

地源热泵—地板散热系统在温室冬季供暖中的应用

方 慧¹, 杨其长^{1*}, 孙 骥²

(1. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081; 2. 恒有源科技发展有限公司, 北京 100093)

摘 要: 针对浅层地能低品位的特点, 在中国农业科学院Venlo型试验温室内设计建造了一套地源热泵与地板散热方式相结合的供暖系统, 并对加热效果进行了试验, 结果表明: 温室内垂直方向的气温随着高度的增加而下降, 水平方向气温分布均匀, 温度分布有利于植物的生长。整套地源热泵系统的实际制热系数COP值达到3.14, 与燃煤锅炉相比节能36.3%, 节能效果明显。

关键词: 地源热泵, 地板采暖, 温室

中图分类号: S625.5⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2008)-12-0145-05

方 慧, 杨其长, 孙 骥. 地源热泵—地板散热系统在温室冬季供暖中的应用[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12): 145—149.

Fang Hui, Yang Qichang, Sun Ji. Application of ground-source heat pump and floor heating system to greenhouse heating in winter[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(12): 145—149.(in Chinese with English abstract)

0 引 言

中国大型连栋温室主要以中小型燃煤锅炉作为加热手段, 耗煤量大。在北方地区冬季加热成本约占运行总成本的30%~50%^[1], 而且燃煤采暖还会产生大量的CO、SO₂、CO₂、NO_x等有害气体, 对环境造成严重污染^[2], 因此有必要研究大型连栋温室清洁能源替代燃煤锅炉加热的技术。地源热泵是一种利用浅层和深层的大地能量(包括土壤、地下水、地表水等天然能源)作为冬季热源和夏季冷源, 由热泵机组向建筑物供热供冷的系统。与其他系统相比, 具有节能、对环境危害小的特点^[3]。据美国近10 a来的统计资料, 地源热泵的运行费用(采暖)比空调节电约22%~25%, 比燃油、燃煤锅炉运行费用节约40%~60%^[4], 被称为21 世纪最有效的供热和制冷技术。浅层地能热泵提供的热媒介质温度较低(45~50℃)^[5], 因此需要改变温室冬季传统的散热方式。目前温室中最常用的散热方式主要有热水管道散热和热风散热。无论哪种散热方式, 其散热器位置对温室的温度环境有很大的影响, 同时也影响温室的能量消耗。K.W.Winspear^[6]研究了散热器在不同位置时温室内气温的垂直分布, 认为散热器位于地面时使温室有比较均匀的垂直温度梯度分布。F.L.K.Kempkes^[7]等人研究表明, 散热器位于温室上部时, 温室将增加5%~10%的能耗。Popovski^[8]认为散热器位置低, 有利于减少屋顶的辐射传热, 增加植物冠层的辐射换热。Beille et al^[9]也得到相同的结论, 认为散

热器位置低有利于微气候的控制, 在生长区内能够得到均匀的空气和叶面温度。针对传统散热方式的优缺点和浅层地能低品位的特点, 本试验采用地源热泵和地板采暖的加热模式替代原有的燃煤锅炉和暖气管道对温室进行加温。

1 试验设计与方法

1.1 温室地源热泵系统

温室地源热泵系统由温室、能量采集系统、能量提升系统和能量释放系统组成。如图 1 所示, 试验温室为 Venlo 型玻璃温室, 南北走向, 东西向单跨宽度 8.0 m, 共 2 跨, 南北长度 32 m, 屋脊高 4.0 m, 总高 5.5 m, 屋脊双侧间隔开窗。室内温室地面上 3.5 m 和室外距地面 6.0 m 分别设一层水平移动保温幕和遮阳网, 均为镀铝聚酯材料。能量采集系统采用单井抽灌技术, 地下水通过抽水系统进入热泵系统, 经过与系统介质能量交换后又通过抽水井回灌到地下。

