

# 越冬期日光温室土质墙体温度变化特性研究

胡婧娟<sup>1</sup>, 樊贵盛<sup>2</sup>

(1. 太原理工大学 环境科学与工程学院, 山西 太原 030024; 2. 太原理工大学 水利科学与工程学院, 山西 太原 030024)

**摘 要:**对日光温室土质墙体的分层温度、温室内地面土壤的分层温度、室内外气温进行了监测,研究了日光温室墙体的分层温度变化特征及影响温度分布的原因。结果表明:土质墙体的分层温度以一定的周期呈正弦或余弦的变化,土质墙体表层温度对气温的变化响应较明显,深层温度对气温的变化响应不明显。随着距离外墙表面的深度增大,温度波的振幅逐渐减小,最大值最小值出现的时间也出现了滞后现象,墙体中有约 120 cm 的土壤温度基本不变,温度波的振幅很小,说明土质墙体中有恒温层的存在。墙体温度波的振幅大于同层次土壤的振幅。温度也高于同层次的土壤。这是因为分层土壤的热扩散率不同所导致。土质墙体在整日内都是吸热体,起到了良好的蓄热作用;而地面土壤在夜间的某个时段内是放热体,起到了保持室内温度的作用。土质墙体整日内不同时刻的温度分布规律是随着距内墙表面距离的增大而缓慢递减。

**关键词:**日光温室;土质墙体;温度;变化规律

**中图分类号:**S 625 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2013)23-0050-05

日光温室是充分利用太阳能的节能型建筑,最大限度地保存室内热量从而有效地节省能源是温室维护结构设计主要考虑的问题<sup>[1]</sup>。墙体作为温室的主要围护结构之一,对温室内的热环境有直接的影响,我国的专家学者曾对几种温室墙体的温度分布进行了观测。陈瑞生等<sup>[2]</sup>对鞍山、天津等地建造使用的 2 类日光温室进行了墙体、前屋面覆盖物的温度观测,分析研究了 2 类温室墙体的吸放热时间。佟国红等<sup>[3]</sup>对结构相同、墙体材料不同的温室温度环境进行了测试,探讨了日光温室的节能效果及有效提高温室热环境的墙体材料及其组成。

目前提高温室保温性能的方法主要集中在优化墙体结构上,大多采用的是不同材料组成的复合异质墙体。在各种不同材料组成的墙体中,土质墙体日光温室的应用面积最大,由于其造价低、保温性好,是西北地区的主流。土壤温度的变化主要取决于太阳辐射水平、气温变化以及土壤的热物理性质,并受土壤表面和大气间

的热量交换的影响。但目前对于单一土壤组成的日光温室墙体的温度分布研究较少,特别是对于组成土质墙体土壤的物理性质对土质墙体温度分布影响研究更少。现通过分析墙体土壤的性质,对墙体剖面温度、温室内外气温、温室内选定点的剖面地温连续观测的基础上,研究墙内温度的变化规律,分析出现这些温度变化规律的原因,以期为提高日光温室保温性能提供理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验日光温室位于山西省吕梁市离市区信义镇小神头村,北纬 37°35',东经 111°25'。该地区属典型的高海拔低温山区,海拔在 1 300 m 以上,年平均气温为 8.9℃,最高气温 35℃,最低气温 -18℃,冬季寒冷少雪,春季较湿润且多风,夏季炎热,雨量集中。无霜期一般为 154 d 左右,年降雨量为 500 mm,≥0℃的积温 3 700℃,≥10℃的活动积温 3 000℃,年平均日照时数 2 500 h,全区光能资源充足。

### 1.2 试验温室

供试设施蔬菜示范基地日光温室坐北朝南,东西向长 60 m,南北向长 8 m,后墙高 4.0 m,脊高 4.0 m,东西墙及北墙为厚捣土墙,干容重为 1.47 g/cm<sup>3</sup>,体积含水量 12.15%~45.00%。前屋面覆盖物为 PE 膜,不透明保温覆盖材料为多层复合保温被。夜间前屋面盖保温被保温,中午通风。室内种植的作物为番茄。日光温室剖面见图 1。

