

# 主动式太阳能集热/土壤蓄热塑料大棚增温系统及效果

戴巧利, 左 然<sup>\*</sup>, 李 平, 张志强, 苏文佳, 于海群

(江苏大学能源与动力工程学院, 镇江 212013)

**摘 要:** 试验研究了一套主动式太阳能塑料大棚增温系统。它以空气为载热介质, 土壤为蓄热介质, 白天利用太阳能空气集热器加热空气, 由风机把热空气抽入地下, 通过地下管道与土壤的热交换, 将热量传给土壤储存。夜间热量缓慢上升至地表, 从而使土壤保持恒温。经过连续 4 d 的加温试验得出: 与利用自然辐照的对比温室相比, 主动式太阳能塑料大棚的夜间气温平均升高 3.8℃, 地温平均升高 2.3℃, 系统蓄热量可达 228.9~319.1 MJ。试验结果证明, 这种结合太阳能空气集热器和土壤蓄热的塑料大棚增温系统, 能有效地提高棚内的气温和地温, 具有良好的发展前景。

**关键词:** 塑料大棚, 土壤蓄热, 太阳能增温, 太阳能空气集热器

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2009.07.030

中图分类号: S625<sup>+</sup>.1, TK512<sup>+</sup>.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2009)-7-0164-05

戴巧利, 左 然, 李 平, 等. 主动式太阳能集热/土壤蓄热塑料大棚增温系统及效果[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 164—168.

Dai Qiaoli, Zuo Ran, Li Ping, et al. Active solar heating system with soil heat storage for plastic film greenhouse and its effects[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(7): 164—168. (in Chinese with English abstract)

## 0 引 言

利用常规能源加热温室内空气, 不仅大量耗能, 而且容易造成室内气温过高而地温仍偏低, 满足不了喜温蔬菜对地温的要求<sup>[1-5]</sup>。因此, 寻找新的以节能为目标的增温方法一直是研究的热点。

太阳能是一种清洁的可再生能源, 且转换技术成熟。土壤具有较大的热容量, 可以作为储存热量的工质。在温室增温中结合太阳能集热和土壤蓄热有很大的优势, 国外很早就开展了此方面的研究。山本雄二郎<sup>[6]</sup>最先尝试了在温室地下 1.5 m 深处埋设铜管, 用太阳能集热器加热热水送入铜管, 以提高温室地温的长期蓄热式日光温室。Bargach<sup>[7]</sup>等研究了利用太阳能热水器获得热水, 通过地下管网传递给土壤, 从而给温室加温的有效性。Jain<sup>[8]</sup>等建立了用太阳能空气集热器加热温室的热性能数学模型并进行了试验验证。熊培桂<sup>[9]</sup>等在青藏高原的蔬菜温室中设置太阳能集热系统, 在温室土壤下埋设两层钢管, 浅层用于加热当日地温, 深层用于长期蓄热。王双喜<sup>[10]</sup>等设计的主动式太阳能温室地下蓄热系统具有夏天贮热冬天用、日间贮热夜间用的效果, 并且建议集热器面积与温室种植面积的比例为 1:5。刘圣勇<sup>[11]</sup>等设计的用水载热、土壤蓄热的温室加温系统使地温平均升高 4.4℃, 作物产量提高 21%。马承伟<sup>[12]</sup>等研究了利用风机将白天温室内温度较高的热空气送入地下蓄积, 夜间则反向送

风使温室增温。上述研究均证明, 结合太阳能集热和土壤蓄热的温室技术, 具有明显的增温效果。利用土壤容量大的特点, 不仅可以保持热量至夜间, 甚至可以保持多天, 从而达到节约能源, 作物高产的目的。但是, 用水作集热介质, 需要水在系统中反复循环流动, 耗费水泵的电能较大, 也存在腐蚀、泄漏等问题。利用风机直接将温室内的热空气导入地下的方法, 由于白天温室内的空气热量有限, 难以提供足够的热量来加热土壤以供夜间使用。

