

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.14.034

基于太阳能热补偿的连栋温室高效地源热泵系统设计 设计与试验

罗冬¹ 宋大平¹ 康大磊² 刘继凯² 王冰雪³ 左强¹

(1.北京市农林科学院,北京 100097; 2.北京众博熙泰农业科技有限公司,北京 102200;
3.北京南郊农业生产经营管理有限公司,北京 100163)

摘要:为解决北方连栋温室冬季供暖能耗高、调控精度低,夏季降温效果差、耗水量大,且长期运行易引发土壤热失衡问题,本研究设计了一套基于太阳能热补偿的连栋温室高效地源热泵集成系统(简称高效地源热泵系统)。通过多维度协同优化,实现地埋管换热、变频热泵机组、“顶置辐射板+侧墙对流散热器”复合散热末端与太阳能热补偿的全链条高效匹配,采用复合散热模式适配温室空间特性,构建太阳能热补偿机制。以北京通州 11 000 m² 的 Venlo 型连栋温室为研究对象开展全年试验,结果显示:冬季室外平均温度 -5℃ 时,系统平均制热能效比(COP)达 5.7,室内日间适宜作物生长温度 18~25℃、夜间时段稳定不低于 16℃,波动不大于 ±1.5℃;夏季室外平均 32℃ 时,系统平均制冷能效比(EER)达 7.0,室内温度低于 26.7℃,相对湿度维持 65%~75%。相较于传统“燃煤+风机湿帘”模式,系统综合节能率达 54.2%,单位面积运行成本降至 10.8 元/(m²·季);太阳能热补偿对土壤热平衡的调控作用,使土壤年温度变化 4.4~5.9℃,热失衡系数降至 8.7%,有效抑制深层土壤冷累积,且稳定的温湿度环境使番茄单株产量提升 19.4%。研究结果为北京及华北同类气候区连栋温室绿色低碳节能调控提供了技术可行、经济合理的解决方案。

关键词: 连栋温室; 地源热泵; 太阳能热补偿; 节能调控; 作物生长

中图分类号: S23; TK428 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2026)14-0351-10 OSID: 

Design and Experiment of High-efficiency Ground Source Heat Pump System for Multi-span Greenhouses Based on Solar Thermal Compensation

Luo Dong¹ Song Daping¹ Kang Dalei² Liu Jikai² Wang Bingxue³ Zuo Qiang¹

(1. Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China

2. Beijing Zhongboxitai Agricultural Technology Co., Ltd., Beijing 102200, China

3. Beijing Southern Suburb Agricultural Production, Operation, and Management Co., Ltd., Beijing 100163, China)

Abstract: Aiming to address the issues of high heating energy consumption and low control accuracy in winter, poor cooling performance and high water consumption in summer, as well as the long-term risk of soil thermal imbalance in northern multi-span greenhouses, an efficient ground-source heat pump integrated system with solar thermal compensation (referred to as the efficient GSHP system) was designed. Through multi-dimensional collaborative optimization, the system achieved full-chain efficient matching among borehole heat exchangers, variable-frequency heat pump units, a combined terminal system consisting of overhead radiant panels and sidewall convector radiators, and solar thermal compensation. The combined terminal configuration adapted to the spatial characteristics of the multi-span greenhouse, while a solar thermal compensation mechanism was established. A year-round experiment was conducted in a Venlo-type multi-span greenhouse with an area of 11 000 m² in Tongzhou, Beijing. Results showed that at an average outdoor temperature of -5℃ in winter, the system achieved an average coefficient of performance (COP) of 5.7 for heating, maintaining a daytime indoor temperature of 18~25℃ and the temperature during nighttime hours shall not be lower than 16℃ with fluctuations within

收稿日期: 2026-02-03 修回日期: 2026-03-04

基金项目: 北京市乡村振兴农业科技项目(NY2502220025)和北京市农林科学院科普项目(KPXM202501)

作者简介: 罗冬(1971—),男,工程师,主要从事电力工程及自动化技术研究,E-mail: dongluo1972@163.com

通信作者: 左强(1972—),男,副研究员,主要从事农业资源环境技术研究,E-mail: ZQ18189@163.com

$\pm 1.5^{\circ}\text{C}$. In summer, at an average outdoor temperature of 32°C , the system achieved an average energy efficiency ratio (EER) of 7.0 for cooling, with indoor temperature below 26.7°C and relative humidity maintained between 65% and 75%. Compared with the conventional “coal boiler + fan-pad” system, the integrated system achieved an overall energy saving rate of 54.2%, and the operating cost per unit area was reduced to $10.8\text{ RMB}/(\text{m}^2\cdot\text{season})$. The regulating effect of solar thermal compensation on soil thermal balance resulted in an annual soil temperature variation of $4.4\sim 5.9^{\circ}\text{C}$ and reduced the thermal imbalance coefficient to 8.7%, effectively suppressing deep soil cold accumulation. Moreover, the stable temperature and humidity environment increased the tomato yield per plant by 19.4%. This system can provide a technically feasible and economically viable solution for green, low-carbon, and energy-efficient climate control in multi-span greenhouses in Beijing and other regions with similar climatic conditions in North China.

Key words: multi-span greenhouse; ground source heat pump; solar thermal compensation; energy-saving regulation; crop growth

0 引言

连栋温室是设施农业模块化生产的核心载体,能突破自然气候限制实现农作物反季节种植,但冬夏环境调控能耗占总运行成本的 40% ~ 70%^[1],成为设施农业绿色低碳发展的核心瓶颈。我国北方冬寒夏热,传统温室冬季燃煤/燃气供暖能耗高、污染严重、调控滞后,夏季风机湿帘降温受湿度影响大、耗水量高。地源热泵作为一种稳定且环境友好可再生能源利用技术^[2],凭借浅层土壤恒温特性实现供暖制冷,高效、节能、且环保^[3],被广泛用于农业设施环境调控。

近年来,国内外学者围绕地源热泵在农业设施中应用开展了诸多研究。Ma 等^[4]研究了 PV/T 热泵系统策略对能量收益、总能耗及热泵平均制热能效比(Coefficient of performance, COP)的影响;Liang 等^[5]针对 PV/T 并联式热泵系统的冬季供暖性能分析,PV/T 模块发电量占季总耗电量的 43%;石惠娴等^[6]针对蓄能型地下水源热泵供能系统开展节能运行优化调控;李江辉等^[7]聚焦严寒地区玻璃温室供暖需求,证实土壤源热泵系统在极端寒冷区域面临失衡;李鹏等^[8]研究同等条件下 U 形地埋管换热器换热效果比套管式高 8.57%。但现有相关研究多聚焦单一环节优化、缺乏长期全周期运行验证且未结合连栋温室需求针对性设计,难以实现冬夏两季高效调控^[9]。

