文章编号：1008－8857(2026)03－0156－07 **DOI**: 10.13259/j.cnki.eri.2026.03.004

地源热泵复合式可再生能源供热应用节能环保效益分析

周玉洁[1]，李洪东[2]
（1. 北京市工程咨询股份有限公司，北京 100124；2. 新源泰利能源科技(北京)有限公司，北京 102400）

摘 要：以北京市某科技产业园为研究对象，对园区周边地热能，数据中心余热及燃气、电力、热网等资源条件进行了评估。综合考虑建筑冷热负荷，提出了采用“地源热泵＋空气源热泵＋余热热泵”复合式能源系统、数据中心余热回收、冷水机组＋燃气锅炉系统 3 种方案来满足全部建筑供暖需求，分析了各方案供能优缺点，阐述了该复合式能源系统运行原理及设备配置情况，并计算了其运行费用、内部收益率及投资回收期等经济性指标以及节煤、节电、减碳、减排等环保性指标。结果表明，该复合式能源系统单位面积能耗约为 4.22 kgec/m^2，可减少能耗折合标准煤 752.53 t，并可减少二氧化碳排放 2 001.73 t，减少二氧化硫排放 17.01 t，减少氮氧化物排放 14.81 t，具有较好的节能、环保及经济效益。

关键词：建筑供暖；地源热泵；复合式能源系统；可再生能源；节能；环保；经济效益
中图分类号：TK01$^+$8 **文献标志码**：A

Analysis of energy-saving and environmental benefits of hybrid renewable energy heating systems with ground source heat pumps

ZHOU Yujie[1], LI Hongdong[2]
(1. Beijing Municipal Engineering Consulting Co., Ltd., Beijing 100124, China; 2. XY Talent Energy Technology Co., Ltd., Beijing 102400, China)

Abstract: Based on an evaluation of the available resources such as geothermal energy, data center waste heat, natural gas, electricity, and heat grid around a science and technology industrial park in Beijing, along with a comprehensive analysis of building cooling and heating loads, three schemes were proposed to meet the full heating demand: a hybrid system combining ground source heat pumps, air source heat pumps, and waste heat heat pumps; data center waste heat recovery; and a chiller integrated with gas boiler system. The advantages and disadvantages of each scheme were analyzed. The operating principle and equipment configuration of the hybrid system were

收稿日期：2024－10－23
第一作者：周玉洁(1987—)，女，工程师。研究方向：能源与新能源应用。E-mail：465952391@qq.com

presented, as well as the calculation of its economic and environmental indicators, including operating costs, internal rate of return, payback period, coal savings, electricity savings, carbon emission reduction, and pollutant emission reduction. The results show that the hybrid system achieves an energy consumption index of approximately 4.22 kgce/m^2, corresponding to a reduction of 752.53 t in energy consumption, 2 001.73 t in CO_2 emissions, 17.01 t in SO_2 emissions, and 14.81 t in NO_x emissions, demonstrating favorable energy conservation, environmental protection, and economic benefits.

Keywords: building heating； ground source heat pump； hybrid energy system； renewable energy；energy conservation；environmental protection；economic benefits

随着《中共中央国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》[1]发布实施，各地严格控制能耗和二氧化碳排放强度，因地制宜推进热泵、燃气、生物质能、地热能等清洁低碳供暖。《北京市新增产业的禁止和限制目录(2022 年版)》[2]提出，禁止新建或扩建燃气独立供暖系统。为研究可再生能源供热新建或替代传统能源供热，国内外对复合式地源热泵系统的运行控制策略及相应的节能减排效益进行了大量分析。高承苗等[3]针对地源热泵系统在冬季供暖高峰期地埋管区域蓄热量不足、系统能效比降低的问题，提出了工业余热与浅层地源热泵复合的地源热泵供热模式，并结合实例进行了计算分析。结果表明，复合式地源热泵系统在性能指标与经济性方面具有明显优势，可有效利用工业余热。任万辉等[4]根据某建筑负荷特点及项目周围能源分布、运营时间，介绍了复合式地源热泵系统的冷热源系统配置思路，并从初投资、运行费用、静态回收期等方面分析了其应用合理性。同时，为了降低系统运行能耗，根据建筑动态负荷和机组运行特性对复合式地源热泵的控制策略进行了研究。刘冉冉等[5]以现有系统为基础，采用地埋管与冷却塔、地源热泵与水源热泵联合运行的方式进行了供暖与供冷改造；同时，在机房内增加了混水换热水池，增大了地下水可利用温差，提高了地下水利用率，充分利用了现有设备与系统，从而节约了地下水资源，提高了系统有效性、经济性和环境效益。张博等[6]基于深度强化学习策略，提出了空气源热泵除霜能效提升优化的理论方案，为实际运用提供了指导。于齐东[7]研究了循环水对水环热泵系统运行的影响，认为合理选择辅助热源容量有助于优化系统整体运行性能。徐向阳[8]对某工业园区地源热泵项目进行了节能减排与技术经济分析，发现地源热泵系统冷热联产优化运行具备较好的节能减排效益。宫静等[9]为了解决严寒地区单一地源热泵系统长期运行导致的土壤热失衡问题，构建了有效解决土壤热失衡的空气–土壤源复合式热源热泵系统，并针对该地区某办公建筑空气–土壤源热泵系统的经济性与 CO_2 减排率提出了最优运行方案。安均[10]介绍了地源热泵系统在宝鸡市某园区的应用实例。结果表明，该系统取得了良好的社会效益和经济效益，达到国家节能减排要求。