**第一作者简介:**胡婧娟(1986-),女,河北邢台人,博士研究生,现主要从事土壤物理与水土环境控制等研究工作。E-mail: hujingjuan8642@163.com.

**责任作者:**樊贵盛(1955-),男,山西孝义人,教授,博士生导师,现主要从事土壤物理与灌排理论及技术等研究工作。E-mail: fanguis5507@263.net.

**基金项目:**山西省科技攻关资助项目(20130311010-3);亚洲开发银行技术援助赠款资助项目(0188-PRC)。

**收稿日期:**2013-09-06

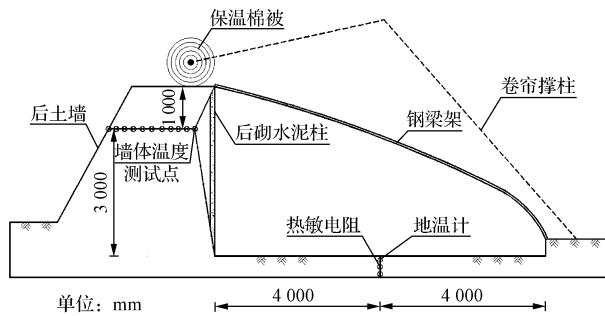


图1 日光温室纵剖面

Fig. 1 Longitudinal section of solar greenhouse

### 1.3 试验方法

试验从2011年11月开始,每隔7~10 d测试1次,每次测试2~3 d,到2012年4月底结束,横跨整个越冬期。每天选定的测试时间点为0:00、4:00、7:00、9:00、11:00、14:00、16:00、19:00,中午11:00~15:00之间由于气温变化幅度较大,增大观测频率,每1 h观测1次。

**1.3.1 日光温室墙体温度** 墙体温度测量采用热敏电阻法。热敏电阻法测量包括热敏电阻及 UT-56 型数字万用表,UT-56 型数字万用表量程为 200  $\Omega$ ~20 M $\Omega$ ,测量精度为 $\pm(0.8\%+5)$ ,精确值达到 0.02 $^{\circ}\text{C}$ 。测试点位于日光温室东西向的中部。距后墙顶 100 cm 处横向埋设热敏电阻。距内墙表面 2 m 内,每隔 20 cm 布置 1 个热敏电阻;距内墙表面 2~3 m 的距离内,每隔 10 cm 布置 1 个热敏电阻。用万用表测量热敏电阻的即时阻值后,利用下列公式换算成温度值:

$$x = \frac{B}{\ln \frac{R_x}{R_{25}} + \frac{B}{298.15}} - 273.15$$

式中, $R_x$ 、 $R_{25}$ 为实时实测电阻和温度为 25 $^{\circ}\text{C}$ 时的电阻值, $\Omega$ ; $x$ 为实时温度值( $^{\circ}\text{C}$ ); $B$ 为常数,一般取 3 000。

**1.3.2 日光温室内地温** 日光温室内地温采用地温计及热敏电阻相结合的方法进行测量。测试点位于日光温室中部,即于东西 30 m,南北 4 m 处。距地面 0~40 cm 处的地温用地温计测量,40~300 cm 处的地温使用热敏电阻测量。地温计为直角 5 支组地温计,能分别测量 5、10、15、20、25 cm 深度处的土壤温度。

**1.3.3 室内外气温** 采用煤油温度计测量。在距室内外 地温及墙体温度测试点垂直距离 10 cm 处设点并测量气温。

## 2 结果与分析

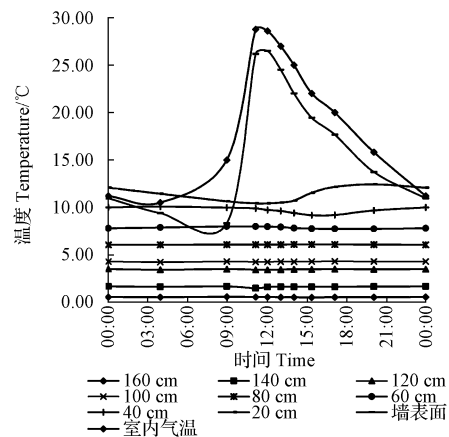
### 2.1 土质墙体不同深度墙体温度变化规律

**2.1.1 墙体温度随时间变化规律** 将温室墙面和地面土壤看作是一个半无限大物体,在简谐热的作用下,温室内外部温度及墙体内温度随时间和位置的变换如图 2 所示。由图 2-a 和图 2-b 可知,温室内外空气温度日

变化呈正弦或余弦函数变化规律<sup>[4]</sup>:

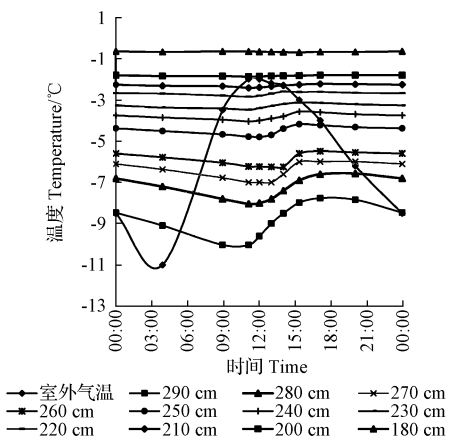
$$T_a(t) = \overline{T_a} + T_{aR} \cdot \cos\left(\frac{360}{Z}t - \phi\right)$$

式中, $\overline{T_a}$ 为气温的日平均值, $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{aR}$ 为气温的日变幅,即气温波的振幅,最高温度与平均温度之差, $^{\circ}\text{C}$ ;  $Z$ 为气温波的周期,当考虑日变化时,则为 24;  $\phi$ 为气温波的初相位,deg/h。



a. 距内墙表面 0~160 cm

a. Within the distance of 0~160 cm from interior wall



b. 距内墙表面 180~290 cm

b. Within the distance of 180~290 cm from interior wall

图2 不同深度墙体温度随时间变化情况

Fig. 2 The situation of wall temperature change with time at different depths

图 2-a 及 2-b 是 2 月 16 日整日连续观测的土质墙体分层温度值(2 月 16 日天气晴,日最高温度 1 $^{\circ}\text{C}$ ,最低温度 -13 $^{\circ}\text{C}$ ,西北风 4~5 级,室外平均湿度 2.3%,蒸发量 2.5 mm)。由图 2-a、2-b 还可以看出,土质墙体的温度随着室内外空气的变化也进行周期性变化,呈正弦或余弦函数的变化规律。但是外墙的温度对气温的变化的响应存在着滞后效应,图 2-a 中土质墙体内表面的温度变化和室内气温的变化基本是同步的,距墙内表面 20 cm 处的气温在 12:00~15:00 缓慢上升,在 17:00 左右达到

最大值。靠近内墙表面的墙体先达到极值,随着距离的增加,墙体温度变化的滞后效应越来越大,即最大值和最小值出现的时间越来越晚。温度也随着距墙内面距离的增大逐步降低。同理,图 2-b 中靠近墙外表面处的墙体温度也在室外气温达到最大值之后,相应地在之后的某个时刻达到了最大值。而且,由图 3 可知,不论是靠近外表面还是内表面,随着距内墙表面距离的增加,温度的变化幅度越来越小,即温度波动的振幅越来越小。图 2 中,在距墙内表面 80~200 cm 处,全天的温度值基本呈一条直线,处于全天不变的状态。从图 3 也可以看出,80~200 cm 处的温度波振幅为 0,土质墙体温度基本处在全天不变的状态,表明在土质墙体中部,约有 120 cm 厚的恒温层存在。

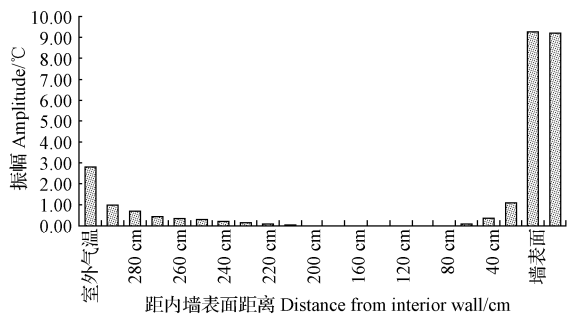


图 3 土质墙体各层次温度波动振幅  
Fig. 3 Temperature wave amplitude of different layer of the wall

2.1.2 墙体温度随时间变化规律原因初探 一般来说,热量的迁移主要有热传导、对流换热和辐射换热 3 种形式。热量传递过程的动力是温度差,即温度梯度。根据

实际研究表明,由温度梯度产生的自然对流换热,只有当颗粒尺寸比较大时才会比较显著<sup>[5]</sup>;而辐射换热通常仅不超过介质中整体换热的 1%。因此,该试验中仅考虑热传导方式对土壤中热量传递的贡献。热传导理论的基本规律为傅里叶定律。根据傅里叶定律和质量守恒定律得出的导热微分方程中定义土壤的热扩散率  $a$  为<sup>[6-7]</sup>:

$$a = \frac{\lambda}{c_v} = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}$$