在前人工作的基础上, 作者提出一种主动式太阳能空气集热/土壤蓄热系统, 它以空气为载热介质, 土壤为蓄热介质, 白天利用太阳能集热器加热空气, 热空气经风机抽入地下管道, 通过地下管道与土壤的热交换, 将热量传给土壤储存。热量在夜间缓慢释放, 从而使土壤保持恒温。当夜间大棚内气温过低时, 系统将自动启动风机, 把地下贮存的热量带到地上, 以提高棚内气温。作者设计并安装了结合太阳能空气集热和土壤蓄热的主动式太阳能塑料大棚增温系统, 并进行了试验测试。研究针对一个 50 m<sup>2</sup> 的普通塑料大棚, 在其侧面安装太阳能集热器, 在地下安装传热管网。在选定的冬季晴朗天气进行了连续多天的温度测量。本文详细介绍了这种主动式太阳能塑料大棚增温系统的结构组成和试验测量, 旨在为今后的推广提供科学依据。

## 1 主动式太阳能塑料大棚增温系统

### 1.1 系统组成和工作原理

如图 1 所示, 主动式太阳能增温系统包括太阳能空气集热器<sup>[13]</sup>、聚氯乙烯(PVC)散热管、聚氨酯保温管、风机等。太阳能空气集热器置于南北走向的大棚的东西两侧, 面向正南, 与地面呈约 50° 角放置; 在塑料大棚

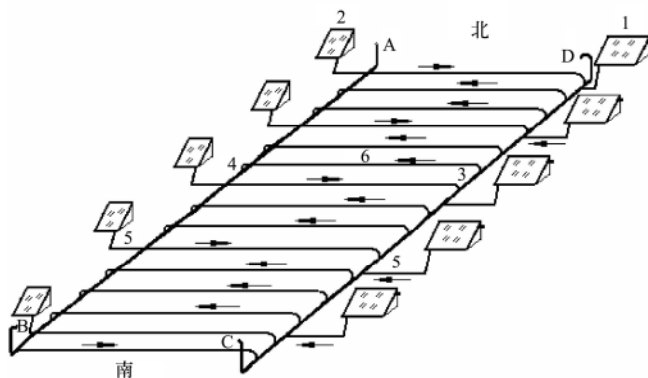
收稿日期: 2009-01-10 修订日期: 2009-04-19

作者简介: 戴巧利(1983—), 女, 湖南娄底人, 主要从事太阳能热利用的研究。镇江 江苏大学能源与动力工程学院, 212013。

Email: daiqiaoli123@163.com

<sup>\*</sup>通信作者: 左 然(1955—), 男, 湖南长沙人, 教授, 博士生导师, 主要从事太阳能热利用、半导体材料生长等研究。镇江 江苏大学能源与动力工程学院新能源室, 212013。Email: rzuo@ujs.edu.cn

地下 50 cm 深的并联埋管横穿棚内土壤, 并联埋管的两端通过弯头分别连接在两根纵向主管上。主管通过引风管与太阳能空气集热器出口端相连, 两根纵向主管的 4 个末端分别引出地面, 其中并联埋管为 PVC 管, 直径为 160 mm, 管间距为 50 cm (管中心线距离), 埋设深度为 50 cm (管中心与地表面距离); 主管也为 PVC 管, 直径为 250 mm; A、B 端口与两部风机相连; C、D 端口为可开闭风门。白天 C、D 关闭, A、B 端口上的风机将热空气从太阳能空气集热器抽入地下管道, 热量传给地下土壤蓄积, 散热后带有余热的空气从风机出口排入棚内。夜间当棚内气温较低时, C、D 打开, 风机将棚内冷空气吸入地下, 经与土壤换热后, 将地下土壤蓄积的热量由空气带出, 从风机出口排入棚内, 从而提高夜间的棚内气温。同时, 由于土壤巨大的热容量和较小的导热率, 热量从温度较高的地下土壤向上缓慢传递, 从而使大棚内浅层土壤温度升高, 满足作物根系对地温的需求。