本文以北京市某科技产业园为研究对象，综合考虑可打井用地面积不足、数据中心余热供热稳定性一般等因素，提出采用“地源热泵 + 空气源热泵 + 余热回收”复合式能源系统替代传统冷水机组 + 燃气锅炉供热(冷)系统，分析数据中心余热回收、冷水机组 + 燃气锅炉两种方案的节能环保效益，以期为同类工程设计提供参考。

1　项目概况

该项目位于北京市，根据《民用建筑热工设计规范》(GB 50176—2016)[11]，其气候分区为寒冷 B 区。室外设计参数如表 1 所示，其中：C 为静风、SW 为西南风、N 为北风。

该项目占地面积为 24 440.46 m^2，共有 5 栋单体建筑(101、102、103、104、105 楼)，建筑面积为 48 983.65 m^2，其中，地上面积为

表 1 室外设计参数

Tab. 1 Outdoor design parameters

季节	干球温度/℃			湿球温度/℃	相对湿度/%	室外平均风速/(m·s^{-1})	大气压力/kPa	最多风向
	空调	通风	供暖					
夏季	33.5	29.7		26.4		2.1	100.02	C、SW
冬季	−9.9	−3.6	−1.6		44	2.6	102.17	C、N

35 292.94 m^2，地下面积为 14 051.23 m^2(不供冷暖)。105 楼仅需大量新风热负荷，其余楼均有冷热负荷需求。表 2 为各建筑面积及负荷。根据表中数据，采用负荷指标法计算得到总空调冷负荷为 2 330 kW，总空调热负荷为 3 794 kW。

表 2 各建筑面积及冷热负荷

Tab. 2 Building floor areas and corresponding cooling and heating loads

单体建筑	建筑面积/m^2	用能面积/m^2	冷负荷指标/(kW·m^{-2})	空调冷负荷/kW	热负荷指标/(kW·m^{-2})	空调热负荷/kW
101	6 893.88	6 795.72	93	633	82	555
102	4 424.85	4 359.41	127	555	95	416
103	4 424.85	4 359.41	120	521	95	416
104	6 893.88	6 795.72	92	623	82	555
105主体	9 604.97	9 492.63			67	632
105地下餐厅	16 741.22	3 300			370	1 220

2 技术方案

2.1 资源条件

2.1.1 打孔可用面积

经与各单体建筑的设计单位、园林、规划、水务及业主等相关方沟通，在现有资源条件下初步确定布置地埋孔区域，总可布孔区域面积约为 4 900 m^2；但布孔区域东侧存在地下管线复杂、地下车库占用等无法打孔的情况，考虑区域利用率约为 75%。因此，实际可布孔区域约为 3 675 m^2。

2.1.2 数据中心余热

该项目所在位置临近某数据中心，两者直线距离约为 400 m。为保证数据中心的稳定运行，在采暖季仍需开启一定比例的冷却塔。通过对初末寒期及极寒期(2023 年 1、3 和 11 月份)各一个月连续运行参数包括各制冷系统的流量和温差进行统计和计算，得到制冷机房可利用余热，如表 3 所示。本方案中冷却塔按承担 30% 设计散热量的工况进行余热回收配置，因此可用于供暖的冷却水余热约为 11 MW。由水源热泵机组进行供暖，性能系数取 5，则该数据中心运行产生的余热达 13 MW。

表 3 制冷机房可利用余热

Tab. 3 Available waste heat from refrigeration plant room

月份	可利用余热/kW					余热合计/kW
	DC1	DC2	DC3	DC4	DC5	
1月	3 274	5 256	3 514	2 860	940	15 844
3月	3 484	3 520	3 735	3 130	1 599	15 468
11月	3 209	3 732	3 707	3 773	3 461	17 882
平均值	3 322	4 169	3 652	3 254	2 000	16 398

2.1.3 空气能

空气源热泵供暖系统采用环保能源，即空气能，无需燃烧化石燃料，不产生污染物排放，可减少对环境的污染。空气源热泵供暖系统不需要地源或水源等特殊条件，只需充足的室外空气即可运行。

