doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.044

# 日光温室不同厚度土墙体蓄放热特性研究

史宇亮[1]　王秀峰[2]　魏　珉[2,3]　李天华[4]　王少杰[5]

(1.青岛农业大学园艺学院,青岛 266109;2.山东农业大学园艺科学与工程学院,泰安 271018;
3.农业部黄淮海设施农业工程科学观测实验站,泰安 271018;4.山东农业大学机械与电子工程学院,泰安 271018;
5.山东农业大学水利与土木工程学院,泰安 271018)

**摘要**:为实现土墙日光温室结构优化及温室土墙体轻简化,以泰安市不同厚度土墙日光温室为研究对象,利用在两温室(1 号墙体较厚、2 号墙体较薄)北墙体的不同高度上布置的温度传感器采集的数据,比较分析了在不同天气状况条件下两温室不同厚度土墙体的蓄放热特性。结果表明,晴好天气时,1 号温室土墙体的蓄热量和放热量略高于 2 号温室,二者差值很小,分别为 82.3、45.0 kJ。连阴天时墙体全天放热,测试 3 d 的平均放热量,1 号温室明显高于 2 号温室,厚墙体与薄墙体的放热量有明显差异,其二者差值为 615.9 kJ,但两温室距离墙体内表面 0.1 m 处的平均气温相差仅 0.6℃。从距墙体内表面 0.6 m 以外的墙体温度相对稳定部分的温度分析表明,厚墙体温室(1 号温室)温度相对稳定层的范围较薄墙体温室的大,蓄积热量也较多,应采取有效的换热设备或材料,将厚墙体内温度相对稳定层蓄积的热量释放到温室内部,用于进一步提高温室气温,以充分发挥厚墙体的节能效果。

**关键词**:日光温室;土墙体厚度;蓄放热特性

**中图分类号**:S625.5;S625.1　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2017)11-0359-09

# Comparison of Heat Storage and Release Characteristics of Different Thicknesses Soil Wall Solar Greenhouse

SHI Yuliang[1]　WANG Xiufeng[2]　WEI Min[2,3]　LI Tianhua[4]　WANG Shaojie[5]

(1. *College of Horticulture, Qingdao Agricultural University, Qingdao* 266109, *China*
2. *College of Horticulture Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an* 271018, *China*
3. *Scientific Observing and Experimental Station of Environment Controlled Agricultural Engineering in Huang-Huai-Hai Region, Ministry of Agriculture, Tai'an* 271018, *China*
4. *College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an* 271018, *China*
5. *College of Water Conservancy and Civil Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an* 271018, *China*)

**Abstract**: The solar greenhouse is only greenhouse type for China. Indoor thermal environment of solar greenhouse is improved via the heat storage and heat release of wall body. The soil wall body, which has good characteristic of heat storage and heat release, is applied to solar greenhouse extensively in China. The thickness of soil wall body is determined by the builder's experience due to lack construction standards. At present, the study on the heat release characteristic of different thicknesses soil wall is hot spot, which can provide the theoretical basis for the simplification and thickness optimization of soil wall body. The solar greenhouse No.1 (the top and bottom width of the soil wall body was 2.0 m and 6.0 m, respectively) and solar greenhouse No.2 (the top and bottom width of the soil wall body was 1.3 m and 3.0 m, respectively) were chosen as research object in Tai'an, Shandong Province, China. The greenhouse No.1 and No.2 had the same length (50.0 m) and width (10.0 m). Five testing layers of temperature at the same height of the north wall of both greenhouses were arranged. The testing period was from Dec. 20th, 2015 to Jan. 20th, 2016. The outdoor weather conditions, indoor air temperature and interior wall temperature in the sunny day (from Dec. 30th, 2015 to Jan. 2th, 2016) and cloudy

收稿日期:2017-07-21　修回日期:2017-08-28

**基金项目**:国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-25)、青岛市民生科技计划项目(16-6-2-43-nsh)和青岛市园艺植物遗传改良与育种重点实验室项目

**作者简介**:史宇亮(1981—),女,讲师,主要从事设施环境工程与调控研究,E-mail:shiyuliang1981@126.com

**通信作者**:王秀峰(1957—),男,教授,博士生导师,主要从事设施环境工程与调控研究,E-mail:xfwang@sdau.edu.cn

day (Jan. 4 - 6th, 2016) were used to analyze the temperature distribution and the heat release characteristic of each testing layer in the greenhouses No. 1 and No. 2. The results showed that during the sunny day, the heat storage and release quantity of the greenhouse No. 1 was higher than that of the greenhouse No. 2, but the difference was little, which was 82.3 kJ and 45.0 kJ, respectively. For the three cloudy days, the heat release characteristic of wall body of the solar greenhouses No. 1 and No. 2 was analyzed based on the data of the wall body temperature and indoor temperature. The results showed that the heat release quantity of greenhouse No. 1 was higher than that of the greenhouse No. 2, the difference was 615.9 kJ, but the air temperature of the greenhouse No. 1 was only 0.6℃ higher than that of the greenhouse No. 2 during the cloudy day. The analysis of relative temperature stability part of wall showed that the heat storage of the greenhouse No. 1 was very higher than that of the greenhouse No. 2. This heat relative temperature stability part for the thick wall greenhouse should be used via efficient heat exchange equipment to improve the thermal environment of greenhouse.

**Key words**: solar greenhouses; soil wall thickness; heat storage and release characteristic

## 引言

土墙日光温室以其取土方便、施工简单被中国大部分地区广泛应用。近年来,国内外学者相继研究替代日光温室土质墙体的其他新型墙体材料,WANG 等[1]对空心混凝土砖墙温室热性能进行仿真分析,结果表明 0.6 m 厚粘土砖加 0.1 m 厚聚苯乙烯板的温室墙体热性能优于 0.6 m 厚空心混凝土砖墙体;ZIAPOUR 等[2]对温室后坡采用相变材料收集太阳能装置的优化,使太阳能装置集热效率显著提高;陈超等[3]对相变材料在温室中的应用进行了试验研究,结果表明与普通温室相比,维持温室内相同温度时,耗电节能率约为 8%;王宏丽等[4]进行的日光温室相变蓄热砌块墙体试验研究,也取得了较好的节能效果;王宇欣等[5-6]进行的日光温室根区热环境相变调控系统设计与性能试验,并对温室蓄热微胶囊相变材料制备筛选与性能表征进行了研究,该系统能够实现太阳能量的高效收集和温室热环境控制。近年来,为进一步改善日光温室越冬期间的室内热环境状况,与其相关的地源热泵系统、生物质气供暖及太阳能辅助供暖系统的研究工作也在开展,如 BENLI[7]对采用相变材料作为储能材料的地源热泵温室供暖系统进行了试验验证;TIWARI 等[8]对生物质气日光温室供暖系统进行仿真研究;ZHANG 等[9]研制的太阳能燃池热水土壤供暖系统可使温室土壤平均温度提高 5 ~ 6℃;佟雪姣等[10]对冬季日光温室太阳能水循环系统试验结果表明,系统日蓄热量为 159.8 MJ,温室夜间可提高 3 ~ 5℃。上述研究均使日光温室室内热环境得到了不同程度的改善,但多因初期投资、运行管理成本高或施工技术复杂等因素的影响,并没有在大面积范围内得到应用推广。

