

DOI:CNKI:61-1390/S.20111216.1123.014

网络出版时间:2011-12-16 11:23

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20111216.1123.014.html>

# 跨度对日光温室气温和番茄生长的影响及模拟分析

刘玉凤<sup>a</sup>, 邹志荣<sup>b</sup>, 蒋国振<sup>a</sup>

(西北农林科技大学 a 机械与电子工程学院, b 园艺学院, 陕西 杨凌 712100)

**[摘要]** **【目的】**研究跨度对日光温室保温性能及番茄生长的影响。**【方法】**对陕西杨凌地区越冬种植番茄的 8、10 和 12 m 3 种跨度西北型日光温室的气温、光照、热流等参数进行监测,以日光温室夜间传热模型为基础,通过夜间气温的变化来分析跨度对日光温室保温性能的影响,同时监测了不同跨度日光温室中番茄幼苗的生长情况。**【结果】**10 m 跨度日光温室 1 月份平均气温分别较 8 和 12 m 跨度日光温室高 1.9 和 2.6 °C;种植番茄的平均株高分别高 0.4 和 2.2 cm,平均茎粗分别高 0.3 和 0.5 mm;夜间气温的模拟值与预测值吻合度均较高,其中 8 m 跨度日光温室夜间气温预测模型的平均相对误差为 4.40%,10 和 12 m 跨度日光温室分别为 2.43% 和 2.38%。**【结论】**供试 3 种跨度日光温室中,以 10 m 跨度日光温室的保温性能最好,较适宜在杨凌地区推广应用。

**[关键词]** 日光温室;跨度;传热模型;保温性能;番茄

**[中图分类号]** S625.1

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 1671-9387(2012)01-0204-06

## Effects of span on solar greenhouse's air temperature and tomato growth and analysis of simulation

LIU Yu-feng<sup>a</sup>, ZOU Zhi-rong<sup>b</sup>, JIANG Guo-zhen<sup>a</sup>

(a College of Mechanical and Electronic Engineering; b College of Horticulture,  
Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** **【Objective】** The study was aimed to explore the effects of span on greenhouse insulation performance and tomato growth. **【Method】** The research monitored the air temperature, light, heat transfer and other weather parameters in the northwest solar greenhouse in Yangling which spans 8 meters, 10 meters, 12 meters. Based on the nighttime thermal model of solar greenhouse, the effects of span on solar greenhouse were measured by nighttime air temperature and tomato crop growth. **【Result】** Average temperature during January of solar greenhouse in 10 meters span is higher than 8 meters and 12 meters at 1.9 and 2.6 °C; tomatoes' average height in 10 meters is higher than 8 meters and 12 meters at 4 and 22 mm; tomatoes' average stem diameter in 10 meters is thicker than 8 meters and 12 meters at 0.3 and 0.5 mm; nighttime temperature model fitted the measured data better, the relative error in 8 meters is 4.40%, which in 10 meters and 12 meters is 2.43% and 2.38%. **【Conclusion】** The solar greenhouse in 10 meters span has the best insulation performance among the researched greenhouses, which is the better span to spread in Yangling district.

**Key words:** solar greenhouse; span; thermal model; insulation; tomato

日光温室是我国北方地区推广最为广泛的农业设施之一,开展设施栽培为解决农村剩余劳动力及

\* [收稿日期] 2011-08-11

[基金项目] 国家科技支撑计划项目(2008BAD96B08-3)

