

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.08.039

空气流速对温室地下蓄热系统湿热传递影响试验*

梁喜凤^{1,2} 王永维¹ 程绍明¹ 王俊¹ 苗香雯¹

(1. 浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 杭州 310029; 2. 中国计量学院机电工程学院, 杭州 310018)

【摘要】 为确定双层覆盖温室地下蓄热系统换热管道空气流速对蓄热量和水蒸气迁移的影响,建立合理的运行模式,测试了该系统以0.6~2.8 m/s的空气流速蓄热时换热管道进、出口空气温度和相对湿度、地坪温度、室外温度,计算了换热管道进出口处空气含湿量与焓及蓄热功率。结果表明,在冬季白昼晴朗时,系统分别以0.6、1.0、1.5、2.0、2.5、2.8 m/s的空气流速进行蓄热,温室内热空气流经换热管道焓值明显降低,以不同流速蓄热时进、出口空气焓差的变化幅度、变化趋势相近,换热均充分;蓄热功率随流速增加而增加,当空气流速小于2 m/s时,蓄热功率不足,系统蓄热时较佳的空气流速为2.5~2.8 m/s,蓄热时间应以10:30~14:30为宜。

关键词: 双层覆盖温室 地下蓄热系统 流速 热量 水蒸气

中图分类号: S625.5⁺1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2010)08-0189-05

Influence of Air Velocity in Heat Exchanging Pipes to Heat Change and Water Vapor Transformation for Underground Heat Storage System in Greenhouse

Liang Xifeng^{1,2} Wang Yongwei¹ Cheng Shaoming¹ Wang Jun¹ Miao Xiangwen¹

(1. School of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract

The effects of the air velocity in heat exchanging pipes to heat and water vapor transformation was conducted in double-film covering greenhouse and the rational running mode was presented. The temperature and humidity in inlet and outlet of heat exchanging pipes, floor temperature in heat storage greenhouse and outside temperature were measured at different air velocities in the heat exchanging pipes. The humidity ratio, enthalpy of inlet and outlet of heat exchanging pipes and the power for heat saving were calculated. The results showed that the enthalpy of hot air decrease apparently after flowing through heat exchanging pipes when the air velocity in heat exchanging pipes was respectively 0.6 m/s, 1.0 m/s, 1.5 m/s, 2.0 m/s, 2.5 m/s and 2.8 m/s during heat saving in clear day. In addition, the air enthalpy difference between inlet and outlet of heat exchanging pipes and its variation tendency were similar at different air velocities. The power for heat saving enhances with the increase of the air velocity in heat exchanging pipes. The power and the increase of floor temperature held lower when the air velocity in heat exchanging pipes was less than 2 m/s during heat storage. The appropriate air velocity in heat exchanging pipes was 2.5 m/s to 2.8 m/s, and the rational time for heat saving was 10:30 to 14:30.

Key words Double-film covering greenhouse, Underground heat storage system, Velocity, Heat, Water vapor

收稿日期: 2009-08-06 修回日期: 2009-11-30

* 浙江省重大科技专项(优先主题)农业项目(2008C12060-1)、浙江省教育厅科研项目(20070006)和浙江大学种子基金资助项目

作者简介: 梁喜凤, 博士生, 中国计量学院副教授, 主要从事农业生物环境控制、农业机器人技术研究, E-mail: lxfclu@163.com

通讯作者: 王永维, 副教授, 博士, 主要从事温室环境调控、太阳能地下贮存技术研究, E-mail: wywzju@zju.edu.cn

引言

温度是温室环境调控、智能决策、建立作物生长模型等主要控制参数^[1-2]。长江中下游地区冬季低温、高湿,环境控制能耗高已成为影响该地区设施农业发展的主要因素^[3]。长江中下游地区太阳能资源较丰富,属太阳能可利用区,利用温室地下蓄热系统实现太阳能地下贮存并为温室夜间供暖是经济有效的温室加温方法。前期已对温室地下蓄热系统的蓄热性能、温度分布、换热管道内流速对蓄热效果及温室内温度与湿度的影响等进行了试验研究^[4-8],本文仅就温室地下蓄热系统蓄热时换热管道内空气流速对热量传递、水蒸气迁移的影响进行试验研究,以确定蓄热时合理的运行模式。

