DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.11.034

空气流速对温室地下蓄热系统加温时热湿传递的影响

王永维1 梁喜凤2 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】 为确定温室地下蓄热系统换热管道空气流速对其加温运行时热量交换和水蒸气迁移的影响,测试了 该系统以不同换热管道空气流速蓄热后,夜间加温时换热管道进出口空气温度与湿度、地坪温度、室外温度,计算 了换热管道进出口处空气的含湿量、焓、蓄热功率。结果表明,在冬季晴朗的天气下,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白昼蓄热后,夜间以与蓄热时相同的空气流速加温时,温室内低温高湿空气流经 换热管道后,温度、焓显著增加,相对湿度明显降低,加温功率随换热管道流速增加而增加,平均加温功率分别达 1.0、1.6、3.2、6.4、7.2、7.7 kW;当换热管道空气流速小于 2 m/s 时,加温效果不显著;当换热管道空气流速大于 2.5 m/s时持续加温能力差;在满足作物夜间生长所需温度条件时,应以2.0 m/s 的换热管道空气流速加温。

关键词:温室 地下蓄热系统 空气流速 中图分类号: S625.5⁺1 文献标识码:A 文章编号:1000-1298(2012)11-0180-06

Effects of Air Velocity in Heat Exchanging Pipes to Heat Exchanging and Water Vapor Transformation of Underground Heat Storage System in Greenhouse during Heating

Wang Yongwei¹ Liang Xifeng² 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

Effects of the air velocity in heat exchanging pipes on heat exchanging and water vapor transformation was studied in double-film covering greenhouse during heating at night in winter. 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 heating were computed. The results showed that the temperature and enthalpy of cold air with high humidity flowing through heat exchanging pipes increased apparently and the humidity reduced when the air velocities in heat exchanging pipes were 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 heating at night after heat saving in clear days. The power for heating was enhanced with the increase of the air velocity in heat exchanging pipes. The average power for heating is 1.0 kW, 1.6 kW, 3.2 kW, 6.4 kW, 7.2 kW and 7.7 kW respectively. The heating effects is not distinct when the air velocity in heat exchanging pipes is less than 2 m/s, while the continuity for heating is poor when the air velocity in heat exchanging pipes is higher than 2.5 m/s. Therefore the rational air velocity in heat exchanging pipes is 2.0 m/s for heating at night when the temperature satisfies the growing requirements of the crops.

Key words Greenhouse, Underground heat storage system, Air velocity

收稿日期: 2011-11-18 修回日期: 2012-02-02

^{*}国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2012AA10A504)、浙江省教育厅科研项目(20050912)和中央高校基本科研业务费专项 资金资助项目

作者简介:王永维,副教授,博士,主要从农业生物环境控制、农业机器人技术研究, E-mail: wywzju@ zju. edu. cn

引言

温度控制着植株光合作用、呼吸作用、矿物质与 水分吸收、物质合成与运输等各种新陈代谢功能和 反应速率,从而影响植物的生长、发育、繁殖及产量、 品质,是温室环境最优调控、智能化决策等主要控制 环境因子^[1-3]。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^[4-5]。而长江中下游地区太阳能资源较为丰 富,利用太阳能是解决该地区温室供热需求的主要 途径之一。

目前,利用太阳能实现温室加温的方法主要是 利用温室太阳能热水器加温系统[5~6]、温室相变储 热加温技术^[7]、温室地下蓄热系统^[8~20]等,其中温 室地下蓄热系统已在美国、法国、俄罗斯、英国、日本 等国家进行了用于温室、畜禽舍环境调控的试 验^[8]。国内外学者对以土壤^[9~14]、地下水^[15]、岩 石^[16]、混凝土^[17-20]为蓄热体的地下蓄热系统进行 了较多的研究与探索,各类地下蓄热系统均具有良 好的温度调节效果,节能显著。但现有研究成果大 部分集中在该类系统对温室环境温度的调节效果 上,而对地下换热管道长度、直径、埋深及其内部空 气流速等对热量传递的影响还需进一步研究分析。 浙江大学在开展的温室地下蓄热系统试验中,前期 研究了温室地下蓄热系统换热管道内流速对蓄热效 果、温室内温度与湿度环境的影响^[20]。本文就该系 统加温时,换热管道内流速对热量传递、水蒸气迁移 的影响进行试验研究。