针对上述问题,本文以太阳能热补偿为核心协同单元,结合连栋温室结构特点与环境调控需求,提出一套基于太阳能热补偿的连栋温室高效地源热泵集成系统,通过多单元协同优化、复合散热模式、太阳能热补偿机制建立开展全年运行试验,验证系统在能效提升、土壤热平衡维持及作物增产中的作用,为设施农业节能技术升级提供支撑。

1 材料与方法

1.1 试验温室

在北京通州 Venlo 型玻璃连栋温室开展试验,温室面积 $11\,000\text{ m}^2$,用电功率 300 kW,围护结构采用双层中空玻璃(传热系数 $K=2.8\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$),配备外遮阳和内保温幕。试验周期为 2024 年 11 月—2025 年 11 月),其间种植番茄品种“中杂 105”,生育期为 11 月—次年 6 月。当地冬季室外温度 -9.6°C ,夏季室外温度 33.2°C ,土壤初始平均温度 15°C 。

1.2 系统总体设计

1.2.1 设计指标

设计目标是实现冬夏两季环境精准调控,设计指标为:冬季夜间作物最低保障温度 16°C ,日间适宜生长温度区间 $18\sim 25^{\circ}\text{C}$,温度波动不大于 $\pm 2^{\circ}\text{C}$,系统制热能效比(COP)不小于 4.0;夏季室内温度 $25\sim 28^{\circ}\text{C}$,相对湿度 60% ~ 80%,系统制冷能效比(EER)不小于 4.5;太阳能热补偿使土壤热失衡系数不大于 10%,深层土壤冷累积速率不大于 $0.05^{\circ}\text{C}/\text{年}$;土壤温度年变化幅度不大于 15°C ;温度波动不大于 $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$;单位面积运行成本控制在 $10.8\text{ 元}/(\text{m}^2\cdot\text{季})$,较传统方式节能 50% 以上。

1.2.2 系统组成与工作流程

(1) 系统组成

系统由太阳能热补偿侧、地源侧、供暖/制冷侧、控制侧 4 部分组成,如图 1 所示。

太阳能热补偿侧为核心协同单元,含太阳能集热器、蓄热水箱、集热循环泵及电动阀门,承担太阳能热补偿与系统辅助供能;地源侧为 U 形地埋管换热器子系统,实现管内循环水与土壤的热量传递;供暖/制冷侧由变频地源热泵机组、侧墙对流复合散热子系统、风机盘管及循环泵组成,完成温湿度调控,

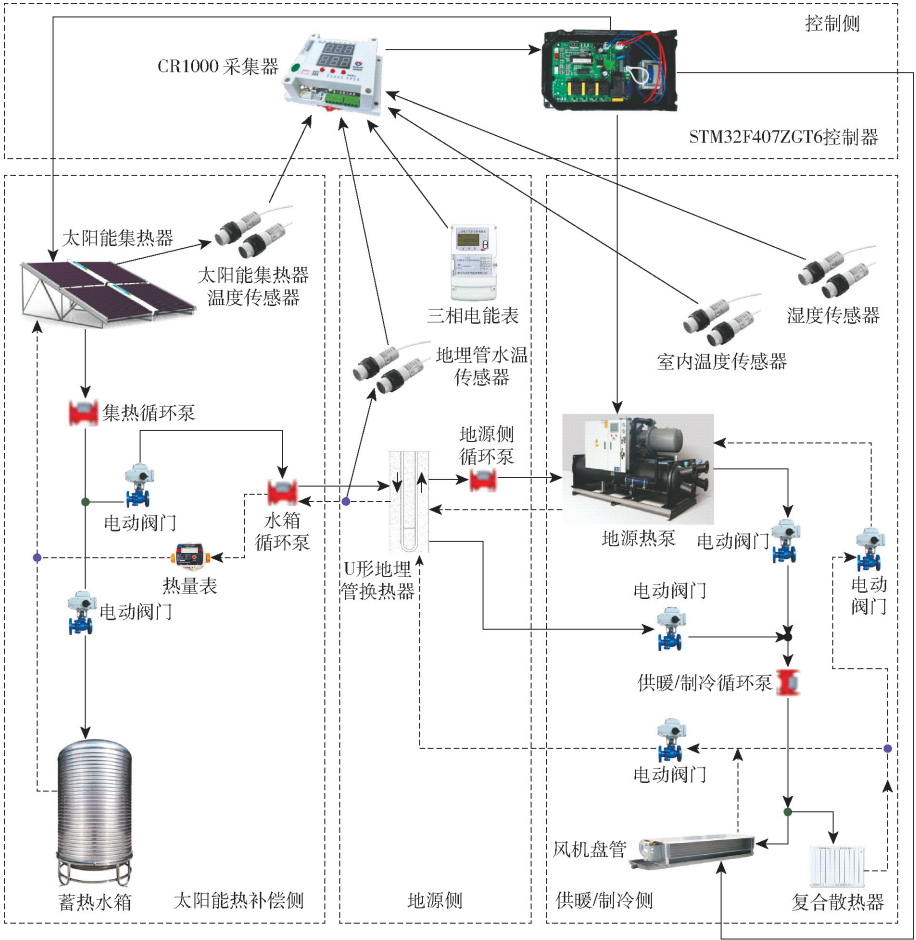


图 1 基于太阳能热补偿的连栋温室高效地源热泵集成系统结构示意图

Fig. 1 Schematic of an efficient integrated ground-source heat pump system based on solar thermal compensation for a multi-span greenhouse

热泵机组通过压缩机、蒸发器、冷凝器、节流阀实现热量品位提升与转移^[10]；室内末端及复合散热器系统通过供热水/冷却水，借助风机盘管和复合散热器调控室内空气温湿度，实现土壤与循环水的热量交换；控制侧为自动控制模块，集成各类传感器、CR1000 采集器及 STM32F407ZGT6 控制器，每 10 min 采集 1 次系统参数，采用 PID 模糊复合控制算法，根据室外气象条件、室内温湿度及土壤温度（冬季室外均温 $\leq 5^{\circ}\text{C}$ ，夏季室外均温 $\geq 25^{\circ}\text{C}$ ），自动切换冬夏工况、调节热泵频率及太阳能热补偿侧运行状态^[11]。

(2) 工作流程

系统根据季节与需求，在冬季供暖与夏季制冷 2 种工况间切换，以太阳能热补偿侧为核心协同运行。

冬季供暖工况流程：地埋管循环水从地源进入热泵蒸发器，经压缩后的高温高压制冷剂气体，在冷凝器中加热室内循环水，加热后循环水分 2 路通过风机盘管、复合散热系统供暖。最终循环水回流至冷凝器完成闭路循环^[12]。