1, 2. 太阳能空气集热器 3, 4. 纵向主管道 5. 热空气引风管加保温管  
6. 并联散热埋管 A、B. 风机 C、D. 可开闭风门

图1 主动式太阳能增温系统示意图

Fig.1 Schematic of the active solar heating system for plastic film greenhouse

## 1.2 太阳能塑料大棚结构

试验塑料大棚位于江苏省镇江市东郊的一个蔬菜研究所内, 图 2 为实物照片。利用一个普通的南北走向的大棚, 将其用塑料膜隔成两部分, 利用靠南的部分作为加热大棚。加热大棚长 10 m, 宽 5 m, 脊高 2.5 m, 总面积为 50 m<sup>2</sup>。加热大棚的保温覆盖材料采用双层 0.08 mm



图2 试验太阳能塑料大棚外景

Fig.2 Photo of the experimental plastic film greenhouse

厚的 PVC 长寿无滴塑料膜, 两层塑料膜之间有 10 cm 的空气层, 用泡沫做成的长圆柱管撑起。由于空气的导热系数很小, 故双层膜之间的空气间层可起到良好的隔热保温作用<sup>[14]</sup>。靠北的另一部分作为对比棚, 对比棚的保温覆盖材料为单层同样的塑料膜。加热棚采用前述的太阳能集热/蓄热系统加热, 对比棚只利用自然辐照。

## 2 试验方案

白天利用太阳能空气集热器加热空气, 利用两台 (每台 90 W, 额定流量 1000 m<sup>3</sup>/h) 的风机把热空气经管道送入地下, 通过地下管道与土壤的热交换, 将热量传给土壤储存并加热土壤。当夜间棚温过低时, 系统启动风机, 将地下贮存的热量带到地上。风机运行时间为: 9: 00—15: 00; 21: 00—次日 7: 00。

采用 T 型热电偶, 分别对环境温度、加热大棚和对照大棚内的地温、气温进行测试, 采用多点测温仪自动采集温度数据。气温测温点设在棚内中部距地面 50 cm 处, 地温测温点分别设在地下 10、20、30、40 cm 深处。风机流量采用手动风速仪测量平均出口流速, 计算出两台风机的实际总流量约为 571 m<sup>3</sup>/h。

## 3 结果与分析

从 2008 年 11 月到 12 月对系统进行了连续试验测试, 特别是在 2008 年 12 月 8 日—2008 年 12 月 11 日连续 4 个晴天进行了太阳能加热试验, 由于试验是在完全动态的情况下进行的, 在不同的太阳辐射和不同的环境温度下, 每天的测量结果不尽相同, 但总的趋势不变。以下针对测量得出的加热大棚和对照大棚内的气温、地下 10 和 20 cm 处地温、30 和 40 cm 处地温, 分别进行讨论。

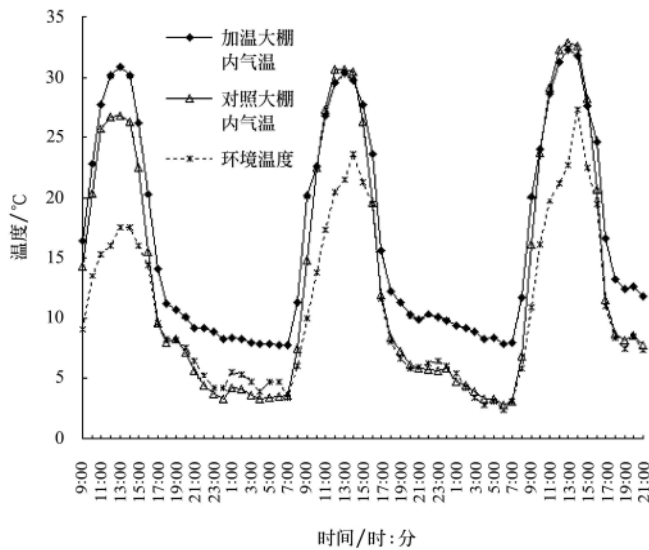
### 3.1 两个大棚内的气温变化

由图 3 可看出, 两个大棚内的气温变化趋势相同, 白天加热棚和对照棚的气温相差不大, 均远高于室外气温; 晚上加热棚内的气温明显高于对比棚, 而对照棚内的气温与环境温度大致相同。加热棚 3 d 内的最高气温 32.3℃, 最低气温 7.7℃, 日平均气温 16.6℃; 对照棚 3 d 内的最高气温 32.9℃, 最低气温 2.6℃, 日平均气温 13.3℃。加热棚比对照棚日平均气温提高 3.3℃。加热棚夜间的平均气温为 9.7℃, 比对比棚提高 3.8℃。