1 双层覆盖温室地下蓄热系统

1.1 结构与组成

双层覆盖温室地下蓄热系统由温室、中棚、地 坪、轴流式风机、进气道、排气道等组成,如图1所 示。温室为华东型连栋塑料温室,东西走向,跨度 6 m,长 24 m,3 连栋,用于为系统积累热量;中棚顶 高 2 m,肩高 1.7 m,用于增加温室保温性能。地坪 作为苗床,也是该系统热能的贮存体,由蓄热层、隔 热层、基础层、换热管道组成,仅在连栋温室最南侧 的1栋温室中建造了该种地坪,面积 108 m²。蓄热 层为混凝土结构,其中有若干换热管道;隔热层材料 为水泥、煤渣,按一定比例混合;换热管道是温室内 空气中热能向地坪蓄热层转移的媒介,直径 76 mm, 长 18 m,管中心距地坪表面 15 cm,在温室 6 m 的跨 度内沿纵向(东西走向)均匀布置换热管道 45 根, 并与进气道、排气道连通组成并联系统。轴流式风 机设置于进气道一端,排风量 9 000 m³/h,配备电动



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

机功率 250 W^[17~20]。

1.2 蓄热保温原理

白天,温室接受太阳辐射,室内空气温度升高, 有时甚至可能超过作物生长的临界温度,而地坪内 部温度较低,且地坪与静止空气传热较慢,此时启动 轴流式风机使温室内的热空气流经换热管道,空气 中的热能以对流换热的方式向地坪转移,地坪温度 升高,其内部贮存大量的热能。夜间,当温室内温度 低于地坪温度时,地坪中的蓄热以导热方式传入温 室空气中,或启动轴流式风机,温室内较冷的空气流 经换热管道被加温,补充温室的热损失,从而维持温 室内相对较高的空气温度^[17,19]。

2 试验方案

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,试验只能对不同时期以不同换热管道内空 气流速蓄热后的加温效果进行测试。轴流式风机采 用变频电源,通过调节变频电源频率改变轴流式风 机叶轮转速,实现换热管道内空气流速调节。利用 EY3-2A型电子微风仪(量程:0.05~30.0 m/s;精 度:±2%)测定轴流式风机在变频电源不同频率时 各换热管道空气流速并求平均流速,取平均流速为 0.6、1.0、1.5、2.0、2.5、2.8 m/s 时变频电源对应的 频率,即为试验时要求流速所需的频率。

试验时,以同一流速连续运行并测试 1 周。晴 天、多云时,9:00 打开中棚覆盖膜,10:30~15:00 进 行蓄热,15:00 关闭中棚覆盖膜,阴天时不蓄热。 17:00~22:00 进行加温,测试换热管道进口、出口 处空气温度与湿度、地坪温度及外界气温。测点布 置如下:在温室纵向中心面、进气道上方布置 ZDR – 20 型温度和湿度数据记录仪(量程:温度 – 40 ~ 100 $^{\circ}$,湿度 0.1% ~ 100%;精度:温度 ± 0.5 $^{\circ}$,湿 度 ± 3%),距地坪表面 1 m,以测试换热管道进口处 空气温度、湿度;在排气道出口处布置 ZDR – 20 型 温度和湿度数据记录仪,以测试换热管道出口处空 气温度、湿度。因地坪为对称结构,且各换热管道内 空气流量分布均匀^[18],蓄热加温时地坪温度分布均 匀^[10],故仅在地坪纵向中心线一侧布置 TDW2001 型电子式温度指示调节仪(精度±0.5℃)15 只,测 点布置如图2中T11~T53所示,测点位于两换热管 道之间,深10 cm,以测试地坪温度并取其平均值。 利用 ZDR - 20 型温度和湿度数据记录仪测试室外 温度。





2.2 主要计算公式

加温时,温室低温高湿空气流经换热管道时伴随热量交换与水蒸气迁移,换热管道进出口处空气 熔计算式为^[21]