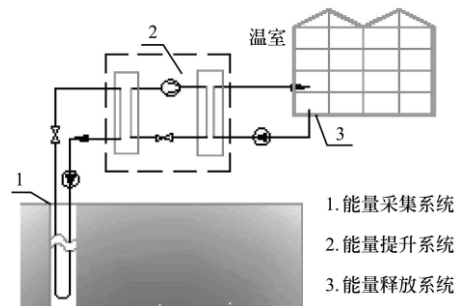


图 1 地源热泵系统组成

Fig.1 Composition of ground-source heat pump(GSHP) system

1.2 地板散热方式及参数

针对浅层地能低品位的特点, 在散热方式上选用地面供热方式。地面供热^[10]是指将加热管置于地表以下, 加热管将热量传递给地面, 然后以整个地面作为散热面

收稿日期: 2008-03-26 修改日期: 2008-09-06

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划项目(2006BAD28B07-2)

作者简介: 方 慧(1983—), 女, 工程师, 主要从事设施农业环境工程方面的研究。北京 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 100081。Email: fh2002124@163.com

*通讯作者: 杨其长(1963—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事设施园艺环境工程研究。北京 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 100081。Email: yangqc@cjac.org.cn

加热温室的一种加热方式。本试验温室地板采暖结构主要参考了《地面辐射供暖技术规程》^[11]和《温室地板加热系统的研究》^[1]的规范和要求。温室地面供热系统采用DN20的PVC管作为辐射供暖管道,共分为3组盘管,如图2所示,分别将各自的进水管用分集水器与总进出水接头相连接,管道下方铺设20 mm的复合隔热层,铺设管道后再铺50 mm的散热层,剖面图如图3所示。机组采用水—水式地源热泵,整机额定功率为11 kW,与地源热泵配套使用的潜水泵型号为 QPG 50-200,整机额定功率为1.1 kW。循环水泵采用变频泵型号为UPS 40-185F,额定功率为0.228 kW。

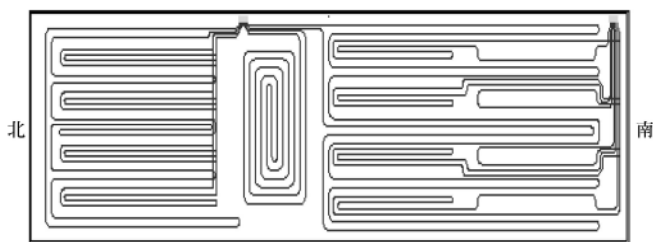


图2 温室地面供暖管道

Fig.2 Arrangement of ground heating pipes in greenhouse

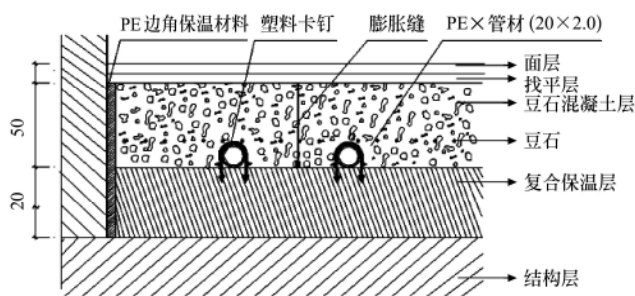


图3 管道埋设地面剖面图

Fig.3 Sectional drawing of pipe structure

1.3 试验设计

测温点的布局及编号如图4所示,在试验温室中间剖面上下设置6个测点,各测点依次距地面0、0.5、1.5、2.5、3.5、5 m,观测温室内气温的垂直变化。南北方向设置6个测点,各测点距地面1.5 m,测定温室南北方向上的气温变化。温室东西方向设置5个测点,各测点距地面1.5 m。在试验温室内外各测点安置温湿度自计仪,测定温室内外空气温湿度度的变化。温室南北方向和垂直方向各测点均采用T系列的热电偶和相应的数据采集模块来测定试验室内气温,试验安置的温湿度自计仪均为德国德图公司生产的175-H2型温湿度记录仪。

2 结果与分析

2.1 节能效果

2007年12月19日对地源热泵地面供热系统实际制热效果进行测量,温室内种植番茄和生菜,室外天气晴好,下午17:00开启地源热泵系统同时拉内保温幕,外遮阳网不拉,19:00开始记录数据,到第二天早上8:00关闭地源热泵系统同时拉开保温幕,每次测量间隔时间为