[作者简介] 刘玉凤(1987—),女,山西临县人,在读硕士,主要从事农业生物环境研究。E-mail: liuyufeng5566@163.com

[通信作者] 邹志荣(1956—),男,陕西延安人,教授,博士生导师,主要从事设施农业研究。E-mail: zouzhihong2005@163.com

农民增产创收提供了一条可行之道<sup>[1]</sup>。但传统的日光温室在光温环境和建筑结构等方面存在一些不足<sup>[2]</sup>。学者对日光温室的采光、蓄热、结构、温室微环境等进行了大量研究<sup>[3-10]</sup>。建筑结构决定了日光温室的土地占用面积、光照入射率等因素,直接影响日光温室的气象环境。孙治强等<sup>[11]</sup>将日光温室的结构设计参数总结为五度(角度、高度、跨度、长度、厚度)、四比(高跨比、前后坡比、保温比、遮阴比),跨度就是其中的参数之一。确定日光温室跨度的传统方法是参考当地最低气温进行设计,依据是室内外温差与日光温室传热的关系。亢树华等<sup>[12]</sup>对辽沈地区 4 座不同高度、跨度处理日光温室的光温参数进行了比较,得出北纬 40°以北、年最低气温-20℃以下区域宜采用小跨度日光温室。陶正平等<sup>[13]</sup>对 3 座不同高度、跨度日光温室的光温环境和经济效益进行了比较,发现在北方高寒地区 8 m 跨度、3.7 m 脊高的日光温室性能较好。近年来,随着建筑材料的革新和建筑机械的应用,建造日光温室的效率大幅提高。出于土地利用率和温室可用面积的考虑,陕西杨凌、山东寿光、辽宁沈阳等地陆续建立起了大跨度日光温室,各地对其也进行了相关研究。佟国红等<sup>[14]</sup>对辽沈地区 12 m 跨度日光温室的光照辐射、温度、湿度等参数进行监测,比较了晴天和阴天

各因素的差异。宋明军等<sup>[15]</sup>详述了 10 m 跨度西北型日光温室的设计建造和温度变化规律,表明 10 m 跨度日光温室土地利用率较同地区 8 m 跨度日光温室高,且温室保温性能并未降低。

但前人的研究仅局限于不同跨度日光温室性能的比较,并没有深入研究跨度对温室环境的影响机理。为此,本研究以日光温室传热模型为基础,建立不同跨度日光温室夜间气温预测模型,通过实测参数予以验证,以夜间气温变化来分析跨度对日光温室保温性能的影响,以期为探明跨度对温室环境影响的机理奠定基础。

1 材料与方法

1.1 供试温室与立地条件

供试的 3 座温室(GH-08,8 m 跨度日光温室;GH-10,10 m 跨度日光温室;GH-12,12 m 跨度日光温室),位于陕西杨凌农业高新技术产业示范区(北纬 34°17',东经 108°4')西小寨村。供试日光温室均坐北朝南,东西延长,为西北型下沉式结构。采光面为 PE 塑料薄膜,夜间用 2.5 cm 厚草帘保温,后墙为机打梯形土墙。种植作物均为番茄,定植时间为 2010-11-15 前后,由技术员统一指导管理。供试温室的材料及结构参数如表 1 所示。

表 1 供试温室的材料及结构参数  
Table 1 Materials and structure parameter of tested greenhouses

| 温室<br>Greenhouse | 覆盖材料<br>Material          | 下挖深度/m<br>Excavated depth | 跨度/m<br>Span | 脊高/m<br>Ridge height | 后屋角/(°)<br>Back angle | 长度/m<br>Length | 后墙尺寸/m Back wall |                     |                        |
|------------------|---------------------------|---------------------------|--------------|----------------------|-----------------------|----------------|------------------|---------------------|------------------------|
|                  |                           |                           |              |                      |                       |                | 高度<br>height     | 顶厚<br>Top thickness | 底厚<br>Bottom thickness |
| GH-08            | PE 膜+草帘<br>PE film+Straws | 1.0                       | 8            | 3.0                  | 55                    | 100            | 2.0              | 1.0                 | 4.0                    |
| GH-10            | PE 膜+草帘<br>PE film+Straws | 1.2                       | 10           | 4.0                  | 55                    | 100            | 3.0              | 1.2                 | 5.0                    |
| GH-12            | PE 膜+草帘<br>PE film+Straws | 1.6                       | 12           | 4.6                  | 55                    | 100            | 4.0              | 1.5                 | 6.0                    |