 $h = h_s + h_i = (1.01 + 1.84d)t + 2500d$ (1) 其中 $h_s = (1.01 + 1.84d)t$ $h_i = 2500d$ 式中 h——湿空气焓,kJ/kg h_s ——湿空气显热,kJ/kg h_i ——湿空气潜热,kJ/kg t——空气温度, C d——湿空气含湿量,g/kg 换热管道进出口空气含湿量计算式为^[21] $d = \varphi d_s$ (2)

式中 *q*——相对湿度

 d_b ——饱和含湿量,kg/kg

加温时,温室内冷空气流经换热管道时的热量 交换量即为加温量,单位时间内的加温热量即为加 温功率,计算式为

$$P = \sum vA\rho(h_o - h_i) \tag{3}$$

其中

式中 P----加温功率,kW

v——换热管道内空气流速,m/s

 $A = 45 \pi D^2 / 4$

- 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,——换热管道进口处空气焓,kJ/kg
- h_----换热管道出口处空气焓,kJ/kg

3 试验结果与分析

3.1 试验结果

双层覆盖温室地下蓄热系统分别以 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 热与加温试验,于2006年12月23日至2007年 2月8日在浙江大学进行。因以不同空气流速的蓄 热加温试验是在不同时期进行的,所以前期以较高 流速进行蓄热对后期较低流速蓄热初期创造较高的 地温条件,会增强后期的蓄热加温效果。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典型晴天时的试 验与计算结果进行分析。试验结果如图 3~5 所示, 6幅图依次为2007年2月5日、2月1日、1月 24 日、1 月 21 日和 2006 年 12 月 25 日、12 月 31 日 试验结果。图中 t_i 为换热管道进口处温度; ϕ_i 为换 热管道进口处湿度;t。为换热管道出口处温度; φ。为 换热管道出口处湿度;d,为换热管道进口处湿空气 含湿量;d。为换热管道出口处湿空气含湿量;t、为地 坪 10 cm 深处温度;t 为室外温度;h。为换热管道进 口处湿空气显热;h。为换热管道出口处湿空气显 热;h₁为换热管道进口处湿空气潜热;h₁为换热管道 出口处湿空气潜热。

3.2 试验结果分析

由图 3 知,在冬季晴天白昼,该系统分别以 0.6、1.0、1.5、2.0、2.5、2.8 m/s 的换热管道流速蓄 热,夜间以相同流速进行加温,温室内冷空气流经换 热管道而被加温,温度提高 6 ~ 11℃,湿度明显下 降,在夜间外界气温低于 5℃时,加温期间中棚内气 温较低的换热管道进口处气温平均分别高于外界 2.7℃、3.0℃、3.1℃、4.7℃、5.3℃、7.1℃,与室外保 持了较大的温差,具有一定的加温效果。

换热管道内空气流速影响着系统蓄热终了苗床 温度和加温能力。由图 3 知,当以 0.6、1.0、1.5、 2.0 m/s 的换热管道流速白昼蓄热后,夜间加温初 期时 苗床温度分别为 17.1℃、16.8℃、16.0℃、 18.0℃,均小于常见温室栽培作物幼苗对苗床最高 温度 20℃的要求^[22];随着加温的进行,地坪温度不 断下降,至 22:00 时地坪温度已接近或低于 13.0℃,不能满足常见温室栽培作物如番茄幼苗对 苗床最低温度 13℃的要求^[22]。以换热管道进口处 气温近似作为中棚气温,当换热管道空气流速为 0.5、1.0、1.5 m/s 时,加温终了中棚内换热管道进口 处与室外气温差分别只有 1.8℃、2.3℃、1.5℃,而 温室每增加一层覆盖膜,可提高夜间温度 1~2℃, 且保温效果具有累加效应^[23],因此,以 0.5、1.0、



Fig. 3 Air temperature and humidity in inlet and outlet of heat exchanging pipes at different air velocities during heating (a) v = 0.6 m/s (b) v = 1.0 m/s (c) v = 1.5 m/s (d) v = 2.0 m/s (e) v = 2.5 m/s (f) v = 2.8 m/s