1 双层覆盖温室地下蓄热系统

双层覆盖温室地下蓄热系统组成与结构如图1所示。温室为华东型连栋塑料温室;中棚用以增加温室保温性能;地坪(苗床)是系统热能的贮存体,由蓄热层、隔热层、基础层、换热管道组成。进气道、排气道设于地坪两端,轴流式风机设于进气道一端^[4-8]。

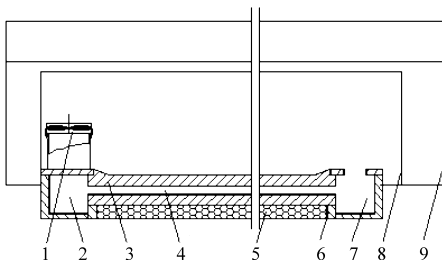


图1 双层覆盖温室地下蓄热系统

Fig. 1 Underground heat storage system in double-film covering greenhouse

1. 轴流式风机 2. 进气道 3. 蓄热层 4. 换热管道 5. 隔热层
6. 基础层 7. 排气道 8. 中棚 9. 温室

2 试验

2.1 试验方法

因仅在3连栋温室的1栋温室中建造了地下蓄热系统,只能利用同一系统在不同时间以不同换热管道内空气流速进行蓄热试验。轴流式风机采用变频电源,调节变频电源频率并利用EY3-2A型电子微风仪(量程:0.05~30.0 m/s;精度:±2%)测定各换热管道出口处空气流速。取平均流速 v 分别为0.6、1.0、1.5、2.0、2.5、2.8 m/s时对应的变频电源频率为该流速所要求的变频电源频率。试验时,同一流速连续运行1周。晴天或多云时,9:00打开中棚覆盖膜,10:30~15:00进行蓄热,当温室内气温

高于28℃时,适当打开温室顶窗通风降温,15:00关闭中棚覆盖膜;阴天时不蓄热。17:00~22:00启动轴流式风机进行加温,22:00~8:00采用空气电加热线加温,功率3 kW。蓄热与加温时,在换热管道进出口处设置ZDR-20型温度和相对湿度数据记录仪(温度量程:-40~100℃,精度:±0.5℃;相对湿度量程:0.1%~100%,精度:±3%),以测试进口处空气温度 t_i 和相对湿度 φ_i 、出口处空气温度 t_o 和相对湿度 φ_o ,同时利用ZDR-20型温度和相对湿度数据记录仪测试室外温度 t_o 。因地坪为对称结构,故仅在地坪纵向中心线一侧均匀布置15只TDW2001型电子式温度指示调节仪(量程:0~60℃,精度:±0.5℃),测点位于两换热管道之间,深10 cm,以测试地坪温度 t_s ^[8]。

2.2 计算公式

换热管道进出口处湿空气焓(干空气)为^[9]

$$h = h_s + h_l = (1.01 + 1.84d)T + 2500d \quad (1)$$

式中 h_s ——湿空气显热, kJ/kg

h_l ——湿空气潜热, kJ/kg

T ——空气温度, °C

d ——湿空气含湿量, g/kg

换热管道进、出口处湿空气含湿量(干空气)为^[9]

$$d = \varphi d_b \quad (2)$$

式中 φ ——相对湿度, %

d_b ——饱和含湿量, g/kg

单位时间内温室内空气流经换热管道的热量交换即为蓄热功率

$$P = vA\rho(h_i - h_o) \quad (3)$$

其中 $A = 45\pi D^2/4$

式中 v ——换热管道内空气流速, m/s

A ——换热管道总横截面积, m²

D ——换热管道直径, m

ρ ——干空气密度, kg/m³

h_i ——换热管道进口处空气焓值, kJ/kg

h_o ——换热管道出口处空气焓值, kJ/kg

3 结果分析

3.1 结果

试验于2006年12月23日至2007年2月8日在浙江大学进行。试验时,地坪上培养番茄幼苗,栽植密度为32盆/m²。因以不同空气流速的蓄热试验是在不同时间进行的,蓄热时空气流速逐渐降低,所以前期以较高流速进行蓄热对后期较低流速蓄热创造较高的地温条件,会增强后期的蓄热效果。为了克服前一试验形成的土壤温度条件对后续试验结