在冬季，当深层土壤温度低于 8°C 时，启动太阳能热补偿。太阳能集热器将蓄热水箱水加热至

53°C ，通过地埋管系统向土壤定向补热；蓄热水箱可在集热不足时释热，避免热泵能效下降，实现太阳能热补偿协同机制。

夏季制冷工况流程：室内热空气经风机盘管与冷冻水换热降温除湿，吸热后的冷冻水在热泵蒸发器内将热量传递给制冷剂，制冷剂经压缩后在冷凝器中由地埋管循环水冷却，地埋管循环水将热量释放至土壤后回流完成循环^[13]。

夏季太阳能集热器加热的水通过专用管路导入地埋管，对土壤额外热补偿。自动控制模块以土壤温度维持 $15 \sim 25^{\circ}\text{C}$ 为目标动态调节太阳能热补偿量，确保夏季土壤蓄热量大于冬季释热量^[14]，实现太阳能热补偿协同机制。

自动控制模块依据设定的室内温度（ $25 \sim 28^{\circ}\text{C}$ ）与相对湿度（ $60\% \sim 80\%$ ）参数，联动调节热泵变频速率、风机盘管风速及太阳能热补偿侧运行状态，实现温湿度协同精准控制。

1.3 关键部件设计与计算

1.3.1 温室负荷计算

采用稳态计算方法，结合北京当地气象参数、温

室围护结构热阻、通风热损失及作物呼吸热^[15], 计算温室负荷。

冬季热负荷和夏季冷负荷计算式为

$$Q_h = K_0 F_0 (t_n - t_w) + L \rho C_p (t_n - t_w) - Q_p - Q_{cr} \quad (1)$$

$$Q_c = K_0 F_0 (t_w - t_n) + G_s + Q_p + Q_{cr} \quad (2)$$

式中 Q_h ——冬季热负荷, kW

Q_c ——夏季冷负荷, kW

K_0 ——围护结构综合传热系数, W/(m²·K)

F_0 ——围护结构总传热面积, m²

t_n ——室内设计温度, °C, 冬季取夜间低温下限 16°C (与设计目标中夜间温度要求一致, 作为最不利工况设计基准值), 夏季取白天上限 28°C

t_w ——室外设计温度, °C

L ——冷风渗透量, m³/s

ρ ——空气密度, kg/m³

C_p ——空气定压比热容, kJ/(kg·K)

G_s ——太阳辐射热量, kW

Q_p ——室内设备散热量, kW

Q_{cr} ——作物呼吸散热量, kW

冬季负荷为建筑失热过程, 所有内部热源 (设备散热、作物呼吸) 均有利于降低热负荷, 在式(1)中作为减项; 而夏季负荷为建筑得热过程, 所有由外界传入 (太阳辐射) 或内部产生的热量均构成负荷, 在式(2)中作为加项。

(1) 冬季总热负荷 Q_h 估算

①围护结构传热量。双层中空玻璃 K_0 取 2.8 W/(m²·K); F_0 含屋面、侧墙, 温室面积约 11 000 m², 传热面积约 22 000 m²; t_n 取冬季夜间设计下限 16°C; t_w 取 -9°C (北京冬季设计温度)。按式(1)第 1 项计算得围护结构传热量为 1 540 kW。

②冷风渗透耗热量。依据《蔬菜夜蛾类害虫抗药性监测技术规程》(NY/T 2361—2013), 本试验温室为三级密闭性连栋玻璃温室, 冬季室外平均风速 2.5 m/s 条件下, 换气次数取 0.7 次/h (取值为规范中同类型温室推荐值)。温室容积约 60 000 m³, 则冷风渗透量 L 约为 11.7 m³/s。 ρ 取 1.2 kg/m³, C_p 取 1.005 kJ/(kg·K) $\approx$ 1 005 J/(kg·K), 按式(1)中第 2 项计算冷风渗透耗热约为 353 kW。

③内部热源 Q_p 与 Q_{cr} 。 Q_p 主要包括环流风机、补光灯、灌溉泵耗热量等。非全天最大功率运行, 估算平均值约为 10 W/m², 则室内设备耗热量 Q_p 为 110 kW。 Q_{cr} 为茂密作物冠层 (如番茄、黄瓜) 的呼吸热, 约 15 W/m², 则 Q_{cr} 为 165 kW。 Q_p 与 Q_c 合计为 275 kW。

冬季总热负荷 Q_h 约为 1 618 kW。

(2) 夏季总冷负荷 Q_c 估算

①围护结构传热量。 t_w 取北京夏季空调室外计算温度 33.5°C, t_n 取室内白天设计温度 28°C, 则围护结构传热量约为 339 kW。

②太阳辐射热量。北京夏季中午太阳总辐射强度为 800 ~ 900 W/m², 玻璃透射率 0.6 ~ 0.7, 本试验温室外遮阳幕每日 09:00—17:00 开启 (遮阳率 50%), 太阳高度角日变化及玻璃透射率光谱特性对辐射热的影响已通过综合透射系数 0.3 进行折算, 最终有效热量取 300 W/m² 地面积作为峰值。

本计算未单独区分遮阳幕开启时段、太阳高度角逐时变化及透射率光谱差异, 仅采用峰值折算, G_s 为 3 300 kW。

③内部热源 Q_p 与 Q_{cr} 。夏季设备运行频繁, 估算平均值取 15 W/m², 则 Q_p 为 165 kW、 Q_{cr} 取 165 kW, Q_p 与 Q_c 合计为 330 kW。

夏季总冷负荷 Q_c 约为 3 969 kW。

1.3.2 地埋管换热器

(1) 地埋管换热器计算

选用垂直双 U 形地埋管 (DN32PE100 型), 钻孔深度 120 m。依据现行地源热泵系统工程技术标准, 采用单位孔深换热量法估算钻孔数量 N 计算式为

$$N = \frac{Q_{\max} S_f}{qH} \quad (3)$$

式中 $Q_{\max}$ ——最大负荷, 取夏季制冷负荷 3 969 kW
 S_f ——安全系数, 取 1.2
 q ——岩土平均单位孔深换热量, 取 50 W/m
 H ——钻孔深度, 取 120 m

计算得 N 约为 794 孔, 为保证长期土壤热平衡, 结合太阳能热补偿效果, 取 800 孔。

(2) 布置与施工

地埋管区域布置于温室外围空地。采用梅花形布置, 孔间距为 4.5 m^[16], 总占地面积约 12 000 m² (约 1.8 hm²)。施工质量指标均符合规范要求, 如表 1 所示。施工采用垂直 U 形地埋管, 布置如图 2 所示。

根据地勘资料, 当地土壤初始平均温度约为 15°C^[18]。管材采用高密度聚乙烯 (PE100 型), 公称外径 DE32, 承压等级 SDR11。钻孔完毕后, 采用专用回填材料进行回填。埋管深度越深对土壤地面温度影响越小^[19]。