目前,我国土墙日光温室较多,且土墙的厚薄差异较大,甚至有很大一部分为超厚土墙[11]。为实现土墙温室的轻简化,日光温室土墙体的蓄放热特性及与厚度相关的研究也已成为行业的热点。彭东玲等[12]认为 3 m 厚土墙在晴天的有效蓄热层为 0.26 ~ 0.45 m;杨建军等[13]对西北地区日光温室优化结果建议甘肃白银地区土墙体以 1.3 m 为宜;张林华等[14]和何芬等[15]分别对温室内及温室地面进行了三维和二维温度场模拟,并获得了较好的模拟精度;李明等[16]开发了基于一维差分法蓄热层计算方法;史宇亮等[17]评价日光温室土墙的蓄放热效率约为 43%。可以看出,上述研究为特定地区、基于单一栋日光温室的观测分析得出的结论,或是基于数学理论的模拟推论,在同一地区对日光温室不同厚度土墙的蓄放热特性比较研究还鲜有报道。

本文以在泰安市(东经 116°20′ ~ 117°59′、北纬 35°38′ ~ 36°28′)建造的 2 栋不同土墙厚度的日光温室为研究对象,采用温室建造时预埋设温度传感器及自动数字信息采集系统获取数据,研究不同厚度的墙体在不同天气状况下的蓄放热特性及其差异性比较,以期为日光温室土墙体的厚度设计及轻简化建造提供理论指导。

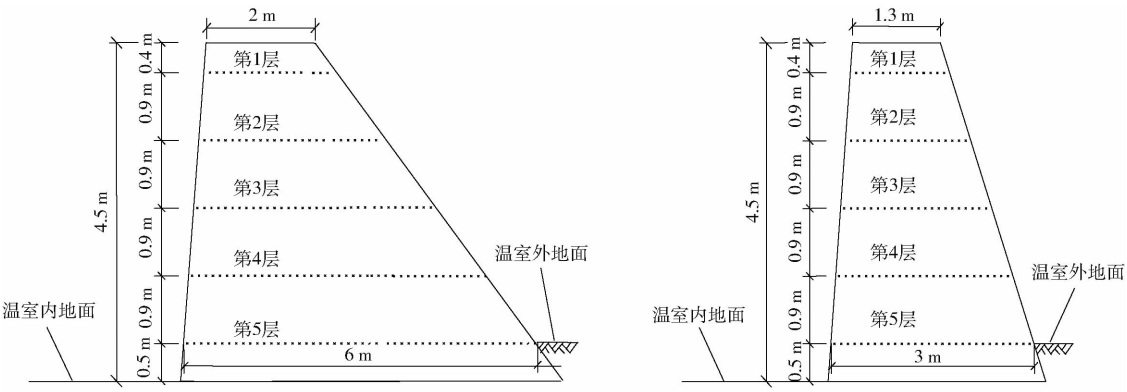
## 1 试验温室与测试点设置

### 1.1 试验温室

选取山东省泰安市山东农业大学南校区试验基地内 2 栋土墙厚度不同的日光温室作为试验对象,温室均为下挖式,下挖深度为 0.5 m。1 号温室后墙底宽 6.0 m,墙体顶宽 2.0 m;2 号温室后墙底宽 3.0 m,墙体顶宽 1.3 m。温室长度均为 50.0 m。试验温室北墙厚度及剖面分层结构如图 1 所示。

### 1.2 测试点设置

为更准确地了解后墙不同高度墙体的蓄放热特性,1 号和 2 号温室的北墙体设计时均分为 5 个测试层(图 1),每个测试层间距均为 0.9 m。墙体建造时,在每个测试层水平方向由室内墙体表面开始




(a) 1号温室　　(b) 2号温室

图 1　2 个试验温室北墙剖面图(注：· 表示温度测点)

Fig. 1　Sectional views of two experiment greenhouse

(为第一个测点，墙体表面温度的测点被埋置墙体表面下，无裸露)向墙体内(朝室外方向)，以 0.1 m 间距布置各温度传感器测试点。由此得到 2 栋温室各层的温度测点数，1 号温室：第 1 层 28 个，第 2 层 36 个，第 3 层 44 个，第 4 层 53 个，第 5 层 61 个。2 号温室：第 1 层 15 个，第 2 层 19 个，第 3 层 23 个，第 4 层 27 个，第 5 层 31 个。同时，在每个测试层第 1 个测点向室内水平方向 0.1 m 处(离开墙体内表面 0.1 m)设 1 个温度传感器测定温室内空气温度。试验中采用 DS18B20 型温度传感器(北京昆仑中科传感器封装技术有限公司)，其温度测量阈值为 −55 ~ 125℃，测量精度为 ±0.5℃；温度数据采集时间间隔为 30 min。太阳辐射采用 JTR05 型太阳辐射测试仪测量，最大误差 ±2%，灵敏度 0.2 kW/(m²·mV)，采集时间间隔为 10 min。

### 1.3　温室管理

1 号和 2 号试验温室均种植黄瓜，小高畦地膜覆盖滴灌栽培。数据采集期间，温室每天 9:00 揭开保温被，16:30 放下保温被。

## 2　结果与分析

该研究的数据采集是以泰安地区一般年份的最冷时节(12 月末和 1 月初)为代表期间，选取 2015 年 12 月 20 日—2016 年 1 月 20 日期间自动数字采集系统记录的 2 栋温室墙体及室内外温度参数，从中选取晴天(2015 年 12 月 30 日—2016 年 1 月 2 日)和晴天后的阴天(2016 年 1 月 4—6 日)的数据，分别对 1 号和 2 号试验温室的蓄放热特点进行了比较分析。