果的影响,均以每一流速蓄热试验中后期的结果进行分析。另外,随着试验的进行,由于室外水平面接受的太阳总辐照度逐渐增加,使后期试验时温室内吸收的太阳辐射热量也增加,为了保证室内气温不超过番茄幼苗适宜生长温度的上限,适时开启温室顶窗进行通风控温。同时试验分析均以晴朗天气的试验结果进行分析,以减少天气条件对试验结果的影响。该系统太阳能利用形式为日贮存与利用,以同一空气流速蓄热时的试验结果类似,现仅以典型晴天时的试验与计算结果为例进行分析,结果如图 2~7 所示(图中焓、含湿量均为干空气)。图中 h_{si} 、 h_{li} 分别为换热管道进口处湿空气显热、潜热; h_{so} 、 h_{lo} 分别为换热管道出口处湿空气显热、潜热; d_i 、 d_o 分别为换热管道进出口处湿空气含湿量。

3.2 分析

由图 2a~7a 和图 2b~7b 知,系统分别以 0.6、1.0、1.5、2.0、2.5、2.8 m/s 的空气流速进行蓄热时,随着温室内气温升高,换热管道进口处空气焓值增加,空气流经换热管道,温度、焓值显著降低,气温已接近地坪温度,且随着流速的增加,降温愈明显。不同流速时空气焓值最大降幅均达 15 kJ/kg 以上,空气以 0.6~2.8 m/s 的流速流经换热管道,热量交换

均充分。在蓄热开始 2~3 h 内,温室内湿热空气流经换热管道,空气含湿量降低,这是由于地坪温度较低,空气流经换热管道产生冷凝现象,使得换热管道进口处空气含湿量小于出口处,使潜热交换量减小;但由于换热管道进出口处空气温差大,显热交换量较高,此时热量交换以显热交换为主。

随着蓄热的进行,地坪温度升高,在蓄热终了的 1~2 h 内,换热管道进口处气温与地坪温度差、换热管道进出口处气温差逐渐减小,显热交换量下降;同时换热管道出口处空气含湿量大于进口处空气含湿量,出口处空气潜热明显大于进口处潜热,使得潜热交换出现负值,且换热管道空气流速愈大进出口潜热差负值出现愈早,此时热量交换是潜热交换、显热交换并存。蓄热后期出现换热管道出口处空气含湿量大于进口处空气含湿量现象,是由于前期凝结在换热管道内的水蒸气吸收流经其空气的热量而蒸发并随空气流出,增加了出口处空气的含湿量,致使潜热交换出现负值。

为了对以不同空气流速进行蓄热时系统的蓄热性能进行评价,定义系统的蓄热功率与轴流式风机额定功率之比为系统蓄热性能的评价指标。由图 2c~7c 知,以不同空气流速蓄热时,进出口焓差变

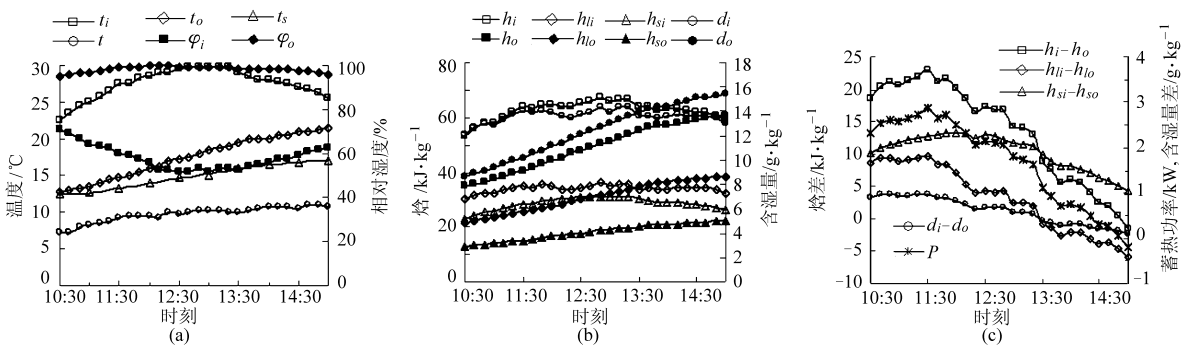


图 2 $v=0.6$ m/s 蓄热时进出口空气物量参数变化曲线(2007-02-05)

Fig.2 Physical parameters of air in inlet and outlet of heat exchanging pipes during heat saving at $v=0.6$ m/s(2007-02-05)