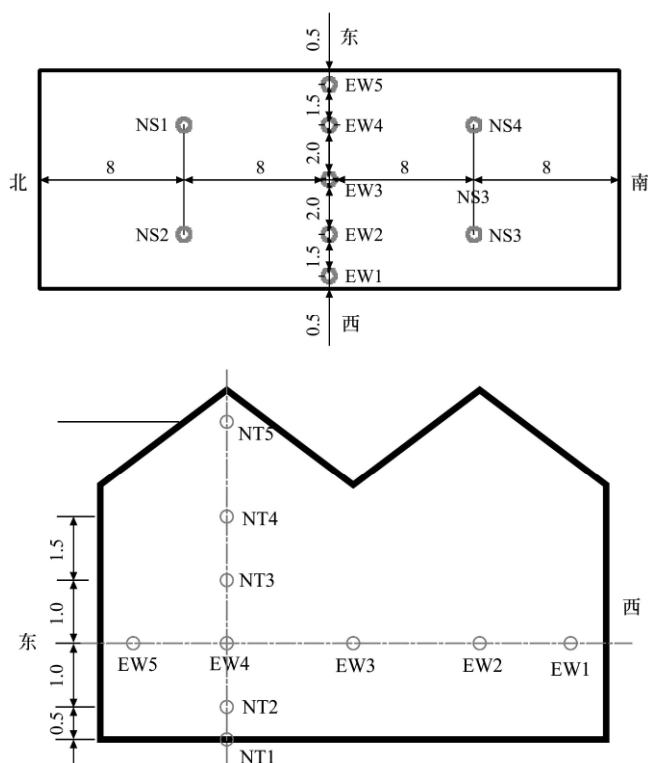


图4 室内气温测点布局

Fig.4 Layout of air temperature measuring points inside greenhouse

10 min。测得进出水最大温差为13.2℃,最小温差为1.55℃,平均温差为8.1℃,水的流量为3.39 m³/h,根据电表读数,平均耗电功率为11.8 kW。

1) 地源热泵供热系统实际制热效果

在地源热泵加热的条件下,其实际制热效果根据地面供热管进、出水温度、流量和热泵机组、潜水泵、循环水泵用电量确定,计算公式为^[12]:

$$COP = \frac{V \times \rho \times C_{pA} \times \Delta T}{K_{WH}} \quad (1)$$

式中 COP ——地源热泵实际制热系数; V ——地源热泵循环水流量, m³/s; ρ ——水的密度, kg/m³; C_{pA} ——水的热容, kJ/kg·℃; ΔT ——地源热泵进出水口温差, ℃; K_{WH} ——地源热泵系统总输入功率, kW。

2) 地源热泵加热温室节能效果

选用与试验温室结构相同的温室作为对照温室,对照温室为市网集中供暖。取2007年12月19日晚上20:00到2007年12月20日上午8:00对照温室内外平均温差和试验温室内外平均温差,按日加温12小时,分别计算出对照温室和试验温室单位面积单位温差的日总耗能量,折合为标准煤后进行节能效果比较。

地源热泵供热能耗按下式计算^[12]:

$$HP_c = \frac{R_s \times h \times 3600}{Q_H \times COP \times \eta_d \times \eta_p \times 1000} \quad (2)$$

式中 HP_c ——地源热泵温室单位面积日总能耗折合标准煤量, kg/(m²·d); R_s ——地源热泵温室供热单位面积

指标, W/m^2 ; h ——日平均供热小时数, h/d ; Q_H ——标准煤的热值, 取 $29260 \text{ kJ}/\text{kg}$; COP ——地源热泵温室的实际供热系数; η_d ——火力发电厂的发电效率, 取 0.35; η_p ——输配电效率, 取 0.95。

燃煤锅炉供热能耗按下式计算^[12]:

$$B_c = \frac{W_s \times h \times 3600}{Q_H \times \eta_g \times \eta_w \times 1000} \quad (3)$$

式中 B_c ——燃煤锅炉温室单位面积日总能耗折合标准煤量, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; W_s ——燃煤锅炉温室供热单位面积指标, W/m^2 ; η_g ——燃煤锅炉效率, 取 0.7; η_w ——管网输送效率, 取 0.95。