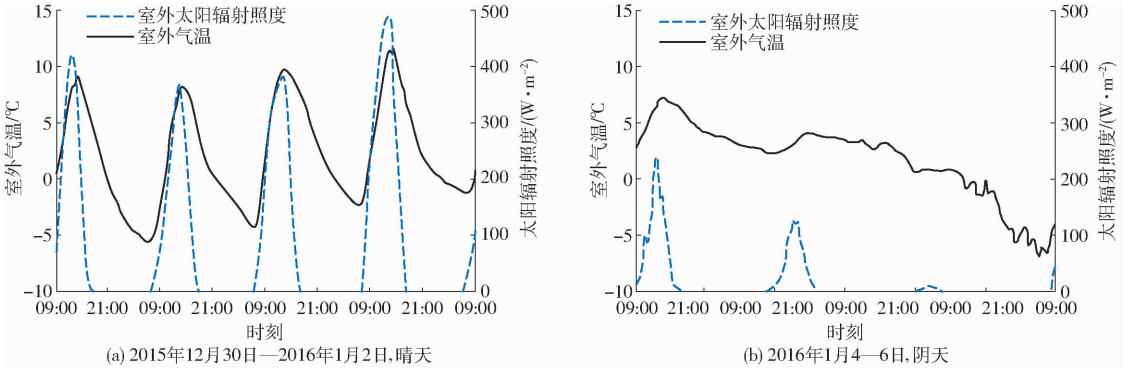
### 2.1　室外气象条件

泰安市 2015 年 12 月 30 日—2016 年 1 月 2 日为晴天，2016 年 1 月 4—6 日为阴天，2 个时段的室外温度及太阳辐射照度如图 2 所示。可以看出，在连续几个晴天时，白天的太阳辐射照度较强，气温也较高，最高气温达到 8℃ 以上；夜间的散热也较快，气温降至 −2 ~ −6℃，昼夜间温差较大。在晴天之后进入阴天时，最初 2 d 太阳辐射照度急剧减弱，但气温下降较慢，昼夜间温差较小，气温在 2℃ 以上；阴的第 3 天太阳辐射很弱，昼夜间气温急剧下降，很快降到 −5℃ 甚至更低。

### 2.2　晴天不同厚度土墙体蓄放热特性比较

#### 2.2.1　连续晴天温室气温及墙体各测点温度变化

据前期研究可知，日光温室土墙体内表面至墙内 0.6 m 厚的墙体部分为温室的蓄放热层，0.7 m 以外至御冷层的中间墙体部分为温室的温度相对稳定层[17]，本文仅列出各测试层从墙体内表面至墙内




(a) 2015年12月30日—2016年1月2日，晴天　　(b) 2016年1月4—6日，阴天

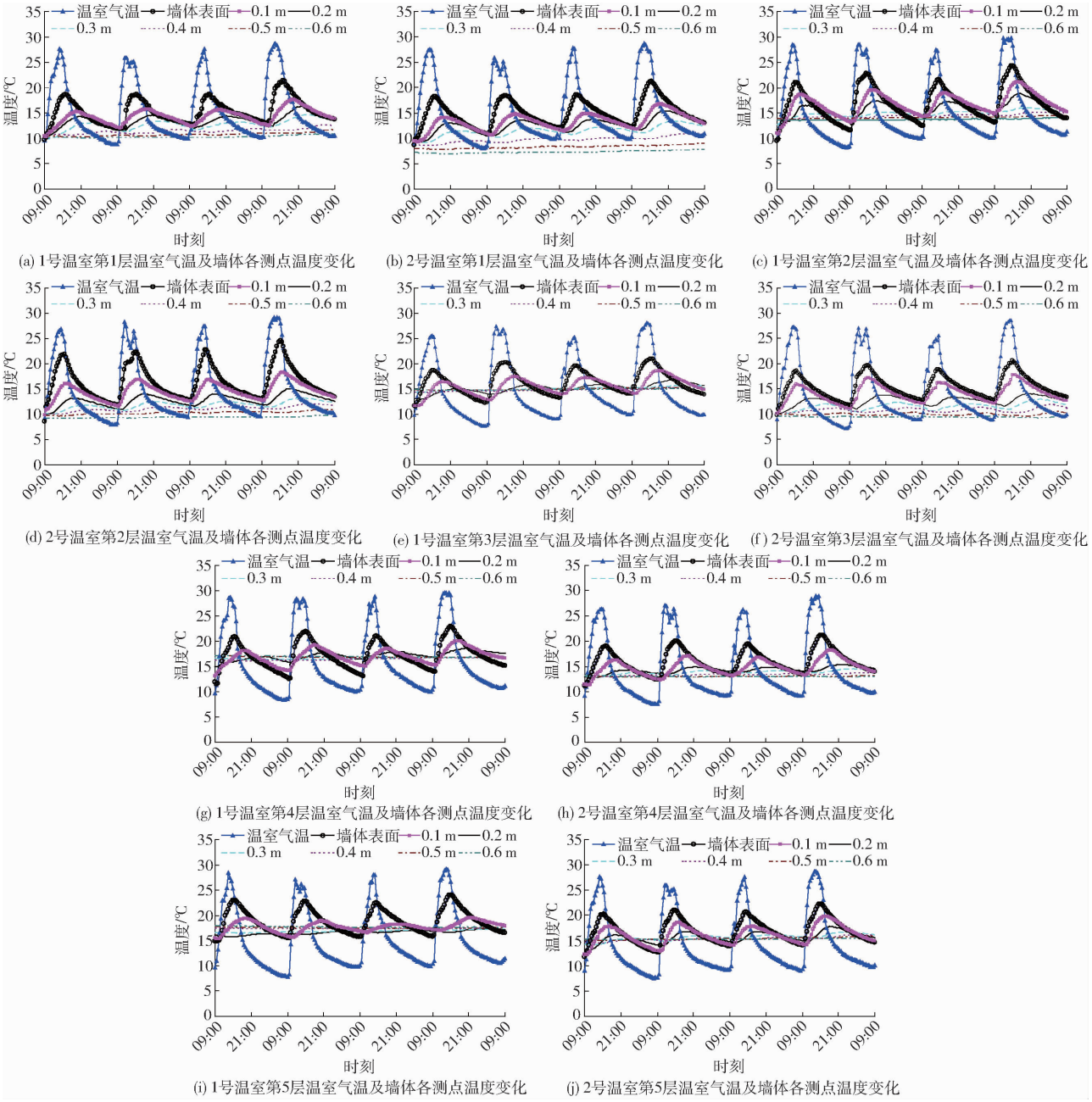
图 2　晴天和阴天时室外气温及太阳辐射照度

Fig. 2　Outdoor air temperature and solar radiation in sunny and cloudy days

0.6 m 处各测点的数据及墙体附近(距墙体表面 0.1 m 处)室内气温,如图 3 所示,图中表示的距离为测试点与温室墙体内表面的距离;温室气温为墙体内侧距表面 0.1 m 处气温。