1.3.3 热泵主机选型

选用变频式水-水地源热泵机组适配温室负荷动态变化。冬季制热工况地源侧进水 10°C, 用户侧

表 1 地埋管施工质量指标

Tab. 1 Quality control indicators for buried pipeline construction

检测项目	标准值	实测均值	检测方法
钻孔垂直度/%	≤1	0.7	测斜仪 热线法
回填材料导热系数 /(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	≥1.5	1.72	(GB/T 10297 非金 属固体材料导热系 数的测定 ^[17])
水压试验	1.5 倍工作压力, 保压 24 h 无渗漏	合格	保压 24 h 测试
埋管间距偏差/m	≤±0.2	±0.12	激光测距仪

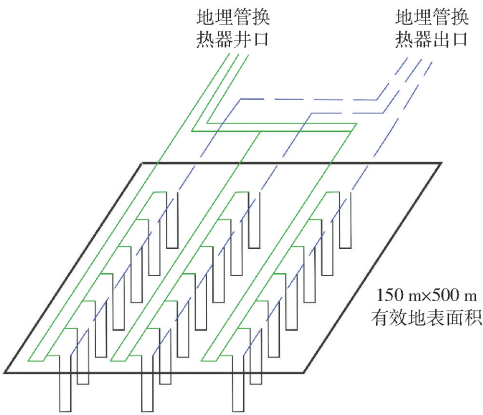


图 2 垂直 U 形地埋管换热器示意图

Fig. 2 Schematic of vertical U-type ground heat exchanger

出水 35℃;夏季制冷工况地源侧进水 25℃,用户侧出水 18℃;冬季热泵机组所需制热功率计算式为

$$Q_{HP} = \frac{Q_h}{COP} \tag{4}$$

式中 Q_{HP} ——热泵主机制热功率,kW
 COP ——设计制热能效比,取 4.5

计算得 Q_{HP} 约 359.5 kW。考虑负荷冗余,选峰值负荷的 1.2 倍,即 431.4 kW,选用 2 台额定功率 220 kW 的螺杆式变频水-水地源热泵机组,如图 3 所示,配备变频循环水泵(15 kW/台)。

1.3.4 室内末端及复合散热系统设计

室内末端采用分布式风机盘管系统^[20],选用 40 台吊顶式四出风风机盘管,均匀吊装于温室桁架下,覆盖整个栽培区域。

复合散热系统采用侧墙对流散热器模式,负责整体空间供暖;侧墙对流散热器安装于温室两侧立柱,间距 5 m,针对作物冠层区域精准补温。散热系统供水/回水温度 35~45℃,通过温控阀实现分区温度调节^[21]。

1.3.5 太阳能热补偿侧设计

太阳能热水系统具有清洁、安全、经济等优势,已成为最广泛的热水供应方式^[22],为实现土壤热平衡精准调控,太阳能热补偿侧采用“集热器+蓄热

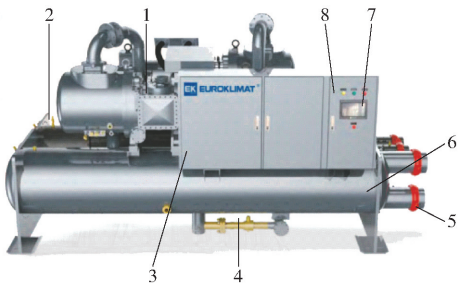


图 3 螺杆式地源热泵机组

Fig. 3 Rendering of screw-type ground-source heat pump unit

1. 螺杆式压缩机 2. 满液式蒸发器 3. 电控柜 4. 电子膨胀阀
5. 进出水口卡箍连接 6. 高效冷凝器 7. 寸触摸屏 8. 计算机控制系统

水箱”双模块设计,太阳能集热器面积 180 m²,安装于温室顶部,选用高效平板集热器(瞬时效率 ≥ 0.75);蓄热水箱容积 45 m³,与地埋管系统并联连接,配备保温层(导热系数不大于 0.03 W/(m²·K))减少热量损失,使土壤年吸热量与散热量差值控制在 5% 以内,维持土壤温度稳定^[23]。

太阳能集热器有效集热量 Q_s 计算式为

$$Q_s = A_c \eta_c G - U_c A_c (t_f - t_a) \tag{5}$$

- 式中 A_c ——集热器面积,m²
 η_c ——集热器瞬时效率
 G ——太阳辐照度,W/m²
 U_c ——集热器总热损系数,W/(m²·K)
 t_f ——集热器内流体平均温度,℃
 t_a ——室外空气温度,℃

式(5)用于精准计算太阳能集热器的实际有效集热量,可直观区分集热得热与散热损失,为太阳能热补偿量核算、系统运行调控及土壤热平衡维持提供量化依据,确保系统长期运行时土壤热失衡系数 ≤ 10%。

1.4 测试仪器与试验方案

1.4.1 测试仪器

温室内设置 15 个铂电阻温度传感器(精度 ±0.1℃)布置于作物冠层、中层空间及顶层空间;土壤温度传感器埋深 0.5、2、5、10、20、50、80 m,每口埋管井布置 1 组;同步监测室外、地源侧、用户侧及太阳能热补偿侧循环水温度。安装三相电能表,记录实时耗电量,单独统计太阳能热补偿侧能耗。通过数据采集器 CR1000 每 10 min 记录 1 次数据,计算系统制热能效比 COP、系统制冷能效比(Energy efficiency ratio,EER)、太阳能热补偿效率及土壤热失衡系数等指标。

1.4.2 试验方案

试验时间为 2024 年 11 月—2025 年 11 月,分为

冬季供暖期(11月—次年3月)和夏季制冷期(6月—8月),设置3组工况,各工况连续运行整个供暖/制冷季,选取典型15 d进行精细化监测。工况1为地源热泵单独运行(无太阳能热补偿、冬夏两季全季运行);工况2为地源热泵+太阳能热补偿协同运行(核心试验工况);工况3为冬季采用传统燃煤锅炉供暖,夏季采用风机湿帘降温。

每组工况全季连续监测系统能耗、温室温湿度及土壤温度变化;典型周重点监测太阳能热补偿侧的集热量、太阳能热补偿量及对土壤温度调控效果;全年连续监测不同深度土壤温度,分析太阳能热补偿对土壤热平衡的调控效果;番茄生长指标采用3次重复、每重复30株抽样方法,定期测量株高、茎粗、叶面积及产量,采用t检验进行差异显著性分析。

1.5 评价指标与计算

为科学评价系统性能,定义以下关键指标及其计算方法,明确各指标应用场景和计算边界,确保计算逻辑一致。结合冬季典型周(2025年1月8—14日)和夏季典型周(2025年7月15—21日)实测数据,计算核心指标。