1.2 气温及作物生长的监测

1.2.1 气温的监测与布点方法 气温监测使用哈尔滨物格电子仪器公司生产的测量精度为 0.3℃的多路温度测试仪(PDE-R4);热流密度测量使用日本京都电子公司生产的多点热流仪(HFM-215),测量范围为(0~±99 999) W/m<sup>2</sup>(单位面积热流量)。监测点的布置如图 1 所示。

1)温度布点。在温室 1/2 长度截面、冠层高度平面、边界处共布置 13 个测点。

2)热流布点。在温室各边界中心点处共布置 5 个测点。

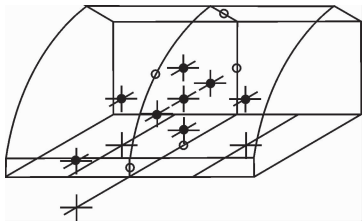


图 1 温室测点布置的示意图

空心点为边界布点;实心点为空间布点

Fig.1 Distribution of observation points

Hallow points are boundary distribution;

solid points are space distribution

1.2.2 作物生长的监测方法 在供试 3 座日光温室内各盆栽 40 株番茄,测量苗期番茄株高和茎粗 2

个形态指标,以评价不同跨度日光温室内作物的生长情况。株高使用 5 m 卷尺测量,测量精度为 0.5 cm。茎粗使用桂林广陆数字测控公司生产的电子数显游标卡尺测量,精度为 0.01 mm。

1.3 传热模型的建立与验证

温室夜间的热量传递,反映了日光温室的保温性能,在一定程度上可以体现出温室性能的优劣。所以本研究以夜间温室室内空气的能量得失来评价温室性能。基于温室结构实测参数,将相关量以跨度为自变量作如下假设:1)温室前墙、地面、后墙、后屋面、覆盖薄膜是温室的 5 个换热表面,其他部分换热量忽略不计。2)温室长度均为 100 m,高跨比为 1:2.5,后屋面仰角为 55°,后屋坡长度为跨度的 1/8,下挖深度为跨度的 1/8。

1.3.1 温室室内空气传热模型 以夜间日光温室内部空气为研究对象,其热量变化与各个接触面有关,根据前面的假设,共有前墙、地面、后墙、后屋面、覆盖薄膜 5 个换热表面,各边界与室内空气的换热量为:

$$Q_i = \alpha_i \times S_i \times \Delta T_i; \tag{1}$$

$$Q = \sum Q_i. \tag{2}$$

式中: $Q_i$  为室内空气与边界  $i$  的传热量(J); $\alpha_i$  为室内空气与边界  $i$  的换热系数(W/(m<sup>2</sup>·K)), $\alpha_i = q_i/\Delta T_i$ ,其中  $q_i$  为室内空气与边界  $i$  的热流量(W/m<sup>2</sup>), $\Delta T_i$  为室内空气与边界  $i$  的温度差(K); $S_i$  为室内空气与边界  $i$  的换热面积(m<sup>2</sup>); $Q$  为室内空气的换热总量(J)。

根据假设条件及实测值拟合得到相关参数的表达式为:

$$S_i = \varphi_i(L); \tag{3}$$

$$\alpha_i = \varphi_i(\tau); \tag{4}$$

$$\Delta T_i = f_i(\tau) - f_0(\tau). \tag{5}$$

综上,从 0 到  $\tau$  时刻室内空气换热总量为:

$$Q = \sum \int_0^\tau \varphi_i(L) \varphi_i(\tau) (f_i(\tau) - f_0(\tau)) d\tau. \tag{6}$$

式中: $\tau$  为以盖帘时刻为 0 点的时间值, $\varphi_i(L)$  为边界  $i$  与室内空气的换热面积随跨度  $L$  变化的函数, $\varphi_i(\tau)$  为边界  $i$  与室内空气的换热系数随时间  $\tau$  变化的函数, $f_i(\tau)$  为边界  $i$  的温度随时间  $\tau$  变化的函数, $f_0(\tau)$  为室内气温随时间  $\tau$  变化的函数。