由图 3 可得知,2 栋温室气温(离室内墙表面 0.1 m 处,4 个晴天的平均值),白天(9:00—16:30)各测试层对应的温室气温基本相同,夜间(17:00—8:30)各测试层对应的温室气温有明显的差异,随层次的下移温室墙体附近的气温逐渐升高。1 号温室与 2 号温室相比较,两温室相同的测试层对应的温室气温也有明显的差异,1 号温室各层对应的温室气温都比 2 号温室的高:第 1 层高 0.43℃,第 2 层高 0.64℃,第 3 层高 0.69℃,第 4 层高 0.97℃,第 5 层高 0.78℃,5 个测试层平均温度高 0.70℃。

由图 3 可以看出,在观测期间,1 号(墙体较厚)和 2 号(墙体较薄)温室从第 1 到第 5 个测试层的墙体表面温度(墙体的第 1 个测点)和墙体内 0.1 ~ 0.6 m 处测点温度均随温室气温变化呈周期性的变化,随着测点向墙体内延伸(即:墙体表面→0.1 m→0.2 m…),各测点的最高最低温差(波动幅值)逐渐减小;从相对应的各层来看,随墙体层次的下移,1 号温室各测点的温差变小速率比 2 号温室快,即 1 号温室各测点的温度随时间的变化比 2 号温室更趋于平稳,且相对应各层测点的温度 1 号温室比




(a) 1号温室第1层温室气温及墙体各测点温度变化 (b) 2号温室第1层温室气温及墙体各测点温度变化 (c) 1号温室第2层温室气温及墙体各测点温度变化

(d) 2号温室第2层温室气温及墙体各测点温度变化 (e) 1号温室第3层温室气温及墙体各测点温度变化 (f) 2号温室第3层温室气温及墙体各测点温度变化

(g) 1号温室第4层温室气温及墙体各测点温度变化 (h) 2号温室第4层温室气温及墙体各测点温度变化

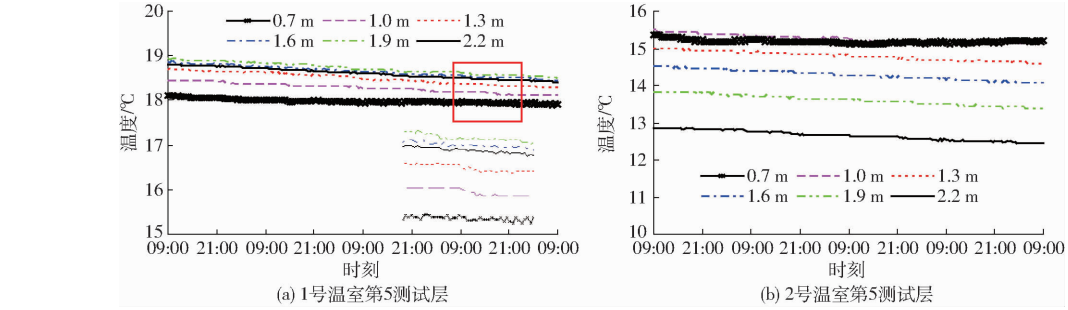
(i) 1号温室第5层温室气温及墙体各测点温度变化 (j) 2号温室第5层温室气温及墙体各测点温度变化

图 3 1 号和 2 号日光温室土墙各层测点温度变化(2015 年 12 月 30 日—2016 年 1 月 2 日)

Fig. 3 Temperature distributions of each testing layer in greenhouses No. 1 and No. 2 from December 30th, 2015 to January 2th, 2016

2 号温室明显增高，表明 1 号（厚墙体）和 2 号（薄墙体）温室的蓄放热层厚度基本相同，但 1 号温室蓄放热层温度幅值衰减较 2 号温室快。

为更好分析墙体内温度分布特性，均选取 1 号和 2 号温室第 5 测试层（1 号和 2 号温室均为墙体最厚部位。因温度测点均表现在图中，图形较乱，选取每隔 0.3 m 的测点作图）0.7、1.0、1.3、1.6 m、1.9、2.2 m 处测点作图，其温度分布如图 4 所示，图 4a 中线较密集，为表示清楚，选中一部分图进行放大（图中矩形框），放大部分显示在图形下方。




(a) 1号温室第5测试层　　(b) 2号温室第5测试层

图 4　1 号和 2 号日光温室第 5 测试层墙体内 0.7 ~ 2.2 m 处温度变化（2015 年 12 月 30 日—2016 年 1 月 2 日）

Fig. 4　Temperature variance of testing point in 0.7 ~ 2.2 m for fifth layer of greenhouses No. 1 and No. 2 from December 30th, 2015 to January 2th, 2016

根据图 4 数据得 1 号和 2 号温室第 5 测试层各测试点的温度平均值如表 1 所示。

**表 1　第 5 测试层墙体内 0.7 ~ 2.2 m 处测点温度平均值**

**Tab. 1　Temperature average of the fifth layer in 0.7 ~ 2.2 m**　　℃

| 温室 | 与墙体内表面距离/m | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0.7 | 1.0 | 1.3 | 1.6 | 1.9 | 2.2 |
| 1 号 | 17.98 | 18.27 | 18.48 | 18.64 | 18.71 | 18.61 |
| 2 号 | 15.18 | 15.25 | 14.78 | 14.27 | 13.60 | 12.65 |

由图 4 和表 1 中可看出，1 号温室（墙厚度 6 m）0.7 ~ 1.9 m 处测点温度逐渐升高，2.2 m 处测点温度开始下降。而 2 号温室（墙厚度 3 m）在 1.0 m 处测点温度已经开始下降。因此，在御冷层厚度相同的情况下，1 号温室比 2 号温室墙体温度相对稳定层（温度相对稳定层 = 墙体厚度 − 蓄放热层厚度 − 御冷层厚度）厚度增加较大，蓄积热量也较多，但因温室土墙体自然导热特性决定了温度相对稳定层内蓄积的热量很难在短时间内释放到温室内部。