1.5.1 系统制热能效比

根据供暖侧循环水进出口温度、流量及系统总耗电量,系统制热能效比COP^[24]计算式为

$$COP = \frac{V\rho_1 C\Delta T_h}{W_{total,h}} \tag{6}$$

其中
$$\Delta T_h = \frac{\sum_{i=1}^n (T_{in,h,i} - T_{out,h,i})}{n} \tag{7}$$

$$W_{total,h} = 3\,600(P_{hp,h} + P_{pump,h} + P_{aux,h}) \tag{8}$$

式中 V ——供暖侧循环水流量, m^3/h
 ρ_1 ——水的密度,取 $1\,000\text{ kg}/\text{m}^3$
 C ——水的比热容,取 $4.2\text{ kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$
 ΔT_h ——供暖侧循环水进出口平均温差, $^\circ\text{C}$
 $T_{in,h,i}$ ——第 i 次实测供暖侧进水温度, $^\circ\text{C}$
 $T_{out,h,i}$ ——第 i 次实测供暖侧出水温度, $^\circ\text{C}$
 n ——实测次数,按 $10\text{ min}/\text{次}$,典型周 7 d 累计 864 次

$W_{total,h}$ ——制热工况下系统总耗电量, kJ/h
 $P_{hp,h}$ ——热泵主机制热运行输入功率, kW
 $P_{pump,h}$ ——供暖侧循环泵功率,取 15 kW
 $P_{aux,h}$ ——辅助设备制热工况功率,取 4.8 kW

1.5.2 系统制冷能效比

系统制冷能效比EER,根据制冷侧循环水参数及系统总耗电量计算式为

$$EER = \frac{Q_c}{W_{total,c}} \tag{9}$$

其中
$$Q_c = V_c\rho C\Delta T_c \tag{10}$$

$$\Delta T_c = \frac{\sum_{i=1}^n (T_{out,c,i} - T_{in,c,i})}{n} \tag{11}$$

$$W_{total,c} = 3\,600(P_{hp,c} + P_{pump,c} + P_{aux,c}) \tag{12}$$

式中 V_c ——制冷侧循环水流量,取 $38.2\text{ m}^3/\text{h}$
 ΔT_c ——制冷侧循环水进出口平均温差, $^\circ\text{C}$
 $T_{in,c,i}$ ——第 i 次实测制冷侧进水温度, $^\circ\text{C}$
 $T_{out,c,i}$ ——第 i 次测试制冷侧出水温度, $^\circ\text{C}$
 $W_{total,c}$ ——制冷工况下系统总耗电量, kJ/h
 $P_{hp,c}$ ——热泵主机制冷功率,取 11.4 kW
 $P_{pump,c}$ ——制冷侧循环泵功率,取 15 kW
 $P_{aux,c}$ ——辅助设备制冷工况功率,取 3.6 kW

1.5.3 节能率

传统系统与地源热泵系统总能耗(E_{trad} 、 E_{new})分别为冬、夏季能耗之和,计算式为

$$E_{trad} = E_{trad,h} + E_{trad,c} \tag{13}$$

$$E_{new} = E_{new,h} + E_{new,c} \tag{14}$$

式中 $E_{trad,h}$ ——传统系统冬季供暖能耗, kW
 $E_{trad,c}$ ——传统系统夏季制冷能耗, kW
 $E_{new,h}$ ——高效地源热泵系统冬季供暖能耗, kW
 $E_{new,c}$ ——高效地源热泵系统夏季制冷能耗, kW

通过试验实测能耗 $E_{trad,h}$ 为 518.58 kW 、 $E_{new,h}$ 为 210.17 kW 、 $E_{trad,c}$ 为 356.40 kW 和 $E_{new,c}$ 为 195.80 kW 。

节能率用于评价高效地源热泵系统相较于传统供暖/制冷系统的能耗优势,以相同运行周期、相同环境工况下的能耗数据为计算基准。系统节能率ESR计算式为

$$ESR = \frac{E_{trad} - E_{new}}{E_{trad}} \times 100\% \tag{15}$$

综合节能率ESRZ(按运行时间加权)计算式为
$$ESRZ = \frac{t_h(E_{trad,h} - E_{new,h}) + t_c(E_{trad,c} - E_{new,c})}{t_h E_{trad,h} + t_c E_{trad,c}} \times 100\% \tag{16}$$

式中 t_h ——冬季供暖时长,取 $1\,200\text{ h}$
 t_c ——夏季制冷时长,取 $1\,000\text{ h}$

代入数据计算得冬季供暖节能率约为 59.5% 、夏季制冷节能率约为 45.1% 、综合节能率约为 54.2% 。

1.5.4 温度波动系数

温度波动系数TFC反映温室内温度的稳定性,是评价能源系统供热/制冷均匀性的重要指标,数值越小表示温度稳定性越好,采用统计学方法量化,计算式为

$$TFC = \frac{\sigma_T}{T_s} \times 100\%$$
 (17)

其中

$$\sigma_T = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_i - T_s)^2}{n - 1}}$$
 (18)

式中 σ_T ——温室内温度标准差,℃
 T_i ——第 i 次实测室内温度,℃
 T_s ——温室内平均温度,℃

典型周共采集 864 组数据,室内温度实测范围为 20.2 ~ 22.8℃,工况 2 温室内平均温度为 21.5℃。

按式(18)计算得温室内温度标准差 σ_T 为 0.76℃,按式(17)计算得温度波动系数为 3.53%。

1.5.5 太阳能热补偿核心指标

(1)太阳能热补偿效率评价太阳能热补偿侧自集热性能,为集热器的实际有效集热量与理论集热量的比值。

(2)太阳能补热贡献率评价太阳能热补偿对土壤热平衡的调控作用,为太阳能热补偿量与土壤总吸热量的比值。

(3)土壤热失衡系数反映土壤热平衡状态,为全年土壤净失热量与总放热量比值的绝对值。

2 结果与分析

2.1 冬季供暖性能

选取典型周(1月8—14日)室外平均温度-5℃进行测试,分析太阳能热补偿对供暖性能的提升作用。系统运行设定3种工况得到各种工况试验结果。

工况1(无太阳能热补偿):室内平均温度20.8℃,温度波动系数6.5%,系统平均制热能效比为5.7,单位面积供暖能耗26.8kW·h/(m²·季);工况2(热泵+太阳能热补偿):室内平均温度21.5℃,波动系数5.9%,温度波动幅度≤±1.3℃,满足波动不大于±1.5℃的试验要求,系统平均制热能效比最高提至6.1,单位面积能耗降至22.6kW·h/(m²·季),太阳能热补偿效率达72.3%,太阳能热补偿贡献率为30.5%;工况3(燃煤供暖):室内平均温度20.5℃,波动系数12.3%,单位面积能耗56.2kW·h/(m²·季)(折标煤)。