即热扩散率为热导率  $\lambda$  与体积热容量  $c_v$  之比 ( $\text{cm}^2/\text{s}$ ),  $\rho$  为土壤容重,  $c$  为土壤比热。热扩散率表示单位时间内单位容积的土壤,由于流入(或流出)热量,导致土壤温度升高或降低的程度。反映了土壤传递温度和消除层温度差异的能力。在一定的热量供给下,能使土壤温度升高的快慢和难易决定于其热扩散率,热扩散率直接影响土壤温度的垂直分布。热扩散率是随土壤质地、干容重和含水量的大小而变化的。对于组成土质墙体的土壤,可以认为其每层的土壤容重、土壤的质地是相同的,那么对热扩散率影响最大的是土壤含水率。从表 1 可以看出,含水率的分布规律是,靠近墙中央的土壤含水率较高,靠近两端墙表面的土壤含水率较低,即靠近墙中央的土壤的热扩散率较低,靠近墙两端的土壤的热扩散率较高。热扩散率大,则温度升降明显,温度变化大。再加上热量从表层到里层传递需要一定的时间,在传递的过程中也有一定的损失,这就是导致墙体表层温度波随气温的变化较明显的原因,墙体表面温度波振幅较大,而越往里层,振幅越小(图 3)。土质墙体中央土壤热扩散率比其表面热扩散率小也直接导致了温度的最大值和最小值出现时间相应的延后。

表 1 土质墙体和地面土壤物理参数

Table 1 Physical parameter of the wall and the ground soil

取土地点 Experimental site	剖面层次 The layer/cm	土壤颗粒组成 The form of soil particle/%			土壤质地 Soil texture	干容重 Dry density	重量含水率 Gravimetric moisture content/%	体积含水率 Volume moisture content/%
		砂粒含量 Content of sand	粉砂粒含量 Content of silt	粘粒含量 Content of clay				
		2~0.02 mm	0.02~0.002 mm	<0.002 mm				
土质墙体 (从内表面开始) The cob wall (From internal surface)	0~20	58.360	27.100	14.540	砂质壤土	1.472	8.251	12.145
	20~40	—	—	—	—		9.396	13.832
	40~60	—	—	—	—		11.204	16.492
	60~80	—	—	—	—		10.400	15.309
	80~100	—	—	—	—		12.392	18.241
	160~180	—	—	—	—		18.501	27.234
	180~200	—	—	—	—		18.813	27.693
	200~220	—	—	—	—		22.423	33.007
	220~240	—	—	—	—		27.633	40.676
	240~260	—	—	—	—		30.566	44.993
日光温室中央 The centre of solar greenhouse	260~280	—	—	—	—		21.739	32.000
	280~300	58.420	27.400	14.180	砂质壤土	1.390	15.838	23.314
	0~20	57.975	28.100	13.925	砂质壤土		22.361	31.081
	20~40	55.800	29.300	14.900	砂质壤土	1.370	20.821	28.525

## 2.2 土质墙体与同层次的地面土壤温度变化规律及吸放热时间的比较

图4表示的是全天内气温、土质墙体和温室内地面土壤表面、20、40 cm处的温度随时间变化曲线。从图4可以看出,墙体表面的温度和土壤表面的温度和室内气温的变化趋势是相同的,达到最大值和最小值的时间相同。而墙内表面的温度却比土壤表面的温度变化幅度大。整日内墙体表面的温度的最大值要比地面土壤表面温度的最大值大 $9.1^{\circ}\text{C}$ ,而最小值要比土壤表面温度的最小值小 $2.2^{\circ}\text{C}$ 。墙内表面20 cm处的温度和地面土壤20 cm处的温度变化趋势也相同,但是墙内表面20 cm处的温度波的振幅却大于地面土壤20 cm处的温度波的振幅。但是墙内表面20 cm处的温度在每个时刻均小于地面土壤20 cm处的温度。40 cm处的地温和墙温也是如此。