### 2.2.2　晴天墙体蓄放热特性分析

温室墙体日间吸收的太阳辐射能量使其墙体内能增加，增加的内能即为墙体蓄热量 $q_{xr}$，其可以通过监测墙体内温度变化计算得到。参照文献[17]，本文将 0.6 m 厚的墙体离散成 12 块，每块墙体的厚度为 0.05 m。同时，通过 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6 m 处试验测得的墙体温度，利用一维非稳态导热体内各内节点温度数值解法，计算出 0.05、0.15、0.25、0.35、0.45、0.55 m 处（图 5 中▲）的温度，其一维非稳态导热体内各内节点温度数值方程为[18]

$$t_n^{(i+1)} = \frac{a\Delta\tau}{\Delta x^2}\left(t_{n+1}^{(i)} + t_{n-1}^{(i)}\right) + \left(1 - \frac{2a\Delta\tau}{\Delta x^2}\right)t_n^{(i)} \qquad (1)$$

其中　$a = \dfrac{\lambda}{\rho c}$

式中　$a$——热扩散率，$m^2/s$

$\lambda$——墙体导热系数，W/(m·K)

$\rho$——土墙体密度，$kg/m^3$

$c$——土墙比热容，J/(kg·K)

$t_n$——某时刻的温度，℃

$\Delta\tau$——时间间隔，min

$\Delta x$——每块墙体的厚度，m

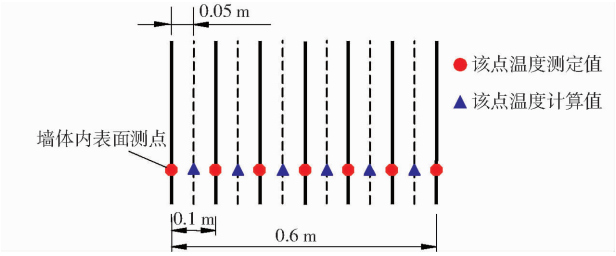



图 5　墙体内节点分布

Fig. 5　Distribution of nodes in wall

每一块墙体根据数值解法可以看作沿墙体厚度方向的一维稳态导热，蓄热量可表示为

$$q_k = \sum_{j=1}^{n} q_{rj} V \Delta\tau \qquad (2)$$

其中　$$q_{rj} = \rho c \frac{t_{j+1} - t_j}{\Delta\tau} \qquad (3)$$

式(3)代入式(2)整理得

$$q_k = \sum_{j=1}^{n} \rho c V (t_{j+1} - t_j) \qquad (4)$$

离散后的 12 块墙体蓄热量计算式为

$$q_{xr} = \sum_{k=1}^{12} q_k \qquad (5)$$

式中　$q_k$——每块墙体的蓄热量，J

$V$——墙体体积，$m^3$

$t$——墙体内各层温度,℃

$j$——墙体内部每一个温度节点各时刻的温度采集时间顺序(一般在晴天,$j=1$,为9:00 时的采集值,$j=2$,为 9:30 时的采集值,各值间隔 30 min,以此类推)

$k$——离散后的墙体块数

日光温室墙体的放热一般发生在放下保温被后,观测期间每天的放热时段为 16:30 到翌日9:00。因夜间温室墙体与温室薄膜、温室地面及其他墙体间辐射换热量可以忽略,其墙体的放热量仅取决于墙体与温室空气的对流换热量 $q_{fr}$,计算式可以表示为

$$q_{fr}=\sum_{j=1}^{n} h_{fj}(t_{fj}-t_{qj})A\Delta\tau \tag{6}$$

其中 $$h_{fj}=1.86\,|t_{qj}-t_{fj}|^{0.33}$$

式中 $h_{fj}$——温室空气与墙体表面的对流换热系数,W/(m²·K)

$t_{qj}$——墙体表面温度,℃

$t_{fj}$——距离墙体表面 0.1 m 处温室内空气温度,℃

$A$——墙体表面面积,m²

根据图 3 中 1 号和 2 号温室各测试层温度数据(2015 年 12 月 30 日—2016 年 1 月 2 日),利用式(4)~(6),对日光温室各测点 1 m 宽度范围计算 2 个温室各测试层(每个温室 5 个测试层)的蓄放热量,并将 4 d 的各测试层的蓄放热量取平均值,即为 4 d 每个测试层的平均蓄放热量,1 号和 2 号温室 5 个测试层蓄放热量对比如图 6 所示。数值计算用墙体的物理特性参数[19-20]为:墙体密度 2 000 kg/m³,导热系数 1.5 W/(m·K),比热容 1 010 J/(kg·K⁻¹)。

由图 6 可看出,1 号和 2 号温室各测试层蓄放热分布规律基本一致。在图 6a 中,4 个连续晴天期间,1 号和 2 号温室的各测试层平均蓄热量,第 2 层最大,第 1、3 和 4 层相差不大,第 5 层最小。据此分析,第 2 测试层位于温室的中上部,无作物和温室围护结构遮挡,接受太阳辐射最大;第 1 测试层比较靠近温室后屋面,随太阳高度角变化,存在一定程度的遮挡;另外,由于测试期间温室种植作物为黄瓜,作物对第 3、4、5 测试层具有不同程度的遮挡,且第 5 测试层遮挡最大,导致蓄热量最小。从图 6b 两温室的平均放热量来看,随着层次数值的增加(层次下移)其放热量逐渐增加,且 1 号温室各层的放热量都比 2 号温室的大,第 5 层更明显。

对比图 6a 和图 6b,第 2 测试层白天蓄积的热量最多,而夜间向室内放出的热量却仅比第 1 测试层多。据此分析,第 1、2 测试层位于梯形墙体上部,相对于第 3、4、5 测试层是热量向室外散失的主要部位。第 5 测试层虽白天蓄积的热量较少,但该层墙体最厚,热阻最大,夜间向室外耗散的热量最少,故向室内提供的热量较多。

将图 6a 和图 6b 中 5 个测试层的蓄热量和放热量加和后取平均定义为温室总平均蓄热量和放热量,即每个温室的总平均蓄热量和放热量。计算公式可表示为

$$\overline{Q}=\frac{\sum_{m=1}^{5} Q_m}{5} \tag{7}$$

式中 $\overline{Q}$——温室总平均蓄热量/放热量,J

$Q_m$——第 $m$ 层平均蓄热量/放热量,J

基于图 6a、6b 中各测试层的蓄热量和放热量数据,根据式(7)计算得到 1 号温室的总平均蓄放热量分别为 1 971.2、808.1 kJ,2 号温室的总平均蓄放热量分别为 1 888.9、763.1 kJ,2 个温室的总平均蓄放热量数值差异很小。为更好地分析温室的蓄放热关系特性,分别对 1 号和 2 号温室的放热效率(放热量与蓄热量的百分比)进行分析,其 1 号和 2 号温室的放热效率分别为 41.0% 和 40.4%,两者基本相同。据此分析,因厚薄墙体蓄放热层厚度相同,晴天时,薄墙体与厚墙体温室的蓄热量基本接近,对改善温室内热环境的效果基本相同。因此,薄墙体温室