### 3.2 两个大棚内的地温变化

图 4 所示为两个大棚内地下 10 cm 和 20 cm 处的地温变化情况。由图可看出, 两个大棚的土壤温度变化趋势一致, 地表下 10 cm 处的土壤温度日变化值较大, 在 15: 00 左右达到最高, 在早上 7: 00 左右最低; 地表下 20 cm 处的土壤温度日变化较平缓, 在 17: 00 左右达到最高, 在早上 9: 00 左右最低。白天 10 cm 处地温高于 20 cm 处地温; 夜间 20 cm 处地温高于 10 cm 处地温。加热大棚内地下 20 cm 处地温平均值为 15.1℃, 10 cm 处地温平均值为 15.6℃。与对照棚相比, 加热大棚的地温明显提高。在 3 d 内, 加热大棚 10 cm 深处地温平均提高 2.9℃, 最高提高 5.1℃; 20 cm 处地温平均提高 2.4℃, 最高提高 3.8℃。在夜间, 加热大棚内 10、20 cm 深处平

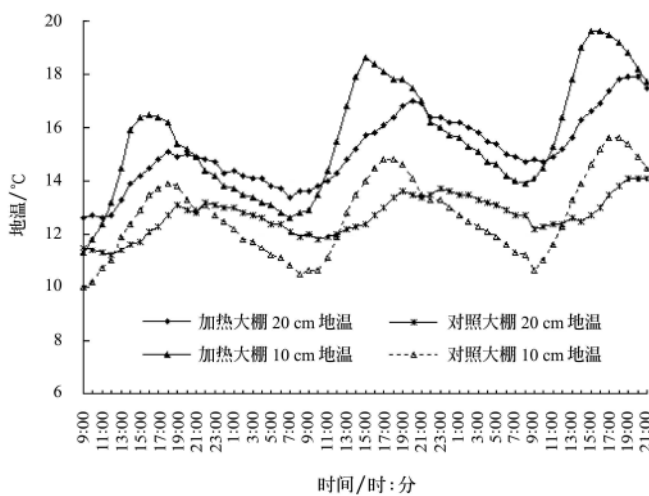
均地温分别为 15.5 和 15.6℃, 比对照棚分别高 2.5 和 2.4℃。在连续晴天情况下, 随着太阳能集热—蓄热系统运行, 加热棚的地温比对照棚的地温越来越高, 显示出中长期蓄热的能力。



注: 试验时间: 2008 年 12 月 8 日 9: 00—12 月 10 日 21: 00

图 3 两个大棚内气温变化

Fig.3 Variations of air temperature in the two experimental plastic film greenhouses



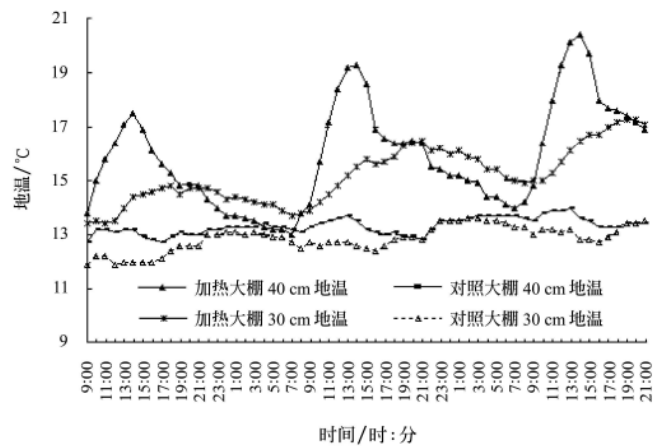
注: 试验时间: 2008 年 12 月 8 日 9: 00—12 月 10 日 21: 00