1.5 m/s的换热管道空气流速蓄热后加温后期的加 温效果不显著。

由图 3 知,当以 2.0、2.5、2.8 m/s 的换热管道 流速白昼蓄热后,夜间加温初期时苗床温度分别为 18.0℃、18.9℃、22.3℃,其中白昼以 2.8 m/s 流速 进行蓄热苗床温度已超过常见温室栽培作物幼苗对 土壤最高温度 20℃的要求。为了获得蓄积更多热 量,同时不使苗床的温度超过温室栽培作物幼苗对 土壤最高温度,白昼应以2.5~2.8 m/s的换热管道 空气流速蓄热以提高地坪温度。在夜间以2.0、 2.5、2.8 m/s的换热管道空气流速加温过程中,中棚 内换热管道进口处与室外气温差逐渐减小,在外界 气温低于5℃的情况下加温终了时中棚内换热管道 进口处气温仍分别高于外界3.6℃、5.1℃、3.7℃,



Fig. 5 Heating power, difference of air enthalpy and humidity ratios between inlet and outlet of heat

exchanging pipes at different air velocities

(c) v = 1.5 m/s

(d) v = 2.0 m/s (e) v = 2.5 m/s (f) v = 2.8 m/s

与室外保持了较大的气温差,具有良好的加温效果, 但加温期间地坪温度分别由初始的 18.0℃、 18.9℃、22.3℃降低至加温末时的 13.9℃、13.5℃、 14.9℃,地坪的降温幅度、速度随着换热管道空气流 速而增加,当换热管道空气流速大于 2.5 m/s 时系 统的持续加温能力明显下降。因以 2.0、2.5、 2.8 m/s 的换热管道空气流速加温至 22:00 时加温 效果差异较小,为了获得持续的加温能力,在满足作 物生长所需温度且为实现节能,夜间应以 2.0 m/s 的换热管道流速进行加温,当地坪温度低于 13℃ 时,系统应停止运行并启动应急加温设备以维持温 室适宜的温度。

(a) v = 0.6 m/s

(b) v = 1.0 m/s

需要说明的是,图 3 中地坪温度为地坪自换热 管道进口至出口测点的平均温度,加温初期一段时 间内地坪温度自换热管道进口至出口降低,随着加 温失热增加换热管道进口侧地坪温度下降较快,至 加温后期地坪测点温度由换热管道进口至出口递 增,出现了换热管道出口气温高于地坪温度的现象, 但整个加温期间地坪最高温度均高于出口气温。

由图 4、图 5 知,该系统分别以 0.6、1.0、1.5、 2.0、2.5、2.8 m/s 的换热管道空气流速白昼蓄热、夜 间以相同流速进行加温时,温室内冷空气流经换热 管道焓值明显提高,不同流速时分别提高了 3.8 ~ 12.6 kJ/kg、3.9 ~ 10.0 kJ/kg、5.5 ~ 14.5 kJ/kg、 8.3 ~ 22.5 kJ/kg、8.5 ~ 15.7 kJ/kg、9.5 ~ 16.1 kJ/kg, 换热管道进出口平均焓差分别达 7.6 kJ/kg、 6.4 kJ/kg 8.6 kJ/kg 12.8 kJ/kg 11.6 kJ/kg 12.4 kJ/kg,流经空气将白昼贮存在苗床内的热量 传输至温室内。在17:00~22:00 的加温过程中,换 热管道进口处空气焓值不断下降,但温室内低温高 湿的冷空气流经换热管道后,吸收苗床的热量,使得 出口处空气显热明显增加。在加温初期的1~2h 内,苗床内水分蒸发后进入流经换热管道内空气 使出口处空气含湿量增加,出口处潜热值增加,进 出口处潜热差加大,这一阶段换热管道内空气与 管壁的热量交换方式为显热交换、潜热交换并存。 随加温的进行,苗床温度逐渐降低,进出口空气含 湿量变化减小,进出口处潜热基本相等;至加温后 期,由于苗床内换热管道的平衡水分小于流经的 湿空气平衡水分,换热管道出现吸湿现象,使出口 空气含湿量低于进口处,进出口潜热差出现负值, 但差值较小。

加温功率是该系统加温经济性的重要评价指标 之一。由图 5 知,以 0.6、1.0、1.5、2.0、2.5、2.8 m/s 的换热管道空气流速加温时,系统加温功率分别达 0.5~1.6 kW、1.0~2.5 kW、2.0~5.4 kW、4.2~ 11.3 kW、5.3~9.8 kW、5.9~10.0 kW,平均加温功 率分别为 1.0、1.6、3.2、6.4、7.2、7.7 kW,各时段加 温功率、平均加温功率均远大于轴流式风机电动机 额定功率 250 W。