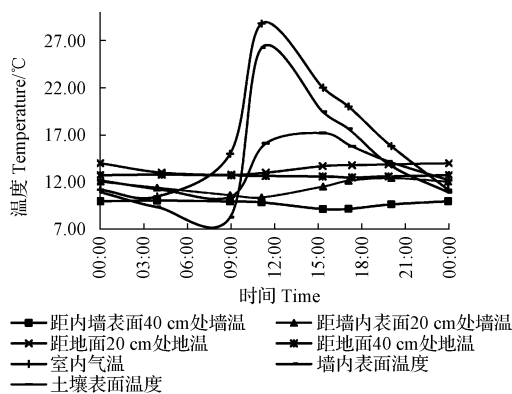


图4 同层次墙体温度与土壤温度

Fig. 4 Wall temperature and the soil temperature in the same layer

这是因为土质墙体土壤的热扩散率大于地面土壤的热扩散率。从表1可以看出,土质墙体土壤的砂粒含量、干容重都大于地面土壤,而含水率却小于地面土壤。已知热扩散率与土壤的容重和砂粒含量成正比,在一定范围内与土壤的含水率成反比。因此可以得出土质墙体土壤的热扩散率大于地面土壤的热扩散率。热扩散率大的土壤,其表层温度升降明显,温度变化大;而热扩散率小的土壤,则变化小。另外,由于地面土壤种植了番茄,植株对太阳辐射具有一定的遮挡作用,这也是造成墙体温度大于同层次土壤温度的原因之一。

由图4可知,全天室内的空气温度始终高于墙内表面的温度,说明从空气到墙内表面具有一定的温度梯度,墙体始终从室内空气中吸收热量,始终是吸热体。而土壤温度则不然,在4:30~22:30约18 h中,室内空气温度大于土壤表面的温度,具有一定的温度梯度。温度差决定着热量的运动方向,热量在一定的条件下常常是从温度梯度高的地方向温度梯度低的地方运动。土

壤从空气中吸收热量,说明土壤在这个时段内是吸热体。而在整日其它的时间内,室内空气的温度小于土壤表面温度,温度梯度的方向变为反向,土壤向空气释放热量,是放热体。表明土质墙体在全天都在储存能量,具有良好的蓄热性能;而土壤在气温较高的时候储存能量,在气温较低的时候,是放热体,起到了在室内气温下降的时候,释放能量,保持室内温度的作用。

## 2.3 土质墙体不同时刻温度随测点位置变化规律

从图5可以看出,8个不同时间点的温度曲线基本趋势是一致的,呈一条直线,而且随着距内墙表面深度的不断加深,温度值呈整体下降的趋势,具有由内表面向外表面的温度梯度。内墙表面和外墙表面的温度日变化幅度较大,内墙表面的温度日变化幅度远大于外墙表面,这与日光温室内部的气温变化幅度大于室外的温度变化幅度密切相关。不同时刻温度随着距离墙表面深度的增加,变化幅度变小,距内墙表面80~200 cm处各时间点的温度值基本重合为一点,说明土质墙体内部有约120 cm厚度的恒温层存在。这与上述的研究结果是一致的。整日内都具有从内表面到外表面的温度梯度,虽然存在一定的温度梯度,但是由于进行热交换之后,80~120 cm之间测点的温度值在不同时刻基本处于恒定的状态,这说明墙体的厚度已经能够达到预期的保温性能。

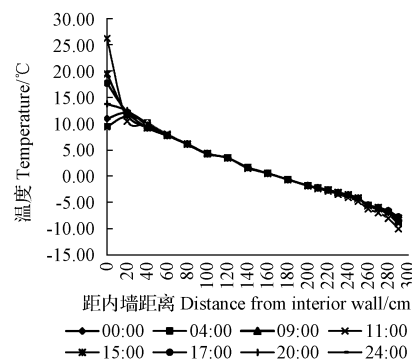


图5 土质墙体不同时刻温度随测点位置变化

Fig. 5 Change of wall temperature in different time with location of measuring points

## 2.4 越冬期内日光温室土质墙体温度的季节变化规律

由图6、表2可知,从2011年11月到2012年2月,气温逐步降低,土质墙体内部温度随距离内表面的距离增大而缓慢降低。2012年1月开始,气温缓慢回升,但是墙外表面温度并没有立刻升高,而是继续降低,在3月之后才开始回升。发生明显响应的距离在100 cm之内,越靠近内表面,温度的变化幅度越小,说明土质墙体土壤温度对气温的变化存在滞后效应,土壤表面温度的波动对深层次土壤的温度不会产生较大的影响。