温室节能效果如表 1, 从表 1 中可以看出, 由于地源热泵系统的实际制热系数为 3.14, 与同类型的燃煤锅炉温室相比节能 36.3%。

表 1 温室采用地源热泵加温与采用燃煤锅炉加温时能耗
Table 1 Energy consumption of greenhouse heated by coal fuel and ground-source heat pump

| 加温方式 | 地源热泵 | 燃煤锅炉 |
|---|-------------|-------------|
| 温室类型 | Venlo 型玻璃温室 | Venlo 型玻璃温室 |
| 温室面积/ m^2 | 256 | 256 |
| 供热总负荷/ kW | 43.29 | 43.29 |
| 温室内外平均温差/ $^{\circ}\text{C}$ | 14.92 | 14.92 |
| 温室面积供热指标/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ | 169.1 | 169.1 |
| 单位温差直接能耗负荷/ $\text{W} \cdot (^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^2)^{-1}$ | 11.33 | 11.33 |
| 单位面积日耗能折合为标准煤/ $\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ | 239.1 | 375.4 |
| 节能率/% | 36.3 | |

2.2 试验温室内采用地板采暖时温室内气温分布

温室内垂直方向温度分布如图5所示, 植物生长区 0.5~3.5 m空间内, 温度可维持在 $14.5 \sim 16.3^{\circ}\text{C}$, 夜间温度波动小, 最大温差仅有 1.0°C ; 凌晨5:30室外温度最低, 在室外温度为 -0.8°C 下, 室内气温也能达到 14.7°C ; 温室内3.5 m高度处有内保温幕, 内保温幕以上空间内气温比较低, 平均温度为 10.0°C ; 温室地面温度较高, 平均温度为 22.2°C , 随着开机时间的增加, 温室地面温度呈上升趋势, 早上8:00关机时, 地面温度最高达到 24.6°C 。图6为垂直方向上平均气温随着高度的变化曲线, 从图6可以看出, 随着高度的增加温室内气温呈下降趋势; 在0~0.5 m的高度范围内, 温度下降梯度为 $11.8^{\circ}\text{C}/\text{m}$, 在0.5~1.5 m的高度范围内, 温度下降梯度为 $0.8^{\circ}\text{C}/\text{m}$, 在1.5 m到3.5 m空间内温度变化很小, 保温幕以上空间温度下降梯度为 $3.6^{\circ}\text{C}/\text{m}$; 与传统加热方式垂直温度梯度分布有明显的区别^[13], 在温室四周布置散热器的加热方式, 热空气向上运动, 形成地面温度低保温幕下温度高, 保温幕下温度比地上温度高 $2 \sim 3^{\circ}\text{C}$, 华北型温室的测试也得到了这种结果^[14,15]。

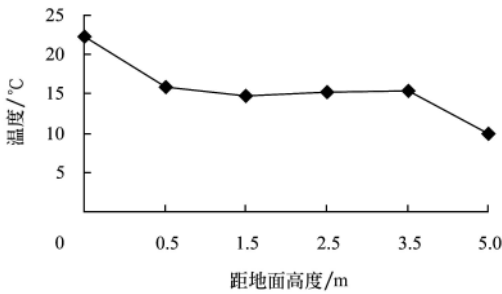


图 6 温室内垂直方向气温变化
Fig.6 Temperature changes of greenhouse in the vertical direction