1.3.2 温室气温预测模型 由式(2)可以得到从 0 到  $\tau$  时刻室内空气与边界的换热总量  $Q$ , $Q$  同时也是室内空气的总能量变化量,表现为室内空气热容量的变化: $Q = \sum Q_i = c \times \rho \times V \times \Delta T$ .

$$\text{气温变化量: } \Delta T = Q / (c \times \rho \times V). \tag{8}$$

设定盖帘时刻初始气温为  $T_0$ ,可以推得:

$$T_\tau = T_0 - \sum \int_0^\tau \frac{\varphi_i(L) \varphi_i(\tau) (f_i(\tau) - f_0(\tau)) d\tau}{c^* \rho^* \sigma(L)} d\tau. \tag{9}$$

式中: $c$  为室内空气的比热容(kJ/(kg·K)), $\rho$  为室内空气密度(kg/m<sup>3</sup>), $V$  为温室容积(m<sup>3</sup>), $\Delta T$  为室内气温变化量(K), $T_\tau$  为  $\tau$  时刻室内气温。

由式(9)得到  $T_\tau$  随时间变化的函数关系式,将温室室内气温实测值  $T_\tau$  与相应时刻函数值  $T_\tau$  进行比较,即可对温室传热模型进行验证。

2 结果与分析

2.1 不同跨度日光温室气温的比较

杨凌位于陕西关中地区,该地区 1 月份平均气温为全年最低,因此选择 1 月份数据分析不同跨度日光温室的气温差异较有代表性。图 2 为 2011-01 3 座不同跨度日光温室室内气温的统计图。

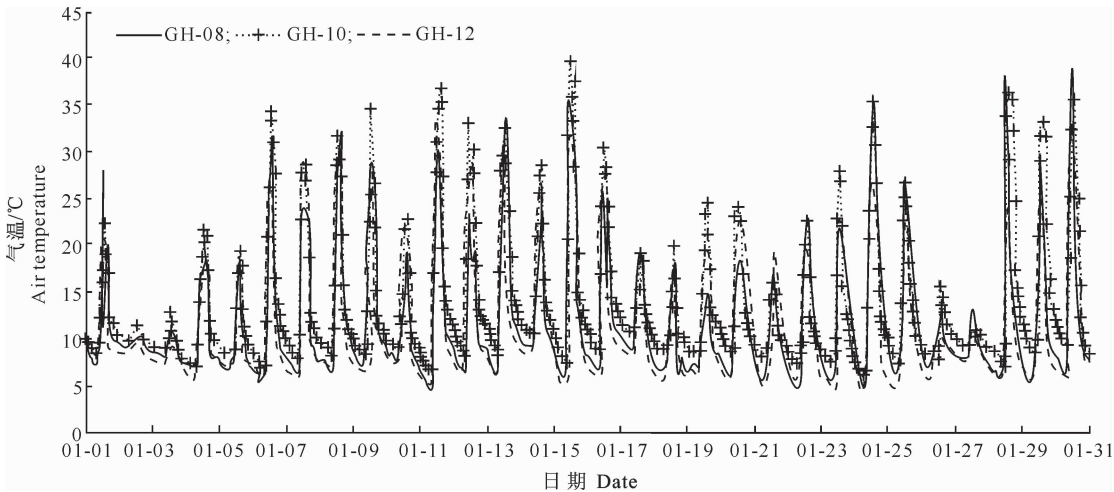


图 2 2011-01 3 种跨度日光温室室内气温变化的比较

Fig. 2 Comparison of indoor air temperatures of three spans' greenhouse during January in 2011