冬季典型周系统制热能效比日变化曲线,如图4所示。由图4可知,午间(12:00—16:00)太阳辐射充足,太阳能热补偿侧有效补偿,热泵运行负荷降低。工况1系统制热能效比达到5.9~6.1峰值区间,全周期平均制热能效比COP达5.7;工况2平均制热能效比较热泵单独运行工况1提升约

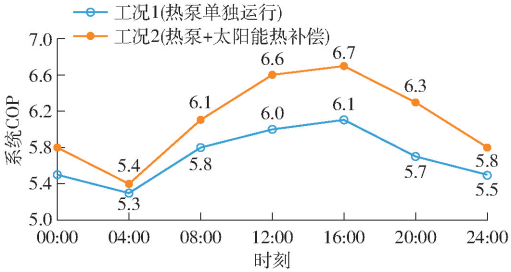


图 4 冬季典型周系统 COP 日变化曲线
Fig. 4 Daily variation curves of system COP for a typical winter week

7.0%。COP 波动特征与番茄生长温度需求相匹配,既保证了供暖稳定性(波动系数5.9%),又通过太阳能与热泵协同运行实现了能效优化。

高效地源热泵系统较传统燃煤供暖节能67.6%,太阳能热补偿使系统平均COP提升7.0%,温度调控精度显著提高,满足番茄生长对温度稳定性的要求[25]。

2.2 夏季制冷性能

选取典型周(7月15—21日)室外平均温度32℃进行分析,分析太阳能热补偿对制冷性能及土壤补热的影响。

工况1(无太阳能补偿):室内平均温度27.2℃,温度波动系数5.8%,系统平均制冷能效比为6.5,单位面积制冷能耗23.6kW·h/(m²·季);工况2(热泵+太阳能热补偿):室内平均温度26.7℃,温度波动系数4.5%,系统平均制冷能效比(EER)为7.0,单位面积制冷能耗17.8kW·h/(m²·季),太阳能热补偿效率达78.5%,夏季太阳能热补偿量占总吸热量的39.2%;工况3(传统风机湿帘系统):室内平均温度29.8℃,温度波动系数8.4%,单位面积能耗32.4kW·h/(m²·季)。

夏季典型周系统制冷能效比日变化曲线,如图5所示。由图5可知,10:00—16:00太阳辐射度充足(500~820W/m²),太阳能热补偿与光伏直驱、间接蒸发冷却系统作用,系统制冷能效比EER升至

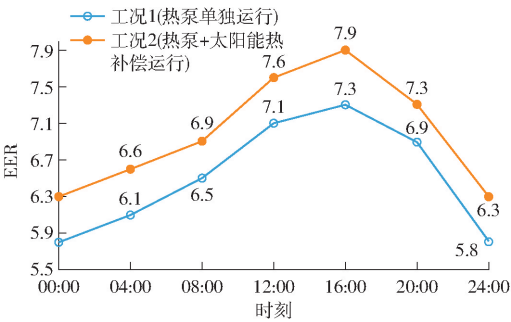


图 5 夏季典型周系统 EER 日变化曲线
Fig. 5 Daily variation curves of system EER for a typical summer week

6.8~7.0 的峰值区间,全天制冷能效比 EER 稳定在 6.6~7.0 之间,全周期平均制冷能效比 EER 为 7.0。表明太阳能热补偿不仅实现土壤补热,还通过能量协同提升了制冷能效^[26]。

高效地源热泵系统相较于传统风机湿帘系统节能 55.9%,相较于地源热泵单独运行系统节能 24.3%,太阳能热补偿使系统 EER 提升 7.7%,温度

调控精度与能效水平均显著优于传统系统,完全满足番茄膨果期对温湿度稳定性的严苛要求。

2.3 太阳能热补偿对土壤热平衡的调控效果分析
为明确太阳能热补偿对土壤热平衡的调控作用及优化效果,结合前文搭建的试验系统与测试参数,采用热流密度平衡法量化系统热收支情况,如表 2 所示。

表 2 热平衡量化计算与失衡系数
Tab.2 Quantitative calculation of heat balance and imbalance coefficient

参数	工况 1	工况 2	结论
冬季土壤放热强度/(W·m ⁻²)	42.3	42.3	工况 1、2 冬季放热强度相同,保证对比基准统一
夏季地埋管回灌热量(基础)/(W·m ⁻²)	28.7	28.7	工况 2 在基础回灌量上增加太阳能补热
夏秋季太阳能热补偿额外强度/(W·m ⁻²)	0	18.5	工况 2 通过太阳能实现主动补热,提升土壤热量储备
夏季总回灌热量/(W·m ⁻²)	28.7	47.2	工况 2 总回灌热量较工况 1 提升 64.46%
年净失热量/(kJ·m ⁻²)	5.2×10 ⁶	1.1×10 ⁶	工况 2 年净失热量大幅降低,仅为工况 1 的 21.15%
热失衡系数(净失热量/总放热量)/%	40.9	8.7	工况 2 热失衡系数较工况 1 降低 78.7%,热平衡状态显著优化
深层土壤冷累积速率(基于热扩散系数 8.6×10 ⁻⁷ m ² /s)/(℃·年 ⁻¹)	0.3~0.5	<0.05	工况 2 有效抑制冷累积,速率仅为工况 1 的 10%~16.67%
深层土壤温度突破设计阈值(8℃)时间预判/年	5	无明确突破风险 (冷累积速率极低)	工况 2 大幅提升系统温度稳定性
热平衡维持年限/年	6~8	>25	工况 2 热平衡维持年限延长 3~4 倍,显著提升地埋管换热系统长期稳定性

由表 2 可知,太阳能热补偿显著优化了土壤热平衡状态,工况 2 夏季总回灌热量为 47.2 W/m²,较工况 1(28.7 W/m²)提升 64.46%,其中太阳能热补偿额外强度达 18.5 W/m²;工况 2 年净失热量 1.1×10⁶ kJ/m²,仅为工况 1(5.2×10⁶ kJ/m²)的 21.15%;工况 2 土壤热失衡系数为 8.7%,较工况 1(40.90%)降低 78.7%,满足本研究设定的土壤热失衡系数≤10%的设计目标。

工况 2 深层土壤冷累积速率≤0.05℃/年,仅为工况 1(0.3~0.5℃/年)的 10%~16.67%,无明确温度突破设计阈值(8℃)风险,系统热平衡维持年限延长至 25 年以上,较工况 1 提升 3~4 倍。

全年连续监测数据表明,通过动态调节太阳能热补偿强度,可精准控制换热核心区 80 m 深层土壤的热量收支,将该深度土壤年温度变化幅度稳定控制在 4.4~5.9℃,有效避免土壤温度剧烈波动对地埋管换热性能的影响,保障地源热泵系统长期稳定运行。