图 4 两个大棚内地下 10 和 20 cm 深处地温变化情况

Fig.4 Variations of soil temperature at 10 and 20 cm depth in the two experimental plastic film greenhouses

图 5 所示为两个大棚内土层 30 和 40 cm 深处的地温变化情况。从图中看出, 对照棚的 30 和 40 cm 处的地温相差不大, 日变化也较小。这是由于深层土壤受棚内气温的影响较小, 所以地温较为恒定。由于加温大棚 40 cm 深的土壤靠近地下加热管道, 所以白天 40 cm 深的地温较高, 日变化较大。最大值出现在 14 时左右, 最高温度可达 20.4℃, 比对照棚 40 cm 地温的最大值高 6.4℃; 加温棚 40 cm 地温日平均值为 15.9℃, 比对比棚高 2.6℃。在夜间, 由于开启风机将棚内温度较低的冷空气与地下

温度较高的土壤进行热交换, 所以 40 cm 深的土壤温度也随之降低, 但仍然比对照棚土壤夜间平均地温高 1.7℃。加温棚 30 cm 深的土壤温度基本不受夜间风机的影响, 远远高于对比棚的地温, 最大值为 17℃, 日平均值为 15.2℃, 比对比棚地温高 2.3℃, 夜间比对比棚地温同样高 2.3℃。在连续晴天的情况下, 随着太阳能集热—蓄热系统的连续运行, 这个温差越来越大, 说明深层温度较高的土壤可以将热量缓慢地上传给浅层土壤, 从而达到长期蓄热的目的。



注: 试验时间: 2008 年 12 月 8 日 9: 00—12 月 10 日 21: 00

图 5 两个大棚内地下 30 和 40 cm 处地温变化情况

Fig.5 Variations of soil temperature at 30 and 40 cm depth in the two experimental plastic film greenhouses

### 3.3 太阳能塑料大棚增温系统的蓄热性能

从集热器出来的热空气经过大棚地下管道换热后在大棚的另一侧排入大棚, 空气与换热管道间的换热量取决于空气的流量与空气在换热管道进出口焓值的变化。太阳能塑料大棚增温系统的地下蓄热量  $Q$  可由下式计算<sup>[15]</sup>

$$Q = V\rho[h_1 - h_2]\Delta t \quad (1)$$

式中:  $Q$ ——地下蓄热量, kJ;  $V_i$ ——空气总体积流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $\Delta t$ ——时间段, s;  $\rho$ —— $\Delta t$  时间内干空气密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $h_1$ —— $\Delta t$  时间内空气进口焓值,  $\text{kJ}/\text{kg}$ ;  $h_2$ —— $\Delta t$  时间内空气出口焓值,  $\text{kJ}/\text{kg}$ 。

湿空气焓  $h$  的计算式为<sup>[15]</sup>

$$h = 1.01T + d(2500 + 1.84T) \quad (2)$$

式中:  $T$ ——温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $d$ ——湿空气含湿量,  $\text{kg}/\text{kg}$ 。

湿空气含湿量的计算式为<sup>[15]</sup>

$$d = \phi d_b \quad (3)$$

式中:  $\phi$ ——相对湿度, %;  $d_b$ ——饱和含湿量。

太阳能塑料大棚增温系统平均蓄热功率  $\Phi$  (kW) 为<sup>[16]</sup>

$$\Phi = Q / \sum \Delta t \quad (4)$$

平均蓄热功率密度为<sup>[16]</sup>

$$q = \Phi / A \quad (5)$$

式中  $A$ ——棚内土壤面积,  $\text{m}^2$ 。

在 3 d 的加温试验中, 12 月 8 日只用了一台 (功率

为 90 W，风量为 1000 m<sup>3</sup>/h) 轴流风机进行抽风，在 12 月 9 日和 10 日用了两台相同型号的风机进行抽风，对地下换热管道进口和出口的热空气温度采取求平均值的方法，由文献[16]，取换热管道进口的空气相对湿度为 45%，