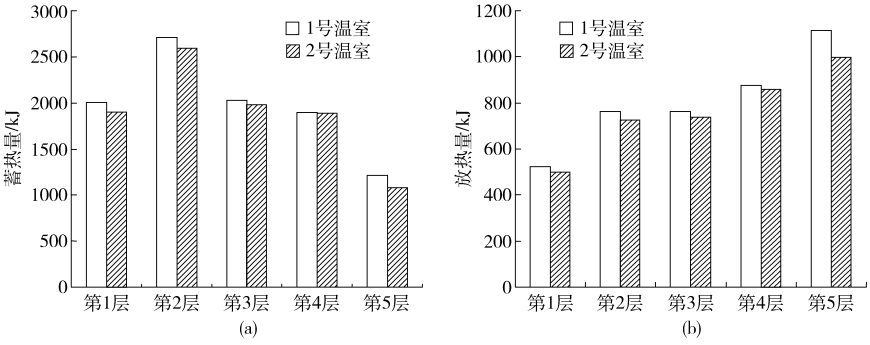



图 6 晴天 1 号和 2 号温室土墙蓄放热量对比(2015 年 12 月 30 日—2016 年 1 月 2 日)

Fig. 6 Comparison of heat storage and release in sunny day for greenhouses No. 1 and No. 2 from December 30th, 2015 to January 2th, 2016

能够满足温室生产需求，从节约土地的角度考虑，较薄墙体更具有优势。

### 2.3　阴天墙体放热特性对比分析

2016 年 1 月 4—6 日为连阴天气，鉴于连阴天气日光温室昼间的太阳辐射量很小，墙体蓄热量甚微，本文仅对连阴天时 1 号和 2 号温室墙体的放热量特性进行对比分析。温室墙体的放热主要由温室墙体表面与其附近（0.1 m 处）空气之间的温差产生对流换热，因此从温室墙体表面温度及气温的变化即可直观了解两温室墙体放热的差异。1 号和 2 号温室墙体表面温度及气温的变化如图 7 所示。

由图 7 中可以看出，在阴天开始的第 1 天云层较薄，有少量的散射光，两温室墙体附近的气温有明显的升高，墙体表面温度也稍有升高，此时气温高于墙体表面温度，还未进入墙体的放热过程；此后两温室墙体附近的气温和墙体表面温度则是持续的下降，逐渐变为气温低于墙体表面温度，此时墙体表面开始放热。在第 2 天和第 3 天的昼间仍有一定量的散射光，可以看出 2 个温室气温的微小变化，墙体表面的温度变化更小；两温室内继续保持着墙体附近气温低于墙体表面温度的趋势持续地下降，并且随着测试层的下移和阴天时间的延长，两者的温度差值逐渐变大；阴天第 3 天墙体附近气温下降速度加快，表明墙体放热量对于温室散热量的补充能力在变小。

从表 3 墙体内表面平均温度与温室平均气温之间的温差可以看出，1 号和 2 号温室从第 1 测试层至第 5 测试层的温差均为逐渐增大，且 1 号温室各层的温差都比 2 号温室相对应层高。表明连阴天时，温室墙体的放热量由高层至低层是逐渐增加的，