结果表明,太阳能热补偿通过主动热补偿实现了土壤热收支平衡的精准调控,破解了单一地源热泵长期运行的土壤热失衡难题。

2.4 作物生长与产量影响分析

试验期间全程种植番茄品种“中杂 105”,系统营造的冬季日间 18~25℃、夜间不低于 16℃,夏季

温度低于 28℃、相对湿度 65%~75% 的稳定环境,契合番茄生长发育需求。经 3 次重复抽样测定,与传统“燃煤+风机湿帘”调控模式相比,本系统下番茄单株产量提升 19.4%,经 t 检验分析差异达到显著水平(P<0.05),同时番茄果实均匀度、可溶性固形物含量等品质指标同步优化,实现设施作物优质高产。

2.5 系统经济性分析

为量化高效地源热泵集成系统与传统“燃气锅炉(冬季)+风机湿帘(夏季)”系统的经济差异,以某农场 2 座面积相近(11 000 m²)的 Venlo 型玻璃连栋温室作为分析对象,从初始投资、年度运行费用、节能效益及投资回收周期等维度分析,结果如表 3 所示。

由表 3 可知,高效地源热泵系统初始投资虽较传统系统高 46.2%,但凭借冬夏两季显著的能耗优势(冬季节能 67.0%、夏季节能 45.1%),年度运行费用大幅降低。扣除维护成本后,年均净节省费用达 28.93 万元,静态投资回收期为 5.89 年,系统单位面积运行成本降至 10.8 元/(m²·季),具有显著的经济效益与规模效益。

3 结论

(1)研发的基于太阳能热补偿的连栋温室高效

表 3 高效地源热泵系统与传统调控系统经济性分析

Tab.3 Economic analysis of high-efficiency ground source heat pump system and traditional control system				
评价指标	高效地源热泵系统	传统“燃气锅炉+风机湿帘”系统	差值	差值率/%
温室面积/m ²	11 000	11 000	0	0
系统初始投资/万元	170.50(155 元/m ² × 11 000 m ² , 含地埋管、变频机组、太阳能热补偿模块)	116.60(燃气锅炉 85 万元 + 风机湿帘 31.6 万元, 含安装调试费) + 70.40 万元(+ 60.4%)	53.9	46.2
冬季供暖能耗/(kW·h·m ⁻² ·季 ⁻¹)	22.6(工况 2, 含太阳能热补偿辅助能耗)	68.5(燃气锅炉, 按燃气热值折电当量值: 1 m ³ 燃气 ≈ 8.6 kW·h, 燃气耗量 8.0 m ³ /(100 m ² ·天))	-45.9	-67.0
夏季制冷能耗/(kW·h·m ⁻² ·季 ⁻¹)	17.8(含地源侧循环泵、风机盘管能耗)	32.4(风机湿帘 + 循环水泵 + 风机能耗)	-14.6	-45.1
年度总能耗/(kW·h)	444 400(22.6 × 11 000 + 17.8 × 11 000)	1 109 900(68.5 × 11 000 + 32.4 × 11 000)	-665 500	-60.0
年度用煤量/t 标煤	54.62	136.41	-81.8	-60.0
系统年均维护费/万元	11.40(初始投资 170.50 万元 × 6.7% ^①)	3.73(初始投资 116.60 万元 × 3.2% ^②)	7.67	205.6

注:①高效地源热泵系统维护费率参考《农业建设项目经济评价方法与参数》中可再生能源农业设施的维护费率区间(6%~8%),结合本系统设备组成取中值 6.7%。②传统系统维护费率参考该规范中常规农业设施的维护费率区间(2%~4%),结合传统设备组成取中值 3.2%。能源单价采用北京市农业生产用电 2024—2025 年度执行标准 0.55 元/(kW·h)。

地源热泵集成系统,实现了冬夏两季温室环境的精准高效调控。冬季室外平均温度 -5℃时系统制热能效比 COP 最高达 6.1,室内温度波动不大于 ±1.5℃,夏季室外平均温度 32℃时制冷能效比(EER)达 7.0,较传统“燃煤+风机湿帘”模式综合节能率 54.2%,单位面积运行成本降至 10.8 元/(m²·季),为设施农业能源系统升级提供了成套技术方案,具有工程应用价值。

(2)构建太阳能主动热补偿机制,实现了土壤热收支平衡的精准量化调控,通过动态调节热补偿强度使换热核心区 80 m 深层土壤年温度变化幅度控制在 4.4~5.9℃,热失衡系数降至 8.7%,深层土

壤冷累积速率≤0.05℃/年,土壤热平衡维持年限延长至 25 年以上,破解了北方寒冷地区地源热泵长期运行引发的土壤热失衡行业难题,为地源热泵在寒冷地区农业设施的规模化应用奠定技术基础。

(3)系统营造的稳定温湿度环境契合喜温作物生长需求,冬季日间 18~25℃、夜间不低于 16℃,夏季温度低于 26.7℃、相对湿度 65%~75%的条件,使番茄单株产量较传统调控模式提升 19.4%($P < 0.05$);系统虽初始投资较传统系统高 46.2%,但年均净节省费用 28.93 万元,静态投资回收期为 5.89 年,实现了设施农业“节能调控”与“优质高产”的协同发展。

参 考 文 献

[1] 张东,姜钰湛,李浩然,等.设施农业可再生能源综合供能系统运行策略[J].农业工程学报,2023,39(24):264-277.
Zhang Dong,Jiang Yuzhan,Li Haoran,et al. Operation strategy of renewable energy integrated energy supply system for facility agriculture[J]. Transactions of the CSAE,2023,39(24):264-277. (in Chinese)

[2] Han J Y,Cui M H,Chen J Y,et al. Analysis of thermal performance and economy of ground source heat pump system: a case study of the large building[J]. Geothermics,2021,89:101929.

[3] 王前线.地源热泵系统运行分析[J].上海电气技术,2024,17(1):5-7.

[4] Ma J L,Fung A S,Brands M,et al. Effects of photovoltaic/thermal (PV/T) control strategies on the performance of liquid-based PV/T assisted heat pump for space heating[J]. Renewable Energy,2021,172:753-764.

[5] Liang R,Wang C,Wang P,et al. Performance modeling and analysis of a PVT-HP system with the roll-bond plate as the evaporator during winter conditions[J]. Applied Thermal Engineering,2023,224:120102.