风机出口的空气相对湿度为 90%，查湿空气焓湿表<sup>[17]</sup>，将试验测得的数据代入式 (1) ~ (5)，可估算出测试期间在集热器运行期间系统的蓄热量、平均蓄热功率和平均蓄热功率密度，计算结果见表 1。

表 1 主动式太阳能塑料大棚增温系统的蓄热性能计算结果  
Table 1 Calculated results of heat storage for the active solar plastic film greenhouse

测试日期 /年-月-日	运行时间	风机流量 /m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup>	换热管道进口 平均温度/℃	风机出口平均 温度/℃	蓄热量 /kJ	平均蓄热功率 /kW	平均蓄热功率 密度/W·m <sup>-2</sup>
2008-12-8	9:00—15:00	498	44.3	22	228 850.2	10.6	211.9
2008-12-9	9:00—15:00	562	46.8	23.2	308 763.9	14.3	285.9
2008-12-10	9:00—15:00	581	48.1	23.5	319 098.2	14.8	295.5

根据表 1 的数据，可知，在试验期间，太阳能塑料大棚增温系统地下蓄存的热量为 228 850.2~319 098.2 kJ，可以使塑料大棚内加热管道以上的整个土壤层温度升高 3.1~4.2℃。由于热量在往上传递的同时，还往加热管道以下的土壤传递，故在试验中所测得加热管道以上的土壤层平均只升高 2.3℃是合理的。太阳能塑料大棚增温系统所蓄存的热量与轴流式风机消耗的电能之比为 100.6~134.3。可见，白天蓄存的热量远大于系统消耗的电能，节能效果非常明显。

4 结论与讨论

1) 在晴天情况下，利用太阳能空气集热/土壤蓄热的塑料大棚增温系统，可使塑料大棚内日平均气温提高 3.3℃，20 cm 处地温日平均提高 2.4℃。夜间气温平均提高 3.8℃，10 cm 处地温平均提高 2.5℃。表明利用太阳能空气集热/土壤蓄热的塑料大棚增温系统是可行的，具有明显的白天蓄热、夜间放热的效果，并且还具有长期蓄热的潜力，有可能满足农作物在连续阴天时的地温需要。

2) 在晴天情况下，本增温系统白天蓄热时，蓄热量可达 228 850.2~319 098.2 kJ，平均蓄热功率密度为 211.9~295.5 W/m<sup>2</sup>，系统具有良好的蓄热性能。

3) 太阳能空气集热/土壤蓄热系统存在着初投资较大、加温棚内湿度较高等缺点，需进一步改进和完善。

[参 考 文 献]

[1] 李萍萍, 毛罕平. 我国温室生产的现状与亟待研究的技术问题探讨[J]. 农业机械学报, 1996, 27(3): 135—139.  
Li Pingping, Mao Hanping. The general situation and technique developing approaches of greenhouse in China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1996, 27(3): 135—139. (in Chinese with English abstract)

[2] 潘强, 黄之栋, 马承伟, 等. 华北型连栋塑料温室节能对策与实践[J]. 农业工程学报, 1999, 15(2): 155—159.  
Pan Qiang, Huang Zhidong, Ma Chengwei, et al. Study on the energy conservation of Huabei-type multispan plastic greenhouse and its practice[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 1999, 15(2): 155—159. (in Chinese with English abstract)

[3] 李德坚, 唐轩, 殷志强, 等. 温室太阳能供暖[J]. 太阳能学报, 2002, 23(5): 557—563.

Li Dejian, Tang Xuan, Yin Zhiqiang, et al. Solar heating for greenhouse[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2002, 23(5): 557—563.

[4] 孙忠富. 地—气热交换塑料大棚中热量平衡的研究[J]. 农业工程学报, 1989, 5(2): 35—46.  
Sun Zhongfu. Studies on the heat balance of polyvinyl chloride greenhouse with an earth-air heat exchanger[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 1989, 5(2): 35—46. (in Chinese with English abstract)

[5] 白义奎, 迟道才, 王铁良, 等. 日光温室燃池—地中热交换系统加热效果的初步研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(10): 178—181.  
Bai Yikui, Chi Daocai, Wang Tieliang, et al. Experimental research of heating by fire-pit underground heating exchange system in a solar greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(10): 178—181. (in Chinese with English abstract)

[6] 山本雄二郎. 日本的日光温室[J]. 农业及园艺, 1982, 56(7): 57—58.