(a) 温度与相对湿度 (b) 焓与含湿量 (c) 焓差、含湿量差、蓄热功率

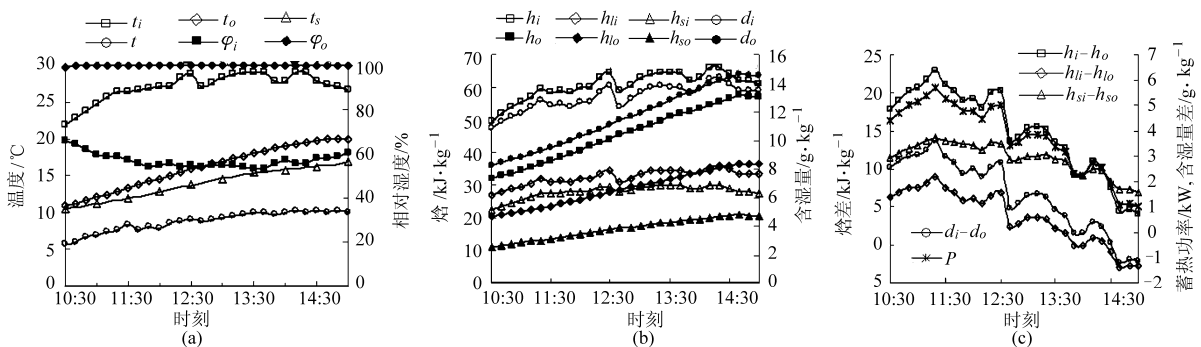


图 3 $v=1.0$ m/s 蓄热时进出口空气物量参数变化曲线(2007-02-01)

Fig.3 Physical parameters of air in inlet and outlet of heat exchanging pipes during heat saving at $v=1.0$ m/s(2007-02-01)

(a) 温度与相对湿度 (b) 焓与含湿量 (c) 焓差、含湿量差与蓄热功率

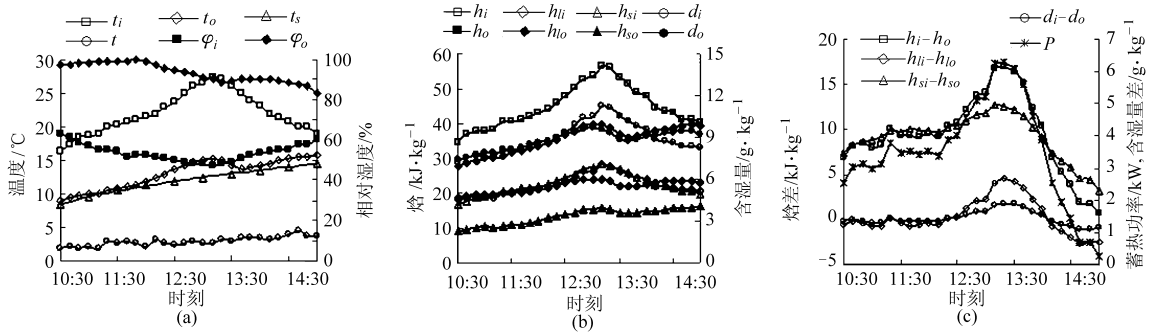


图4 $v = 1.5 \text{ m/s}$ 蓄热时进出口空气物量参数变化曲线(2007-01-24)

Fig.4 Physical parameters of air in inlet and outlet of heat exchanging pipes during heat saving at $v = 1.5 \text{ m/s}$ (2007-01-24)

(a) 温度与相对湿度 (b) 焓与含湿量 (c) 焓差、含湿量差、蓄热功率

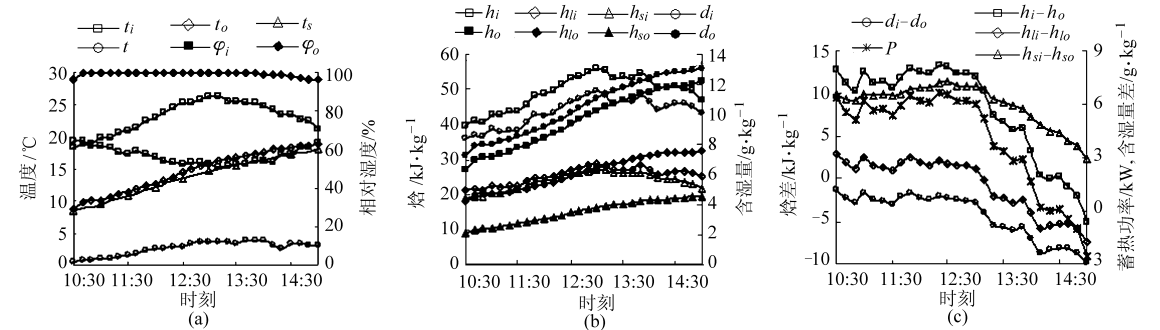


图5 $v = 2.0 \text{ m/s}$ 蓄热时进出口空气物量参数变化曲线(2007-01-21)