4 结束语

在冬季晴天,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白昼蓄 热后夜间加温时,中棚内气温较低的换热管道进口 处气温平均分别高于外界 2.7、3.0、3.1、4.7、5.3、 7.1℃,平均加温功率分别为 1.0、1.6、3.2、6.4、 7.2、7.7 kW,具有一定的加温效果。当换热管道空 气流速小于2.0 m/s时,加温后期加温效果不显著; 当换热管道空气流速大于2.5 m/s时地坪温度下降 快,系统持续加温能力明显下降;在满足作物夜间生 长的温度要求情况下,夜间应以2.0 m/s的换热管 道空气流速进行加温,以获得持续的加温能力。

参考文献

1 王纪章,李萍萍,毛罕平.基于作物生长和控制成本的温室气候控制决策支持系统[J].农业工程学报,2006,22(9): 168~171.

Wang Jizhang, Li Pingping, Mao Hanping. Decision support system for greenhouse environment management based on crop growth and control cost [J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(9):168 ~ 171. (in Chinese)

2 邓璐娟,张侃谕,龚幼民,等.温室环境多级控制系统及优化目标值设定的初步研究[J].农业工程学报,2005, 21(5):119~122.

Deng Lujuan, Zhang Kanyu, Gong Youmin, et al. Preliminary study on hierarchical greenhouse environment control system and setting of the optimized target values [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(5): 119~122. (in Chinese)

- 3 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)
- 4 张亚红,陈青云.中国连栋温室采暖期的确定及采暖能耗分布[J].农业工程学报,2006,22(2):147~152. Zhang Yahong, Chen Qingyun. Analysis of heating duration and heating load of multi-span greenhouse in China [J]. Transactions of the CSAE, 2006,22(2):147~152. (in Chinese)
- 5 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 Energiae Solaris Sinica, 2004,25(3):305~309. (in Chinese)
- 6 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. (in Chinese)
- 7 王宏丽,邹志荣,陈红武,等. 温室中应用相变储热技术研究进展[J]. 农业工程学报,2008,24(6):304~307.
 Wang Hongli, Zou Zhirong, Chen Hongwu, et al. Research advances in technologies of phase-change heat storage and its application in greenhouses [J]. Transactions of the CSAE, 2008,24(6):304~307. (in Chinese)
- 8 Santamouris M, Mihaladakou G, Balaras C A, et al. Energy conservation in greenhouse with buried pipes [J]. Energy, 1996,21(5):353 ~ 360.
- 9 Baxter D O. Energy exchanger and related temperatures of an earth-tube heat exchanger in the heating mode [J]. Transactions of the ASAE, 1992,35(1):275 ~ 285.
- 10 Kurata K, Takakura T. Underground storage of solar energy for greenhouse heating. I. Analysis of seasonal storage system by scale and numerical models [J]. Transactions of the ASAE, 1991, 34(5):563 ~ 569.
- 11 Kurata K, Takakura T. Underground storage of solar energy for greenhouse heating. []. Comparison of seasonal and daily storage system [J]. Transactions of the ASAE, 1991,34(5):2181~2186.
- 12 Walder J N, Buxton J W. Can circulating air through a buried pipe be use to heat and cool greenhouses [J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 1977, 102(5):626 ~ 629.
- 13 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 & heat-storing of the underground heat exchange system in a multi-span greenhouse [J]. Transactions of the CSAE, 1999,15(2):160~164. (in Chinese)
- 14 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 Dangcai, Wang Tianliang, et al. Experimental research of heating by fire-pit and underground heating exchange system in a solar greenhouse [J]. Transactions of the CSAE, 2006,22(10):178 ~181. (in Chinese)

Inall M, ünsal M, Tanyildizi V. A computational model of a domestic solar heating system with underground spherical thermal storage [J]. Energy, 1997,22(12):1163~1172.