图 2 表明,温室气温随着外界天气条件变化有一定的波动。3 座日光温室的气温高低有如下顺序:GH-10>GH-08>GH-12。

表 2 为 2011-01 3 座温室气温的统计数据。日光温室中最低气温是对作物生长影响较大的因素,易造成番茄落花落果、生长萎缩等。表 2 显示, GH-10最低气温较 GH-08 和 GH-12 分别高 1.4 和 1.8 ℃,说明温室 GH-10 保温蓄热性能较好,能够在极端天气下保持较高的气温,较好地保证了作物的生长。

表 2 2011-01 3 种跨度日光温室室内气温的统计结果

Table 2 Statistics of air temperature of three spans' solar greenhouse during January, 2011 ℃

| 温室 Code | 最高气温 Max | 最低气温 Min | 平均气温 Mean | 平均温差 Difference |
|---------|----------|----------|-----------|-----------------|
| GH-08   | 38.2     | 4.5      | 11.1      | 1.9             |
| GH-10   | 39.8     | 5.9      | 13.0      | 0.0             |
| GH-12   | 34.4     | 4.1      | 10.4      | 2.6             |

3 座日光温室气温有一定差异,平均气温最高的是 GH-10,为 13.0 ℃,分别比 GH-08 和 GH-12 高 1.9 和 2.6 ℃。说明温室 GH-10 保温蓄热性能

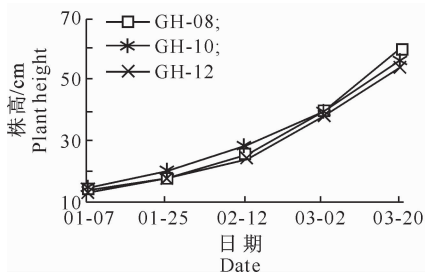


图 3 不同跨度日光温室中番茄株高和茎粗的比较

Fig.3 Contrast of plant height and stem diamete of tomatoes in different spans' greenhouse

2.3 不同跨度日光温室气温预测模型的验证

选取 2011-02-10 T 20:00 — 2011-02-11 T 06:00的数据,将相关参数和数值代入式(9),得到不同跨度日光温室在不同时刻的气温模拟值,将气温模拟值与实测值绘制曲线,结果如图 4 所示。气温模拟值与实测值的对比采用 IA(Index of Agreement)<sup>[16]</sup>法进行,其计算公式如下:

$$IA=1-\frac{\sum_{i=1}^N(X_{pi}-X_{mi})^2}{\sum_{i=1}^N(|X'_{pi}|+|X'_{mi}|)^2} \quad (10)$$

式中:  $X_{pi}$  为模拟值;  $X_{mi}$  为实测值;  $X'_{pi}=X_{pi}-X_{pave}$ , 其中  $X_{pave}$  为模拟值的平均值;  $X'_{mi}=X_{mi}-X_{mave}$ , 其中  $X_{mave}$  为实测值的平均值。

由 IA 的取值情况可以看出模拟值与实测值的吻合程度。IA 的取值范围是 0~1,其中当 IA=1 时,表示二者完全吻合;当 IA=0 时,表示二者完全

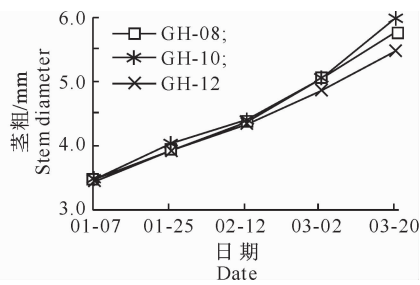
较为稳定,优于温室 GH-08 和 GH-12,更有利于作物生长(表 2)。

2.2 不同跨度日光温室番茄生长的比较

图 3 所示为番茄生长过程中株高和茎粗的生长动态曲线。由图 3 可以看出,定植初期 3 座温室的番茄株高基本相同;中期 GH-10 番茄株高较高;进入 3 月份天气转暖, GH-10 番茄株高生长放缓,而 GH-08 番茄株高快速生长,并最终超越 GH-10 番茄; GH-12 番茄的株高始终较低。在整个生长过程中, GH-10 的番茄平均株高比 GH-08 高 0.4 cm,比 GH-12 高 2.2 cm。