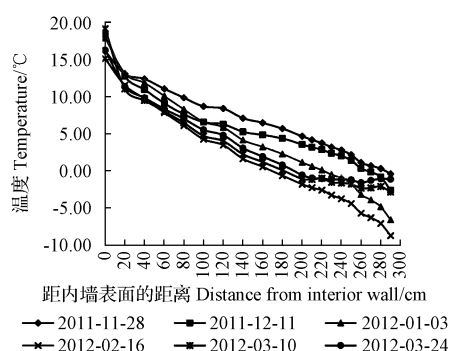


图6 越冬期土质墙体日均温度的垂直分布规律

Fig. 6 Vertical distribution law of the wall temperature within the whole winter

表2 越冬期室外温度

Table 2 Air temperature outside within the whole winter

日期 Date /年-月-日	2011-11-28	2011-12-11	2012-01-03	2012-02-16	2012-03-10	2012-03-24
室外温度均值 Average air temperature in outside/°C	5.07	-10.53	-14.20	-5.81	0.08	5.65

### 3 结论

该试验结果表明,土质墙体不同层次的土壤温度与时间的关系基本呈正弦或余弦的变化规律。土质墙体表层温度对气温变化的响应较明显,深层次的土壤温度对气温变化的响应不明显。越靠近土质墙体的中心,温度波的振幅越小,而且最大值和最小值出现的时间随着距离墙体表面深度的增大,出现了滞后的现象。这主要

是由于土质墙体中心的热扩散率小于土质墙体表面的热扩散率的原因。土质墙体内表面,距离内表面 20 cm 和 40 cm 处的土壤温度与同层次的地面土壤温度变化趋势是相同的,但是墙体温度却大于同层次的地面土壤温度。从影响热扩散率的几个因素考虑,可以得出墙体土壤的热扩散率大于地面土壤的热扩散率,从而影响墙体温度和同层次土壤温度的分布。墙体在整日都是吸热体,起到了良好的蓄热作用;而土壤在夜间的约 6 个小时之内,处于向空气释放热量的状态,是放热体,起到了保持室内温度的作用。墙体内有约 120 cm 厚的恒温层存在,起到了良好的隔热作用。土质墙体整日内不同时刻的温度分布规律是随着距内墙表面的距离增大,缓慢递减的。

### 参考文献

- [1] 佟国红,王铁良,白义奎,等.日光温室墙体传热及节能分析[J].农业系统科学与综合研究,2003(2):101-102,105.
- [2] 陈端生,郑海山,刘步洲.日光温室气象环境综合研究I.墙体、覆盖物热效应研究初报[J].农业工程学报,1990(2):77-81.
- [3] 佟国红,王铁良,白义奎,等.日光温室墙体传热特性的研究[J].农业工程学报,2003(3):186-189.
- [4] 康绍忠.土壤-植物-大气连续体水热动态模拟的研究[J].生态学报,1991(3):256-261.
- [5] Farouki O T. Thermal Properties of Soils, CRREL Monograph 81-1, U. S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, 1981.
- [6] 雷志栋,杨诗秀,谢森传.土壤水动力学[M].北京:清华大学出版社,1988.
- [7] 华孟,王坚.土壤物理学[M].北京:北京农业大学出版社,1993.
- [8] 郇庆炉,薛香,段爱旺.日光温室室内温度特点及其变化规律研究[J].灌溉排水学报,2003,22(6):50-53.

## Study on Temperature Variation Characteristics of Cob Wall in Solar Greenhouse in Winter

HU Jing-juan<sup>1</sup>, FAN Gui-sheng<sup>2</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024; 2. College of Hydraulic Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024)

**Abstract:** The stratification temperature of cob wall, stratification temperature of ground soil in solar greenhouse and air temperature inside and outside the solar greenhouse were determined, temperature variation characteristics of cob wall and reason of influence on temperature distribution were analyzed. The results showed that stratification temperature of cob wall changes period in sine or cosine within a certain. Responses of skin layer of cob wall to air temperature were obvious; on the contrary, responses of deep layer of cob wall to air temperature were not obvious. With the increase of distance to the cob wall surface, amplitude of temperature wave gradually decreased. The lag phenomenon appeared like occurrence time of the minimum and maximum value. The temperature of about 120 cm soil within the cob wall remained unchanged and amplitude of temperature wave was minimal, which illustrated that there was constant temperature layer within the cob wall. The amplitude of temperature wave in the cob wall was larger than that of the same layer in the soil of the same layer and the temperature in the cob wall was higher than in the same layer, which was resulted in the differences of thermal diffusivity. Cob wall was heat receiver in the whole day and played a good role of heat storage; the ground soil in a certain period of night was heat releaser, and played a role of keeping the indoor temperature. The temperature distribution rule of cob wall in the different period of the whole day was that with the increase of distance to the interior surface of the cob wall, the temperature decreased progressively.

**Key words:** solar greenhouse; cob wall; temperature; change rule