[7] Bargach M N, Dahman A S, Boukallouch M. A heating system using at plate collectors to improve the inside greenhouse microclimate in Morocco[J]. Renewable Energy, 1999, 18: 256—270.

[8] Dilip Jain, Tiwari G N. Modeling and optimal design of ground air collector for heating in controlled environment greenhouse[J]. Energy Conversion and Management, 2003, 44: 1357—1372.

[9] 熊培桂, 李莉. 青海高原太阳能蔬菜温室研究[J]. 青海农林科技, 1990, (3): 1—10.

[10] Wang Shuangxi, Ma Chunsheng, Zhang Jing, et al. Substrate heating system with solar energy for greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(5): 197—203.

[11] 刘圣勇, 张杰, 张百良, 等. 太阳能蓄热系统提高温室地温的试验研究[J]. 太阳能学报, 2003, 24(4): 461—465.  
Liu Shengyong, Zhang Jie, Zhang Bailiang, et al. Experimental study of solar thermal storage for increasing the earth temperature of greenhouse[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2003, 24(4): 461—465.

[12] 马承伟, 黄之栋, 穆丽君. 连栋温室地中热交换系统贮热加温的试验[J]. 农业工程学报, 1999, 15(2): 160—164.  
Ma Chengwei, Huang Zhidong, Mu Lijun. Experiment of heating & heating-storing of the underground heat exchange system in a multi-span greenhouse[J]. Transactions of the

- Chinese Society of Agricultural Engineering, 1999, 15(2): 160—164. (in Chinese with English abstract)
- [13] 段清彬. 太阳能供暖系统的研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2005.
- [14] 倪金卫, 李保明, 王春彦. 日照长度对双层塑料薄膜温室保温的影响[J]. 云南农业大学学报, 2005, 20(2): 286—289.  
Ni Jinwei, Li Baoming, Wang Chunyan. The influence of sunshining length to heat preservation in double-plastic greenhouse[J]. Journal of Yunnan Agricultural University, 2005, 20(2): 286—289.
- [15] 王永维, 苗香雯, 崔绍荣, 等. 温室地下蓄热系统换热特性研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(6): 248—251.  
Wang Yongwei, Miao Xiangwen, Cui Shaorong, et al. Heat exchanging characteristics of underground heat storage system in greenhouses[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2003, 19(6): 248—251. (in Chinese with English abstract)
- [16] 王永维, 苗香雯, 崔绍荣, 等. 温室地下蓄热系统蓄热和加温性能[J]. 农业机械学报, 2005, 36(1): 75—79.  
Wang Yongwei, Miao Xiangwen, Cui Shaorong, et al. Study on the heat storing and heating performances of an underground heat storage system in greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(1): 75—79. (in Chinese with English abstract)
- [17] 赵荣义, 范存养, 薛殿华, 等. 空气调节[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.

## Active solar heating system with soil heat storage for plastic film greenhouse and its effects

Dai Qiaoli, Zuo Ran<sup>\*</sup>, Li Ping, Zhang Zhiqiang, Su Wenjia, Yu Haiqun

(School of Energy and Power Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** An active solar heating system with soil heat storage for plastic film greenhouses was studied. In the system, outside air was heated by solar air collector and then pumped into underground pipes. The heat carried by air was transferred through pipes to the soil and stored for use at night. In the night, heat rised slowly to the ground surface to maintain the soil at constant temperature. After continual running of the active solar heating system for four days, it showed that during the night, the average air temperature of the active solar plastic film greenhouse was 3.8℃ higher and the average soil temperature was 2.3℃ higher than those of the unheated one. The system could store a heat quantity of 228.9—319.1 MJ. The experimental results prove that using solar air heating system with soil heat storage can increase the air and soil temperatures for plastic film greenhouse effectively and has a good prospect for applications.

**Key words:** plastic film greenhouses, soil heat storage, solar heating, solar air collector