由图 3 还可以看出,定植初期 3 座温室番茄茎粗基本相同;中期 GH-10 番茄的茎粗值略大于另外 2 座温室;后期 GH-10 番茄茎粗值仍然最大, GH-08 番茄茎粗值大于 GH-12。后期 GH-10 番茄平均茎粗比 GH-08 高 0.3 mm,比 GH-12 高 0.5 mm。

综合比较认为, GH-10 番茄生长过程更为稳定,植株更为粗壮,是最适宜番茄生长的温室类型。



不吻合。

图 4 显示,3 座温室气温的模拟值与实测值吻合较好。相比较而言, GH-08 的偏差较大,最大温差为 0.90 ℃,最大相对误差为 9.09%,平均相对误差为 4.40%, IA=0.64,气温模拟值与实测值较为相符。分析造成误差的原因是模型中假设温室内气温值近似相等,可以用温室中心点的气温值来代替,而 GH-08 由于跨度较小,与室外空气的相对换热面积较大,容易受到外界环境气温变化的影响,而模型未能较好地解决外界环境变化对温室内换热参数的影响,从而造成 GH-08 相对误差较大。 GH-10 和 GH-12 的跨度较大,室内空气与外界环境之间具有较大的缓冲层,温室内空气的换热过程较为平缓,所以气温模拟值与实测值的吻合程度较好,最大温差分别为 0.64 和 0.55 ℃,最大相对误差分别为 5.7%

和 5.6%，平均相对误差分别为 2.43% 和 2.38%，气温的变化过程。  
IA 值分别为 0.84 和 0.85,较好地反映了温室夜间

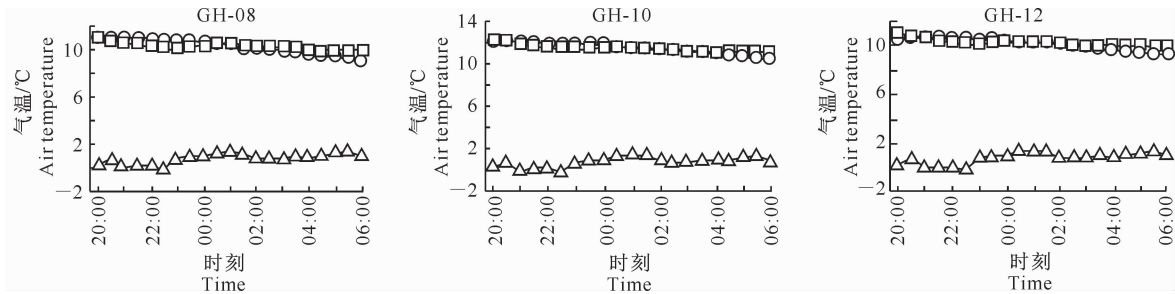


图 4 不同跨度日光温室气温模拟值与实测值的比较  
—○—, 气温模拟值; —□—, 气温实测值; —△—, 室外气温

Fig. 4 Comparison of the simulated and measured temperature in different spans' greenhouse

—○—, Simulation value of ari temperature; —□—, Measured value of ari temperature; —△—, Outside of ari temperature

由气温预报模型可以看出,GH-10 的初始气温始终高于另外 2 座温室,说明 GH-10 白天的蓄热性能是 3 座供试日光温室中最好的。通过模型计算及实际监测可知,GH-10 的夜间气温平均值为 11.4℃,比 GH-08 高 1.2℃,比 GH-12 高 1.1℃,说明 GH-10 的夜间保温性能优于 GH-08 和 GH-12。