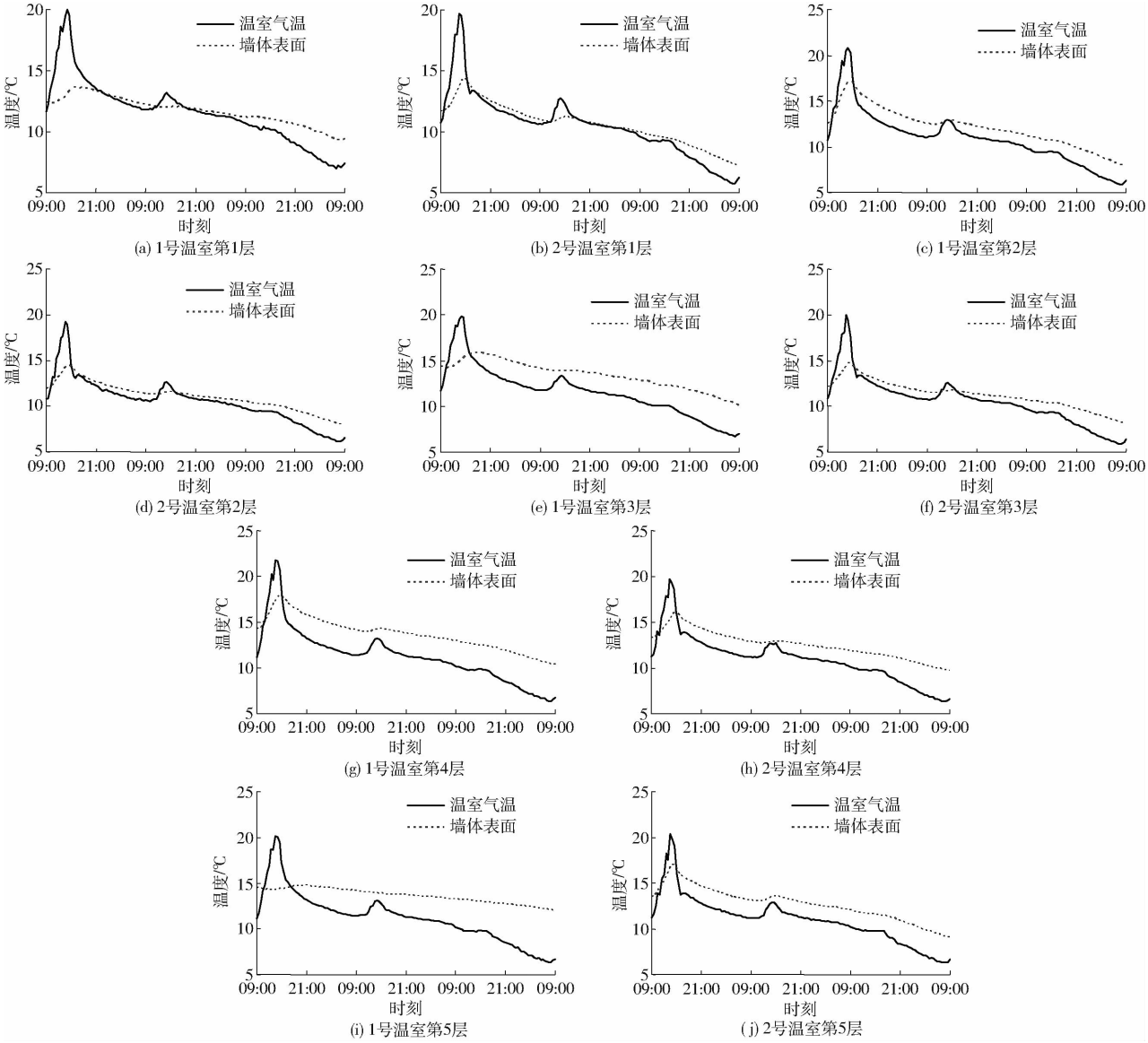



图 7　阴天 1 号和 2 号温室墙体各测试层内表面温度与其附近（0.1 m 处）气温的变化（2016 年 1 月 4—6 日）

Fig. 7　Temperature comparisons between surface wall and greenhouse air in cloudy day for greenhouses No. 1 and No. 2 from January 4th – 6th, 2016

且 1 号温室墙体放热好于 2 号温室。

**表 3 阴天墙体内表面平均温度与温室平均气温之间的温差**

**Tab. 3 Temperature difference between surface wall and greenhouse air in cloudy day** ℃

| 温室 | 第 1 层温差 | 第 2 层温差 | 第 3 层温差 | 第 4 层温差 | 第 5 层温差 |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 号 | 0.66 | 1.46 | 2.24 | 2.69 | 2.85 |
| 2 号 | 0.45 | 0.77 | 0.99 | 1.81 | 1.91 |

由图 7 可以看出,连阴天时,墙体表面温度基本都高于温室气温,仅有很少时段低于温室气温,基本为全天放热。因此仅对连阴天时放热量进行分析。利用式(6)计算阴天(1 月 4—6 日)1 号和 2 号温室各测试层墙体的放热量(墙体表面温度高于温室气温的时段),并将 3 d 的各测试层的放热量取平均值,即 3 d 每个测试层的平均放热量如图 8 所示。

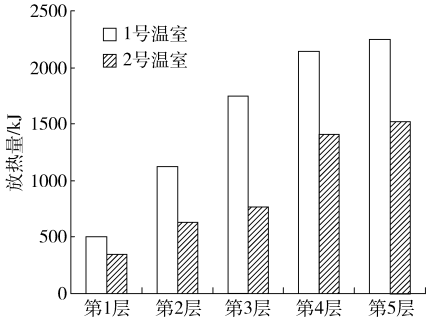



图 8 连阴天气 1 号和 2 号温室土墙各测试层放热量比较(2016 年 1 月 4—6 日的均值)

Fig. 8 Comparison of every testing layer heat release in cloudy day for greenhouses No. 1 and No. 2 from January 4th – 6th, 2016

由图 8 可看出,两温室各测试层墙体的放热量从第 1 层至第 5 层逐渐升高,平均放热量分别为 1 551.4、935.5 kJ,两温室差值为 615.9 kJ,1 号温室的放热量明显高于 2 号温室,表明温室较厚墙体(1 号)的放热量明显高于温室较薄墙体(2 号)的放热量。

将图 7 中 1 号和 2 号温室 5 个测试层的气温分别取均值,得到 2 个温室的平均温度如图 9 所示。

由图 9 中可以看出,随着持续的阴天,1 号和 2 号温室平均气温均持续不断的下降。在 1 号温室的放热量明显高于 2 号温室放热量(图 8)的情况下,实际上 1 月 4—6 日 1 号温室平均气温(距离墙体内表面 0.1 m 处)只比 2 号温室高 0.6℃。本文也对连阴天情况下,1 号和 2 号温室墙体内温度相对稳定层温度进行了监测,测试结果与图 4 规律相同,即 1 号温室(厚墙体温室)墙体温度相对稳定层较厚,蓄积热量较多。

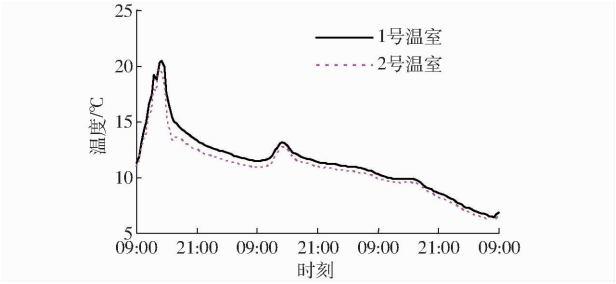



图 9 阴天 1 号和 2 号温室平均气温对比(2016 年 1 月 4—6 日)

Fig. 9 Air temperature comparison of the greenhouses No. 1 and No. 2 in cloudy day from January 4th – 6th, 2016

据厚薄墙体蓄放热特性分析表明,在晴天情况下,厚薄墙体蓄放热量值相差很小。在阴天时,厚墙体的放热量明显高于薄墙体,但对改善温室内热环境效果有限。从土地利用和温室轻简化设计角度考虑,薄墙体温室即可满足生产需要又能节约土地。从厚薄墙体温度相对稳定层分析可知,厚墙体内温度相对稳定层的温度较高,蓄积热量较多,如采取有效措施提取这部分热量用以改善温室内热环境,厚墙体将具较好的节能优势。

## 3 结论

(1)晴天及阴天时 1 号(厚墙体温室)和 2 号温室(薄墙体温室)的 5 个测试层的放热量均为从第 1 层至第 5 层逐渐升高,两温室土墙体各层次的温度变化趋势相同。

(2)晴天时,1 号和 2 号温室各测试层蓄放热分布规律基本一致,且 2 个温室蓄放热量数值相差很小,墙体第 2 测试层无遮挡蓄热量最大。因第 1、2 测试层位于梯形墙体上部,为墙体向室外散热的主要部位,其夜间向室内的放热量仅高于第 1 测试层,与第 3 层相近,小于第 4、5 测试层;阴天时,2 个温室各测试层放热规律与晴天时相似,梯形墙体从上至下,随墙体厚度增加,墙体热阻增大,第 1 ~ 5 测试层向室内放热量依次增加,且 1 号厚墙体温室放热量明显高于 2 号薄墙体温室。

(3)在晴天时,夜间墙体释放的热量翌日昼间即可得到蓄热补充,温室墙体的厚薄对于室内平均温度高低的影响差异不明显,薄墙体温室即可满足温室生产要求。连阴天时墙体基本上无蓄热只有放热,厚墙体温室放热量明显高于薄墙体温室,距离墙体内表面 0.1 m 处的平均气温仅差 0.6℃。但从1 号温室(厚墙体温室)和 2 号温室(薄墙体温室)墙体内温度相对稳定层分析表明,厚墙体温室温度相对稳定层较厚,蓄积热量较多,仅依靠墙体蓄放热层的导热还不能将温度相对稳

定层内蓄积的热量在短时间内释放到温室内。因此，为更好地发挥厚土墙温室的节能效果，建议采取土墙体内相变材料的混用或墙体内增加盘管式水循环换热装置等方式，将温度相对稳定层内热量传递到温室内部以进一步提高室内温度的研究值得商榷。

## 参 考 文 献


1 WANG Junwe, LI Shuhai, GUO Shirong, et al. Simulation and optimization of solar greenhouses in Northern Jiangsu Province of China[J]. Energy and Buildings, 2014, 78(8): 143 – 152.