[6] 石惠娴,安文婷,徐得天,等.蓄能型地源热泵式植物工厂供能系统节能运行调控[J].农业工程学报,2020,36(1):245-251.
Shi Huixian,An Wenting,Xu Detian,et al. Energy-saving operation control of energy storage ground source heat pump energy supply system for plant factory[J]. Transactions of the CSAE,2020,36(1):245-251. (in Chinese)

[7] 李江辉,陈颖,朱逸飞,等.严寒地区太阳能-土壤源热泵复合系统运行特性研究[J].建筑节能(中英文),2024,52(8):18-25.
Li Jianghui,Chen Ying,Zhu Yifei,et al. Operation characteristics of solar-ground source heat pump composite system in severe cold regions[J]. Building Energy Efficiency,2024,52(8):18-25. (in Chinese)

[8] 李鹏,李杭哲,杨超,等.套管式埋管换热器换热性能数值模拟[J].地质科技通报,2025,44(3):1-10.
Li Peng,Li Hangzhe,Yang Chao,et al. Numerical simulation on heat transfer performance of coaxial buried tube heat exchanger [J]. Bulletin of Geological Science and Technology,2025,44(3):1-10. (in Chinese)

[9] Park J H,Choi J H,Kim S D. Thermal performance evaluation of solar-ground source hybrid heat pump system for agricultural

greenhouse[J]. Journal of Thermal Science,2021,30(3):892-902.

[10] 陈实,阴继翔,乔鹏飞,等. 渗流条件下双 U 型地埋管换热器换热特性的数值研究[J]. 可再生能源,2025,43(5):620-628.
Chen Shi, Yin Jixiang, Qiao Pengfei, et al. Numerical study on heat transfer characteristics of double U-tube ground heat exchanger under seepage condition[J]. Renewable Energy Resources,2025,43(5):620-628. (in Chinese)

[11] 秦琳琳,陆林箭,石春,等. 基于物联网的温室智能监控系统设计[J]. 农业机械学报,2015,46(3):261-267.
Qin Linlin, Lu Linjian, Shi Chun, et al. Design of intelligent greenhouse monitoring system based on internet of things[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(3):261-267. (in Chinese)

[12] 王亚斌. 水源热泵技术在煤矿中的应用[J]. 能源与节能,2020(8):60-61.
Wang Yabin. Application of water source heat pump technology in coal mine[J]. Energy and Energy Conservation,2020(8):60-61. (in Chinese)

[13] 单卓. 水源热泵技术在暖通工程中的应用[J]. 中阿科技论坛(中英文),2022(4):89-92.
Shan Zhuo. Application of water source heat pump technology in HVAC engineering[J]. China-Arab States Science and Technology Forum,2022(4):89-92. (in Chinese)

[14] 于涛,王冬菊,王英华. 寒冷地区日光温室水平地埋管蓄热效果研究[J]. 农机化研究,2022,44(3):248-258.
Yu Tao, Wang Dongju, Wang Yinghua. Study on heat storage effect of horizontal ground heat exchanger in solar greenhouse in cold regions[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2022,44(3):248-258. (in Chinese)

[15] 张维政,郭延隆,潘玉杰,等. 玻璃温室供暖热负荷计算及影响因素[J]. 青岛农业大学学报(自然科学版),2023,40(1):62-67.
Zhang Weizheng, Guo Yanlong, Pan Yujie, et al. Calculation and influencing factors of heating load in glass greenhouse[J]. Journal of Qingdao Agricultural University (Natural Science Edition),2023,40(1):62-67. (in Chinese)

[16] 李露茜,廖全,刘贤燕,等. 竖直单 U 型地埋管换热器埋管间负热阻现象的参数化研究与分析[J]. 太阳能学报,2024,45(3):210-216.
Li Luqian, Liao Quan, Liu Xianyan, et al. Parametric study and analysis of negative thermal resistance between vertical single U-tube ground heat exchangers[J]. Acta Energaie Solaris Sinica,2024,45(3):210-216. (in Chinese)

[17] GB/T 10297—2015 非金属固体材料导热系数的测定 热线法[S].

[18] 张伟兵,鲁杰,吴凯,等. 水平及垂直地埋管换热器热响应试验研究[J]. 太阳能学报,2026,47(2):654-661.
Zhang Weibing, Lu Jie, Wu Kai, et al. Experimental study on thermal response of horizontal and vertical ground heat exchangers[J]. Acta Energaie Solaris Sinica,2026,47(2):654-661. (in Chinese)

[19] 甄琦,杜嘉玮,塔娜. 温室传热水道与土壤换热强度影响的数值分析[J]. 农机化研究,2024,46(9):257-263.
Zeng Qi, Du Jiawei, Ta Na. Numerical analysis of influence of greenhouse heat transfer channel on soil heat transfer intensity[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2024,46(9):257-263. (in Chinese)

[20] 董菲菲. 风机盘管系统分布式模型预测控制研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2024.
Dong Feifei. Research on distributed model predictive control of fan coil unit system[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology,2024. (in Chinese)

[21] 艾则麦提·图尔洪,刘娜,买买提阿不都拉·艾则孜. 日光温室集散热增温蓄热系统的优化与试验研究[J]. 农机化研究,2023,45(2):178-183.
Azimat T, Liu Na, Mamatabdulla A. Optimization and experimental study of heat collection, dissipation, heating and storage system for solar greenhouse[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2023,45(2):178-183. (in Chinese)

[22] 金一鹏,郑志行,周晋,等. 太阳能空气源热泵热水系统的经济性和低碳性优化研究[J]. 建筑科学,2025,41(6):118-126.
Jin Yipeng, Zheng Zhihang, Zhou Jin, et al. Optimization of economy and low-carbon performance of solar air source heat pump hot water system[J]. Building Science,2025,41(6):118-126. (in Chinese)

[23] 张长兴,徐航,鲁伟辉,等. 太阳能 PV/T 集热器耦合土壤源热泵复合系统运行特性[J]. 农业工程学报,2021,37(12):215-222.
Zhang Changxing, Xu Hang, Lu Jiahui, et al. Operation characteristics of solar PV/T collector coupled ground source heat pump composite system[J]. Transactions of the CSAE,2021,37(12):215-222. (in Chinese)

[24] 陈同强,徐凤娇,周宝昌,等. 天然气锅炉和地源热泵协同加热连栋玻璃温室的可行性分析[J]. 浙江农业学报,2025,37(7):1533-1544.
Chen Tongqiang, Xu Fengjiao, Zhou Baochang, et al. Feasibility analysis of cooperative heating of multi-span glass greenhouse by natural gas boiler and ground source heat pump[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis,2025,37(7):1533-1544. (in Chinese)

[25] 杨绪飞,李飞,孙东亮,等. 温室太阳能跨季节蓄热-土壤源热泵耦合供暖运行特性[J]. 农业工程学报,2024,40(19):186-196.
Yang Xufei, Li Fei, Sun Dongliang, et al. Operation characteristics of greenhouse solar seasonal heat storage-ground source heat pump coupled heating system[J]. Transactions of the CSAE,2024,40(19):186-196. (in Chinese)

[26] 刘锋,丁锦宏,李冠新. 地源热泵制冷系统 Trnsys 模拟分析[J]. 节能,2025(11):11-14.
Liu Feng, Ding Jinhong, Li Guanxin. Trnsys simulation analysis of ground source heat pump refrigeration system[J]. Energy Conservation,2025(11):11-14. (in Chinese)