Fig.5 Physical parameters of air in inlet and outlet of heat exchanging pipes during heat saving at $v = 2.0 \text{ m/s}$ (2007-01-21)

(a) 温度与相对湿度 (b) 焓与含湿量 (c) 焓差、含湿量差、蓄热功率

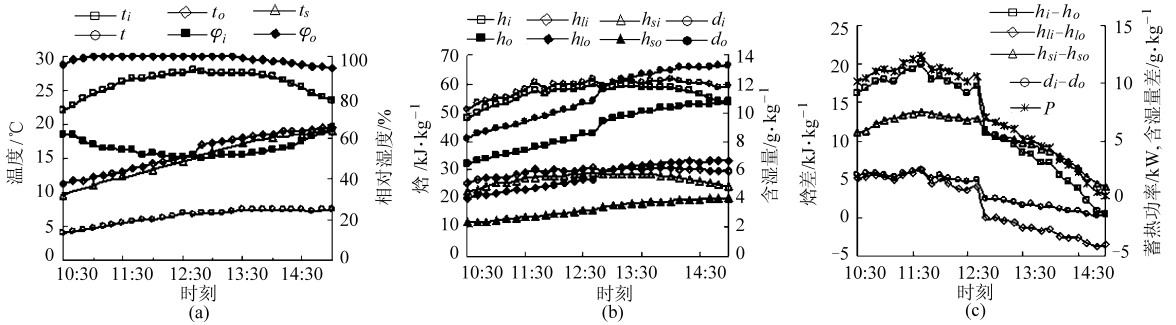


图6 $v = 2.5 \text{ m/s}$ 蓄热时进出口空气物量参数变化曲线(2006-12-26)

Fig.6 Physical parameters of air in inlet and outlet of heat exchanging pipes during heat saving at $v = 2.5 \text{ m/s}$ (2006-12-26)

(a) 温度与相对湿度 (b) 焓与含湿量 (c) 焓差、含湿量差、蓄热功率

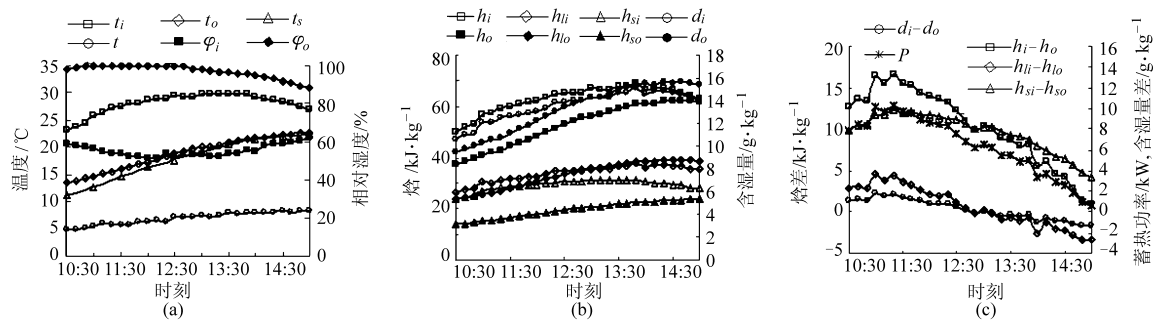


图7 $v = 2.8 \text{ m/s}$ 蓄热时进出口空气物量参数变化曲线(2006-12-31)

Fig.7 Physical parameters of air in inlet and outlet of heat exchanging pipes during heat saving at $v = 2.8 \text{ m/s}$ (2006-12-31)