2 ZIAPOUR B M, HASHTROUDI A. Performance study of an enhanced solar greenhouse combined with the phase change material using genetic algorithm optimization method[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 110(1): 253 – 264.

3 陈超，果海凤，周玮，等. 相变墙体材料在温室大棚中的实验研究[J]. 太阳能学报，2009，30(3)：287 – 293.
CHEN Chao, GUO Haifeng, ZHOU Wei, et al. Experimental research of the composite phase change material in greenhouse[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2009, 30(3): 287 – 293. (in Chinese)

4 王宏丽，李晓野，邹志荣. 相变蓄热砌块墙体在日光温室中的应用效果[J]. 农业工程学报，2011，27(5)：253 – 257.
WANG Hongli, LI Xiaoye, ZOU Zhirong. Application of brick wall with phase change rice husk in solar greenhouses[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(5): 253 – 257. (in Chinese)

5 王宇欣，刘爽，王平智，等. 日光温室根区热环境相变调控系统设计与性能试验[J/OL]. 农业机械学报，2016，47(8)：294 – 304. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20160839&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.08.039.
WANG Yuxin, LIU Shuang, WANG Pingzhi, et al. Application effect of greenhouse root zone thermal environment control system with latent functionally thermal fluid[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(8): 294 – 304. (in Chinese)

6 王宇欣，刘爽，王平智，等. 温室蓄热微胶囊相变材料制备筛选与性能表征[J/OL]. 农业机械学报，2016，47(9)：348 – 358. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20160947&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.047.
WANG Yuxin, LIU Shuang, WANG Pingzhi, et al. Preparation and characterization of microencapsulated phase change materials for greenhouse application[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 348 – 358. (in Chinese)

7 BENLI H. Energetic performance analysis of a ground-source heat pump system with latent heat storage for a greenhouse heating [J]. Energy Conversion and Management, 2011, 52: 581 – 589.

8 TIWARI S, BHATTI J, TIWARI G N. Thermal modelling of photovoltaic thermal (PVT) integrated greenhouse system for biogas heating[J]. Solar Energy, 2016, 136: 639 – 649.

9 ZHANG Baogang, FAN Xinying, LIU Ming, et al. Experimental study of the burning-cave hot water soil heating system in solar greenhouse[J]. Renewable Energy, 2016, 87: 1113 – 1120.

10 佟雪姣，孙周平，李天来，等. 日光温室太阳能水循环系统冬季与夏季试验效果[J]. 太阳能学报，2016，37(9)：2306 – 2313.
TONG Xuejiao, SUN Zhouping, LI Tianlai, et al. Experimental effects of solar energy water-cycling system for solar greenhouse in winter and summer[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2016, 37(9): 2306 – 2313. (in Chinese)

11 黄雪，王秀峰，魏珉，等. 下挖式日光温室土墙温度和热流的变化规律[J]. 应用生态学报，2013，24(6)：1669 – 1676.
HUANG Xue, WANG Xiufeng, WEI Min, et al. Variation patterns of soil wall temperature and heat flux in sunken solar greenhouse[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(6): 1669 – 1676. (in Chinese)

12 彭东玲，张义，方慧，等. 日光温室墙体一维导热的 MATLAB 模拟与热流分析[J]. 中国农业大学学报，2014，19(5)：174 – 179.
PENG Dongling, ZHANG Yi, FANG Hui, et al. MATLAB simulation of one-dimensional heat transfer and heat flux analysis of north wall in Chinese solar greenhouse[J]. Journal of China Agricultural University, 2014, 19(5): 174 – 179. (in Chinese)

13 杨建军，邹志荣，张智，等. 西北地区日光温室土墙厚度及其保温性的优化[J]. 农业工程学报，2009，25(8)：180 – 185.
YANG Jianjun, ZOU Zhirong, ZHANG Zhi, et al. Optimization of earth wall thickness and thermal insulation property of solar greenhouse in Northwest China[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(8): 180 – 185. (in Chinese)

14 张林华，张峰，刘珊，等. 下沉式土质墙体温室室内温度场的三维非稳态模拟[J]. 太阳能学报，2010，31(8)：965 – 971.
ZHANG Linhua, ZHANG Feng, LIU Shan, et al. Three-dimensional non-steady-state simulation of sunken cob wall greenhouse indoor temperature field[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2010, 31(8): 965 – 971. (in Chinese)

15 何芬，马承伟，周长吉，等. 基于有限差分法的日光温室地温二维模拟[J/OL]. 农业机械学报，2013，44(4)：228 – 232. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20130440&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.04.040.
HE Fen, MA Chengwei, ZHOU Changji, et al. 2-D simulation of soil temperature in solar greenhouse based on finite difference method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(4): 228 – 232. (in Chinese)

16 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.
LI Ming, ZHOU Changji, WEI Xiaoming. Thickness determination of heat storage layer of wall in solar greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(2): 177 – 183. (in Chinese)

17 史宇亮，王秀峰，魏珉，等. 日光温室土墙体温度变化及蓄热放热特点[J]. 农业工程学报，2016，32(22)：214 – 221.
SHI Yuliang, WANG Xiufeng, WEI Min, et al. Temperature variation, heat storage and heat release character of soil wall in solar greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(22): 214 – 221. (in Chinese)

18 李友荣. 传热分析与计算[M]. 北京：中国电力出版社，2013.

19 建筑工程常用数据系列手册编写组. 暖通空调常用数据手册[M]. 北京：中国建筑工业出版社，2002.

20 高明. 基于映像法的土壤热导率和热流密度监测系统研制与分析[D]. 北京：中国农业大学，2014.
GAO Ming. Development and analysis of soil thermal conductivity and heat flux monitoring system based on image method [D]. Beijing: China Agricultural University, 2014. (in Chinese)