3 结论与讨论

本研究对 3 种不同跨度日光温室的室内外气温和作物生长情况进行了监测分析,并基于传热模型对不同跨度日光温室的夜间气温进行了模拟,得出如下结论:外界光温环境是影响日光温室内微环境的主要因素,在恶劣天气条件下,日光温室内的环境也急剧恶化。随着跨度的增加,日光温室室内平均气温呈先升高后降低的趋势,跨度为 10 m 时温室的平均气温最高,作物生长情况最好。说明在 8~12 m 跨度之间存在最佳跨度,可使日光温室的保温蓄热性能达到最优。经实测气温验证,本研究所建立的日光温室夜间传热模型平均相对误差小于 5%,气温预测值与实测值吻合程度较高,表明传热模型能够反映不同跨度日光温室夜间气温的变化过程。

跨度对日光温室的影响是一个复杂的问题,本研究仅进行了初步探索。本研究确定了最佳跨度的范围,但未能得到最佳跨度值;所建立的夜间气温预测模型仍需更多实践检验,还不能适用于白天揭帘状态温室热环境的模拟。因此,跨度对日光温室性能的影响还需要更深入的研究,以完善相关理论,更好地指导生产实践。

[参考文献]

[1] 周长吉,杨振声. 准确统一“日光温室”定义的商榷 [J]. 农业工

程学报,2002,18(6):200-202.  
Zhou C J, Yang Z S. Discussion on a precise definition of “solar greenhouse” [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2002, 18(6): 200-202. (in Chinese)  
[2] 李天来. 我国日光温室产业发展现状与前景 [J]. 沈阳农业大学学报, 2005, 36(2): 131-138.  
Li T L. Current situation and prospects of greenhouse' industry development in China [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2005, 36(2): 131-138. (in Chinese)  
[3] 郇庆炉,梁云娟,段爱旺. 日光温室光照特点及其变化规律研究 [J]. 农业工程学报, 2003, 19(3): 200-204.  
Gao Q L, Liang Y J, Duan A W. Light characteristics and its changing laws in solar greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2003, 19(3): 200-204. (in Chinese)  
[4] 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, 19(3): 186-189.  
Tong G H, Wang T L, Bai Y K, et al. Heat transfer property of wall in solar greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2003, 19(3): 186-189. (in Chinese)  
[5] 李小芳,陈青云. 日光温室山墙对室内太阳直接辐射得热量的影响 [J]. 农业工程学报, 2004, 20(5): 241-245.  
Li X F, Chen Q Y. Effects of different wall materials on the performance of heat preservation of wall of solar greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2004, 20(5): 241-245. (in Chinese)  
[6] 吴春艳,赵新平,郭文利. 日光温室作物热环境模拟及分析 [J]. 农业工程学报, 2007, 23(4): 190-195.  
Wu C Y, Zhao X P, Guo W L. Simulation and analysis of the temperature inside the solar greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(4): 190-195. (in Chinese)  
[7] 佟国红,李保明. 日光温室各表面太阳辐射照度的模拟计算 [J]. 中国农业大学学报, 2006, 11(1): 61-65.  
Tong G H, Li B M. Simulation of solar radiation on surfaces of a solar greenhouse [J]. Journal of China Agricultural Universi-

ty,2006,11(1):61-65. (in Chinese)

[8] Bot G,Van B N,Challa H,et al. The solar greenhouse;state of the art in energy saving and sustainable energy supply [J]. Acta Horticulture,2005,691(2):501-503.

[9] Sonneveld P J,Swinkels G,Campen J,et al. Performance results of a solar greenhouse combining electrical and thermal energy production [J]. Biosystems Engineering,2010,106(1):48-57.

[10] Nayak S,Tiwari G N. Energy and exergy analysis of photovoltaic/thermal integrated with a solar greenhouse [J]. Energy and Buildings,2008,40(11):2015-2021.

[11] 孙治强,王吉庆. 黄淮改良型日光温室的设计与性能研究 [J]. 农业工程学报,1997,12(增刊):41-47.

Sun Z Q,Wang J Q. The design and performance of Huang-huai improved greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,1997,12(Supple):41-47. (in Chinese)

[12] 亢树华,戴雅东,房思强,等. 节能型日光温室采光面造型及高度和跨度的研究 [J]. 中国蔬菜,1993(1):6-9.

