报, 2012, 43(11): 180-185, 219.

[28] 王永维, 梁喜凤, 王俊, 等. 温室地下蓄热系统换热管道空气流速对蓄热效果影响[J]. 农业机械学报, 2009, 40(5): 173-177, 202.

[29] 周长吉. 中国日光温室结构的改良与创新(二): 基于主动储放热理论的墙体改良与创新[J]. 中国蔬菜, 2018(3): 1-8.

[30] 李明, 周长吉, 丁小明, 等. 日光温室聚苯乙烯型砖复合墙保温蓄热性能[J]. 农业工程学报, 2016, 32(1): 200-205.

## Heat Transfer Performance and Parameter Regulation of Internal Air Heat Exchange System in Active Heat Storage Body

CAO Yanfei, ZHOU Haiyuan, BAO Encai, JIANG Chengyao, SUN Yachen, ZOU Zhirong

(College of Horticulture, Northwest A & F University/Key Laboratory of Protected Horticultural Engineering in Northwest, Ministry of Agriculture, Yangling, Shaanxi 712100)

**Abstract:** The solar greenhouse was used to provide the environmental conditions required for the study. The fluences of different wind speeds, air temperatures, and air-soil temperature differences on internal temperature inside the pipeline, inlet and outlet temperature difference and heat storage and release capacity of air-soil heat exchange system (ASHES) in the active heat storage body were tested. In order to get the heat transfer efficiency and optimize the control parameters of the air heat exchange system inside the active heat storage body. The results showed that the inlet and outlet temperature difference increased with the increase of indoor air temperature under the same wind speed conditions. In the heat release stage, when wind speed of air inlet was  $0.5-4.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , the heat release of ASHES increased with the increasing of wind speed, the average heat flow was  $9.8-73.9 \text{ W}$ . In the heat storage stage, when wind speed of air inlet was  $0.5-2.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , the heat storage of ASHES increased with the increasing of wind speed, the average heat flow was  $21.4-70.2 \text{ W}$ . When wind speed of air inlet were  $2.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  and  $4.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , respectively, the average difference of heat flow was  $2.7 \text{ W}$ , and coefficients of performance (COP) of different winds were not much different. At the same wind speed, the inlet and outlet temperature difference was increasing with the increasing of indoor air-soil temperature difference, and it was recommended that the indoor air temperature set when the fan was turned on during the day should be at least  $4.5^\circ\text{C}$  higher than the heat storage body soil temperature.

**Keywords:** solar greenhouse; active heat storage body; air-soil heat exchange system; wind speed; temperature difference; heat flux