- 9 Otsu N. A threshold selection method from gray-level histogram [J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1979, 9(1): 62 ~ 66.
- 10 韩思奇,王蕾. 图像分割的阈值法综述[J].系统工程与电子技术,2002,24(6):91~94,102.
 Han Siqi, Wang Lei. A survey of thresholding methods for image segmentation [J]. Systems Engineering and Electronics, 2002, 24(6):91~94, 102. (in Chinese)
- 11 刘健庄,栗文青. 灰度图像的二维 Otsu 自动阈值分割法[J]. 自动化学报, 1993, 19 (1): 101~105. Liu Jianzhuang, Li Wenqing. The automatic thresholding of gray-level pictures via two-dimensional Otsu method [J]. Acta Automatica Sinica, 1993, 19(1): 101~105. (in Chinese)
- 12 陈果, 左洪福. 图像分割的二维最大熵遗传算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2002, 14(6): 530~534.
 Chen Guo, Zuo Hongfu. 2-D Maximumentropy method of image segmentation based on genetic algorithm [J]. Journal of Computer-aided Design & Computer Graphics, 2002, 14(6): 530~534. (in Chinese)
- 13 胡波,毛罕平,张艳诚.基于二维直方图的杂草图像分割算法[J].农业机械学报,2007,38(4):199~202.
- 14 肖刚,应晓芳,高飞,等. 基于邻域灰度差值的二维 Otsu 分割方法研究[J]. 计算机应用研究, 2009, 26(4): 1544~1545, 1548.

Xiao Gang, Ying Xiaofang, Gao Fei, et al. 2D Otsu method based on difference of gray-level histogram [J]. Application Research of Computers, 2009, 26(4): 1544 ~1545, 1548. (in Chinese)

- 15 应义斌.水果图像的背景分割和边缘检测技术研究[J].浙江大学学报:农业与生命科学版, 2000, 26(1): 35~38. Ying Yibin. Study on background segment and edge detection of fruit image using machine vision [J]. Journal of Zhejiang University: Agriculture & Life Sciences, 2000, 26(1):35~38. (in Chinese)
- 16 Rosenfeld A, Torre P De La. Histogram concavity analysis as an aid in threshold selection [J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1983, 13(2): 231 ~ 235.
- 17 景晓军,蔡安妮,孙景鳌. 一种基于二维最大类间方差的图像分割算法[J]. 通信学报, 2001, 22(4): 71~76. Jing Xiaojun, Cai Anni, Sun Jing'ao. Image segmentation based on 2D maximum between-cluster variance [J]. Journal of China Institute of Communications, 2001, 22(4): 71~76. (in Chinese)

(上接第185页)

- 16 Ahmet Kürklü, Sefai Bilgin, Burhanözkan. A study on the solar energy storing rock-bed to heat a polyethylene tunnel type greenhouse[J]. Renewable Energy, 2003,28(5):683 ~ 697.
- 17 梁喜凤,王永维,程绍明,等. 空气流速对温室地下蓄热系统湿热传递影响试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(8): 189~193,188.

Liang Xifeng, Wang Yongwei, Cheng Shaoming, et al. Influence of air velocity in heat exchanging pipes to heat change and water vapor transformation for underground heat storage system in greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(8):189 ~ 193,188. (in Chinese)

18 王永维,梁喜凤,苗香雯,等. 温室地下蓄热系统换热管道流速分布与蓄热性能研究[J]. 浙江大学学报:农业与生命 科学版,2005,31(3):311~314.

Wang Yongwei, Liang Xifeng, Miao Xiangwen, et al. Study on the distribution of airflow velocity within heat exchange pipes and heat saving performance of the underground heat storage system in greenhouse [J]. Journal of Zhejiang University: Agriculture & Life Sciences, 2005,31(3):311~314. (in Chinese)

- 19 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)
- 20 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, $40(5):173 \sim 177$. (in Chinese)

- 21 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.
- 22 周长吉.现代温室工程[M].北京:化学工业出版社,2003.
- 23 李萍萍,胡永光. 冬季塑料大棚多重覆盖及电加热增温效果研究[J]. 农业工程学报,2002,18(2):76~79. Li Pingping, Hu Yongguang. Thermal preservation effect of multi-film covering and heating wire in plastic greenhouses in winter [J]. Transactions of the CSAE, 2002,18(2):76~79. (in Chinese)