(a) 温度与相对湿度 (b) 焓与含湿量 (c) 焓差、含湿量差、蓄热功率

化量、变化趋势均相近,蓄热功率主要随换热管道流速增加而增加。当系统分别以 0.6、1.0、1.5、2.0、2.5、2.8 m/s 的换热管道空气流速进行蓄热时,在蓄热开始的 3.5 ~ 4.0 h 内,蓄热功率分别为 0.3 ~ 2.8 kW、1.9 ~ 5.7 kW、1.4 ~ 6.3 kW、0.1 ~ 6.6 kW、2.4 ~ 12.3 kW、2.6 ~ 10.3 kW,系统的显热交换、潜热交换均为正值,蓄热功率远大于轴流式风机的额定功率 0.25 kW,系统具有良好的蓄热性能;在蓄热终了的 0.5 h 内,蓄热功率分别为 -0.2 ~ 0.3 kW、1.0 ~ 1.9 kW、0.2 ~ 1.4 kW、-2.5 ~ 0.1 kW、0.3 ~ 2.4 kW、0.6 ~ 2.6 kW,由于太阳辐照度下降,温室气温度降低,换热管道内潜热交换做负功,致使蓄热功率下降甚至小于轴流式风机额定功率,系统不能实现有效蓄热,此时运行的经济性差。因此,较佳的蓄热时间为 10:30 ~ 14:30。

结合图 2a ~ 7a 和图 2b ~ 7b 分析知,当换热管道空气流速小于 2.0 m/s 时,虽然进、出口处空气温度、焓值变化明显,但由于换热管道内空气流量小,蓄热终了时地温低于温室常见栽培作物(如番茄、黄瓜)幼苗生长所需适宜土壤温度(18 ~ 20℃)^[10],且流速愈小蓄热终了时地温愈低,不能为夜间加温提供足够的热量。当换热管道空气流速为 2.5 m/s、2.8 m/s 时,系统的蓄热功率明显增加,蓄热终了时地温已接近幼苗生长所需适宜

土壤温度的上限,不仅有利于幼苗的生长发育,也为夜间保温提供大量热量。因此,系统蓄热时换热管道适宜的空气流速为 2.5 m/s、2.8 m/s。

4 结论

(1) 白天晴朗时,温室地下蓄热系统以 0.6、1.0、1.5、2.0、2.5、2.8 m/s 的换热管道空气流速进行蓄热时,温室内热空气流经换热管道焓值明显降低,进出口焓差变化量、变化趋势均相近,以 0.6 ~ 2.8 m/s 的空气流速进行蓄热时热量交换均充分。

(2) 温室地下蓄热系统的蓄热功率随换热管道空气流速增加而增加,地温(苗床)蓄热终了温度随换热管道流速增加而增加。换热管道空气流速小于 2 m/s 时蓄热功率不足,蓄热终了时地温低,不能为夜间保温提供足够的热量。白昼晴朗时,系统蓄热的较佳换热管道空气流速为 2.5 ~ 2.8 m/s,适宜的蓄热时间为 10:30 ~ 14:30。

(3) 白昼晴天,温室地下蓄热系统以 2.5、2.8 m/s 的换热管道空气流速进行蓄热时,蓄热初始 3.5 ~ 4.0 h 内,显热交换、潜热交换均为正值,具有良好的蓄热性能;蓄热终了 0.5 h 内,显热交换为正值,潜热交换做负功,不能实现有效蓄热,较佳的蓄热时间为 10:30 ~ 14:30。

参 考 文 献

- 何芬,马承伟. 华北地区冬季温室植物冠层温度建模[J]. 农业机械学报, 2009,40(5):169 ~ 172.
He Fen, Ma Chengwei. Modeling greenhouse plant canopy temperature in north China during winter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(5):169 ~ 172. (in Chinese)
- 丁为民,汪小昱,李毅念,等. 温室环境控制与温室模拟模型研究现状分析[J]. 农业机械学报, 2009,40(5):162 ~ 168.
Ding Weimin, Wang Xiaoyu, Li Yinian, et al. Review on environmental control and simulation models for greenhouses[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(5):162 ~ 168. (in Chinese)
- 毛罕平,王晓宁,王多辉. 温室太阳能加热系统的设计与试验研究[J]. 太阳能学报, 2004,25(3):305 ~ 309.
Mao Hanping, Wang Xiaoning, Wang Duohui. The design and test of greenhouse solar energy heating system[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2004,25(3):305 ~ 309. (in Chinese)
- 王永维,苗香雯,崔绍荣,等. 温室地下蓄热系统蓄热加温性能研究[J]. 农业机械学报, 2005,36(1):75 ~ 78.
Wang Yongwei, Miao Xiangwen, Cui Shaorong, et al. Study on the heat saving and heating performances of an underground heat storage system in greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005,36(1):75 ~ 78. (in Chinese)
- 王永维,梁喜凤,苗香雯. 双层覆盖温室地下蓄热系统保温效果试验[J]. 农业机械学报, 2006,37(1):97 ~ 100.
Wang Yongwei, Liang Xifeng, Miao Xiangwen. Heat conservation effects of the underground heat storage system in double-film covering greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006,37(1):97 ~ 100. (in Chinese)
- Wang Yongwei, Liang Xifeng. Performance of underground heat storage system in a double-film-covered greenhouse[J]. Journal of Zhejiang University Science B, 2006,7(4):279 ~ 282.