Kang S H,Dai Y D,Fang S Q,et al. Study of lighting surface, height and span in energy-saving solar greenhouse [J]. Journal of Chinese Vegetables,1993(1):6-9. (in Chinese)

[13] 陶正平,李梦玲,边鸣镝,等. 高寒地区的日光温室优化设计 [J]. 中国蔬菜,2002(2):19-21.

Tao Z P,Li M L,Bian M D,et al. The optimization for the solar greenhouses in cold areas [J]. Journal of Chinese Vegetables,2002(2):19-21. (in Chinese)

[14] 佟国红,李天来,王铁良. 大跨度日光温室室内微气候环境测试分析 [J]. 华中农业大学学报,2004,22(1):67-73.

Tong G H,Li T L,Wang T L. Experimental research on microclimate environment in a large-scale solar greenhouse [J]. Journal of Huazhong Agricultural University,2004,22(1):67-73. (in Chinese)

[15] 宋明军,赵 鹏. 西北 XB-GV 型大跨度日光温室设计建造及实践 [J]. 农业工程技术:温室园艺,2006(7):16-18.

Song M J,Zhao P. Practice on designing and constructing of big span solar greenhouse of XB-GV type in northwest China [J]. Agricultural Engineering Technology:Greenhouse Gardening,2006(7):16-18.

[16] 孟力力,杨其长,Gerard P A Bot,等. 日光温室热环境模拟模型的构建 [J]. 农业工程学报,2009,25(1):164-170.

Meng L L,Yang Q C,Gerard P A Bot,et al. Visual simulation model for thermal environment in Chinese solar greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2009,25(1):164-170. (in Chinese)

(上接第 203 页)

[20] 曾广娟,李春敏,张新忠,等. 适于双向电泳分析的苹果叶片蛋白质提取方法 [J]. 色谱,2009,27(4):484-488.

Zeng G J,Li C M,Zhang X Z,et al. Efficient protein extraction method from apple leaves for apple proteomic analysis using two-dimensional electrophoresis analysis [J]. 2009,27(4):484-488. (in Chinese)

[21] 郭尧君. 蛋白质电泳实验技术 [M]. 北京:科学出版社,1999.

Guo Y J. Electrophoresis experiment technology for protein [M]. Beijing:Science Press,1999. (in Chinese)

[22] Oguri T,Takahata I,Katsuta K,et al. Proteome analysis of rat hippocampal neurons by multiple large gel two-dimensional electrophoresis [J]. Proteomics,2002,2(6):666-672.

[23] 王一鸣,花宝光,王有年,等. 桃果实蛋白质双向电泳影响因素的研究 [J]. 园艺学报,2007,34(6):1579-1584.

Wang Y M,Hua B G,Wang Y N,et al. Studies on influence factors of prote in two-dimensional electrophoresis in *Prunus persica* fruit [J]. Acta Horticulturae Sinica,2007,34(6):1579-1584. (in Chinese)

[24] 黎 飞,徐秋芳,臧宪朋,等. 番茄子叶总蛋白双向电泳体系的建立 [J]. 园艺学报,2010,37(4):661-668.

Li F,Xu Q F,Zang X P,et al. Establishment of two-dimensional electrophoresis system of tomato cotyledons [J]. Acta Horticulturae Sinica,2010,37(4):661-668. (in Chinese)

[25] Hawkesford M J,Belcher A R. Differential protein synthesis in response to sulphate and phosphate deprivation:Identification of possible components of plasma-membrane transport systems in cultured tomato roots [J]. Planta,1991,185:323-329.

[26] Veronique S,Marianne D,Michel C,et al. A comparison of two-dimensional electrophoresis data with phenotypical traits in *Arabidopsis* leads to the identification of a mutant (*cri1*) that accumulates cytokinins [J]. Planta,1997,202:62-69.