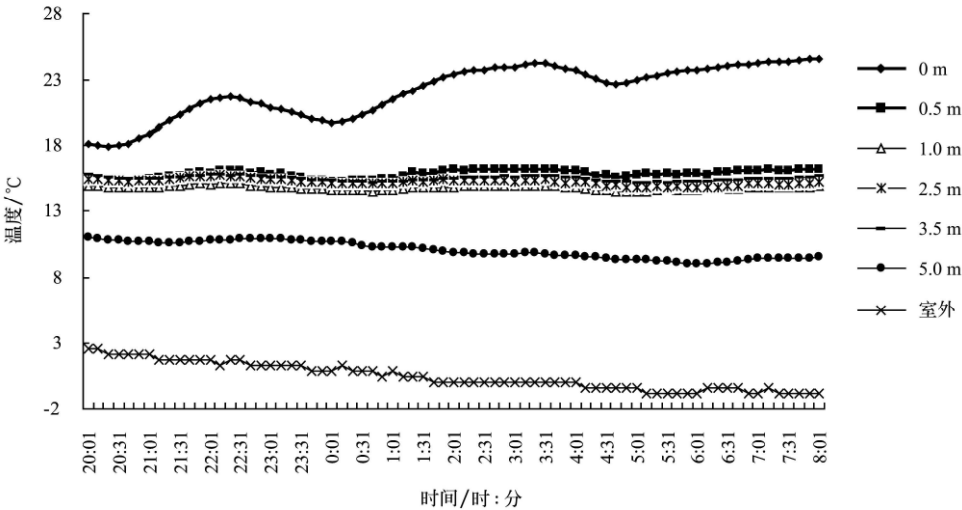


图 5 试验温室内垂直方向上地、气温分布
Fig.5 Soil and air temperature curve of greenhouse in the vertical direction

从图7中可以看出, 在东西方向温室内温度波动比较小; 距东墙0.5、2.0、4.0、6.0、7.5 m处平均温度分别为 15.2°C 、 14.8°C 、 15.4°C 、 16.0°C 、 15.4°C 。从图中可以看出东西方向最大温差为 1.2°C , 温室东西方向温度分布比较均匀。

从图8中可以看出曲线分区明显; 将每一点的平均温度进行比较可以看出, 温室内气温南高北低, 温室北面平均温度比南面低 2.4°C ; 温室北墙上装有湿帘, 虽然在冬季湿帘外套了一层塑料膜, 但塑料膜保温性能比玻璃差, 温室北墙外平均温度为 9.3°C , 而温室南墙外平均温