- 5 Tadhg Brosnan, Da-Wen Sun. Inspection and grading of agricultural and food products by computer vision systems—a review [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2002, 36(2~3): 193~213.
- 6 Kazuhiko S H, Kenichiro H, Akifumi O, et al. Grading meat quality by image processing [J]. Pattern Recognition, 2000, 33(1): 97~104.
- 7 刘木华, 赵文杰, 张海东. 基于模糊 C 均值聚类的牛肉图像中脂肪和肌肉区域分割技术 [J]. 农业工程学报, 2004, 20(2): 161~163.
Liu Muhua, Zhao Wenjie, Zhang Haidong. Segmentation of fat and lean meat in beef images based on fuzzy C-means clustering [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2004, 20(2): 161~163. (in Chinese)
- 8 刘木华, 赵文杰, 张海东. 基于数学形态学的牛肉图像中背长肌分割和大理石花纹提取技术研究 [J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 144~146.
Zhao Wenjie, Liu Muhua, Zhang Haidong. Segmentation of longissimus dorsi and marbling in ribeye imaging based on mathematical morphology [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2004, 20(1): 144~146. (in Chinese)
- 9 Chiu Stephen L. A cluster estimation method with extension to fuzzy model identification [C] // Proceedings of the Third IEEE Conference on Control Application, 1994, 2: 1 240~1 245.
- 10 刘宜平, 沈毅, 刘志严. 一种 FCM 聚类算法的改进与优化 [J]. 系统工程与电子技术, 2000, 22(4): 1~3.
Liu Yiping, Shen Yi, Liu Zhiyan. Improvement and optimization of a fuzzy C-means clustering algorithm [J]. Systems Engineering and Electronics, 2000, 22(4): 1~3. (in Chinese)
- 11 李明, 李云松. 改进的快速模糊 C 均值聚类的图像分割方法 [J]. 兰州理工大学学报, 2007, 33(3): 93~99.
Li Ming, Li Yunsong. A modified method for image segmentation with fast fuzzy C-means clustering [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2007, 33(3): 93~99. (in Chinese)
- 12 陈坤杰, 孙鑫, 陆秋琰. 基于计算机视觉和神经网络的牛肉颜色自动分级 [J]. 农业机械学报, 2009, 40(4): 173~178.
Chen Kunjie, Sun Xin, Lu Qiuyan. Automatic color grading of beef lean tissue based on BP neural network and computer vision [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(4): 173~178. (in Chinese)
- 13 伍学千, 廖宜涛, 樊玉霞, 等. 基于 KFCM 和改进分水岭算法的猪肉背最长肌分割技术 [J]. 农业机械学报, 2010, 41(1): 172~176.
Wu Xueqian, Liao Yitao, Fan Yuxia, et al. Segmentation of pork longissimus dorsi based on KFCM clustering and improved watershed algorithm [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(1): 172~176. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 193 页)

- 7 王永维, 程绍明, 姜雄晖. 温室地下蓄热系统温度的分布试验 [J]. 农业机械学报, 2006, 37(9): 112~115.  
Wang Yongwei, Cheng Shaoming, Jiang Xionghui. Temperature distribution of the underground heat storage system in greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(9): 112~115. (in Chinese)
- 8 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.  
Wang Yongwei, Liang Xifeng, Wang Jun, et al. Effects of air velocity in heat exchanging pipes on heat saving of the underground heat storage system in greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(5): 173~177. (in Chinese)
- 9 马承伟, 苗香雯. 农业生物环境工程 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- 10 周长吉, 杨振声, 冯广和. 现代温室工程 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.