度为 12.0°C ，这也是形成温室内温度南北差异的原因。因此，与散热器布置于四周和柱间的温室相比，地面加热

系统使温室南北空气温度分布更均匀^[16]。

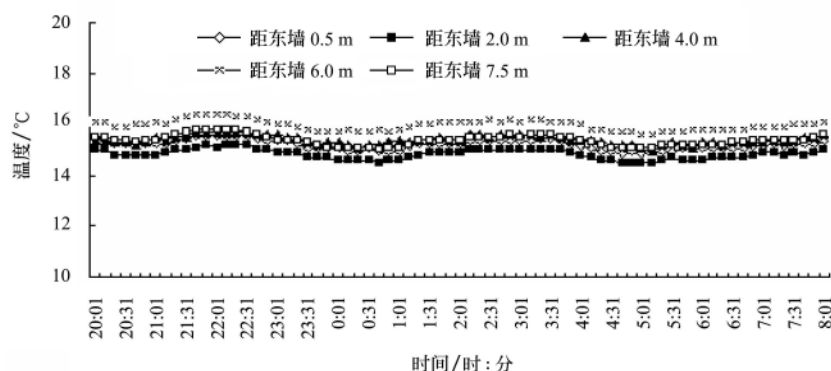


图 7 试验温室内东西方向气温分布

Fig.7 Air temperature curve of greenhouse in the East-West direction

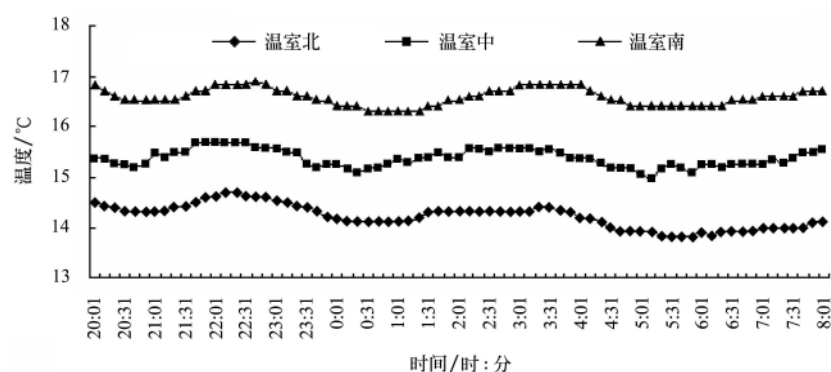


图 8 试验温室内南北方向气温分布

Fig.8 Air temperature curve of greenhouse in the North-South direction

3 小 结

本文首次将地源热泵与地板采暖相结合，并对温室进行了冬季的加温试验，研究了系统的使用效果，获取大量数据，主要结论如下：(1) 地源热泵系统冬季实际制热系数COP为3.14，与传统燃煤锅炉温室相比节能36.3%，节能效果明显。(2) 采用地板采暖的加热方式，温室内垂直方向温度逐渐降低，与传统散热器位于四周及柱间的加热方式相比有明显的区别^[12]。试验温室内植物冠层高度东西方向最大温差为 1.2°C ，温度分布比较均匀。试验温室内南北方向最大温差为 2.4°C ，主要是因为温室北墙上装有湿帘，透风传热量数大。因此，地面加热系统使温室南北空气温度分布更均匀。

[参 考 文 献]

- [1] 曲 梅. 温室地板加热系统的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2002.
- [2] 蔡义汉. 地热直接利用[M]. 天津: 天津大学出版社, 2004: 1—17.
- [3] 徐 伟, 皱 瑜, 刁乃仁, 等. 地源热泵系统工程技术规范[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005: 1—58.
- [4] 程国强. 地源热泵换热器的分析与设计[D]. 浙江: 浙江大学, 2005.
- [5] 李新国, 赵 军, 朱 强. 地源热泵系统及经济性分析[J]. 工厂动力, 2002, (1): 1—4.
- [6] Winspear K W. Vertical temperature gradients and greenhouse energy economy[J]. Acta Horticulture, 1978, 76: 97—103.
- [7] Kempkes F L K, Van de Braak N J, Bakker J C. Effect of heating system position on vertical distribution of crop temperature and transpiration in greenhouse tomatoes[J]. J Agriculture Engineering Research, 2000, 75: 57—64.
- [8] Popovski K. Location of heating installations in greenhouse for low temperature heating fluids. Industrial thermal effluents for greenhouse heating[A]. Proceedings of CNRE Workshop 17~19 September[C]. Dublin, Ireland, 1986, CNRE Bulletin No.15, 51—53.
- [9] Teitel M, Segal I, Shklyar A, et al. A Comparison between pipe and air heating methods for greenhouses[J]. J Agriculture Engineering Research, 1999, 72: 259—273.
- [10] 曲 梅, 马承伟, 李树海, 等. 地面加热系统温室热环境测定与经济分析[J]. 农业工程学报, 2003, 19(1): 180—183.
- [11] JGJ142-2004, 地面辐射供暖技术规程[S].
- [12] 王吉庆, 张百良. 水源热泵在温室加温中的应用研究[J]. 中国农学通报, 2005, 21(6): 415—419.
- [13] 张慧玲, 付祥钊, 王 勇, 等. 地源热泵—地面供热系统在温室中的应用试验研究[J]. 暖通空调, 2006, 36: 227—231.
- [14] 凌 坚. 连栋温室反射型保温幕的性能研究[D]. 北京:

- 中国农业大学, 2000: 46—50.
- [15] 潘 强, 黄之栋, 马承伟, 等. 华北型连栋塑料温室节能对策与实践[J]. 农业工程学报, 1999, 15(2): 155—195.
- [16] 林 聪, 黄之栋, 马承伟, 等. 华北型连栋温室热水采暖系统节能技术探讨[J]. 发展中的中国工厂化农业, 2000.

Application of ground-source heat pump and floor heating system to greenhouse heating in winter

Fang Hui¹, Yang Qichang^{1*}, Sun Ji²

(1. *Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;*
2. *Ever Source Science and Technology Development Co. Limited, Beijing 100093, China*)

Abstract: According to the characteristics of superficial geothermal energy, ground-source heat pump(GSHP) and floor heating were used for the greenhouse heating in winter. The ground-source heat pump greenhouse heating system was installed in a Venlo type test greenhouse of the Chinese Academy of Agricultural Sciences. The results showed that the temperature of greenhouse in the vertical direction decreased with the increase of height, and the temperature in the horizontal direction was well distributed and helpful to plant growth. The actual heating coefficient of performance(COP) of the GSHP was 3.14. The experimental greenhouse heated by GSHP saved energy by 36.3%, compared with that in the greenhouse heated by coal fuel.

Key words: ground-source heat pumps, floor heating, greenhouses