2.2 方案优缺点对比

地源热泵 + 空气源热泵 + 余热热泵(方案一)、数据中心余热回收(方案二)、冷水机组 + 燃气锅炉(方案三)等 3 种方案的优缺点如表 4 所示。《北京市新增产业的禁止和限制目录(2022 年版)》中提出，禁止新建燃气独立供暖系统(不具备可再生能源供热条件的除外)，因此方案三中新建燃气锅炉不符合政策要求。《北京市发展和改革委员会等十部门关于印发全面推进新能源供热高质量发展实施意见的通知》(京发改〔2023〕1 309 号)[12]提出，对浅层地热热泵、余热热泵及空气源热泵等新能源供热装机占比达到 60% 及以上的新能源供热新建及改扩建项目，给予新能源建设投资 30% 的市政府固定资

产投资支持。因此，采用方案一或方案二可获得北京市固定资产投资补贴支持。该项目供能面积相对不大，可考虑地源热泵、空气源热泵、余热回收、传统冷水机组 + 燃气锅炉等多种供能形式。根据园区现有资源条件，若全部采用地源热泵，存在场区内打孔面积不足的问题；若全部采用数据中心余热回收利用，则存在建设周期滞后于该项目用热需求速度等问题。因此，该项目供暖采用方案一的复合式供暖方式，即部分地源热泵复合其他热泵联合供热。

表 4　3 种方案对比

Tab. 4　Comparison of three schemes

方案	方案一	方案二	方案三
政策符合性	满足	满足	不满足
单位面积初投资/(元·m^{-2})	300 ～ 500	200 ～ 300	300 ～ 400
单位面积运行成本/(元·m^{-2})	30	35	45
有无投资补助	有	有	无

方案一在获得市政府固定资产投资补助后，其建设投资与方案三的接近，但运行费用低于方案三。综合考虑建设周期匹配性、供暖系统可靠性及 20 年生命周期成本测算结果，对比 3 种能源方案，并结合本区域的功能定位后发现，该能源站宜采用方案一即“地源热泵 + 空气源热泵 + 余热热泵”复合供热方式满足末端冷热负荷需求。

2.3　系统原理

该项目能源系统包含地埋管换热系统、地源热泵、空气源热泵、余热回收利用系统(数据中心换热器等不属于此项目投资范围，由数据中心配套建设)、补水等设备或系统。系统原理图如图 1 所示，其中：GSHP 为地源热泵机组；WSHP 为水源热泵机组；L−1～L−4 分别为地源侧环路、余热回收侧环路、用户侧供水环路、用户侧回水环路；F_1、F_3、F_6、F_8 分别为 GSHP 蒸发器地源侧进水管、GSHP 冷凝器用户侧出水管、WSHP 蒸发器余热侧进水管、WSHP 冷凝器用户侧出水管。设置地源热泵系统、余热热泵系统及空气源热泵系统复合供热来满足 101、102、104 楼空调冷热负荷以及 103 楼新风热负荷及工艺热负荷需求。

2.4　设计方案

依据地质勘探与热响应试验成果，获取岩土热物性参数，结合设计工况下换热模型计算及综合换热系数修正，确定夏季延米排热量为 60 W/m，冬季延米取热量为 40 W/m。根据项目区域地质条件及施工条件，地埋孔最大可打孔深度为 250 m。采用“地源热泵 + 空气源热泵 + 余热热泵”复合式能源系统，并根据地源热泵系统最大冷热负荷以及系统性能系数和能效比分别计算热泵系统冬季从土壤吸热量 Q_C、夏季向土壤放热量 Q_h。

$$Q_h = q_l \times \left(\frac{\eta_{EER} + 1}{\eta_{EER}} \right) \tag{1}$$

$$Q_C = q_r \times \left(\frac{\eta_{COP} - 1}{\eta_{COP}} \right) \tag{2}$$

式中：Q_h 为夏季小时最大放热量，kW；Q_C 为冬季小时最大吸热量，kW；q_l 为最大冷负荷，kW；q_r 为最大热负荷，kW；η_{EER} 为能效比，取 6.7；η_{COP} 为性能系数，取 4.8。

本项目中：设置 250 m 深地埋管 6 眼，设置 198 m 深地埋孔 124 眼，150 m 深地埋孔 10 眼；总打孔数为 140 眼，总换热延米数为 27 552 m；设置 198 m 深监测孔 2 眼，150 m 及 250 m 深监测孔各 1 眼，总换热延米数为 796 m；总打孔数为 144 眼，垂直部分总延米数为 28 348 m。地源热泵承担的冷负荷约为 1 410 kW。换热孔间距按 5 m 计算，共需布孔面积约为 3 600 m^2，因此项目区域布孔面积满足设置要求。

经计算确定地源热泵系统冷负荷约为 1 410 kW，承担热负荷为 1 399 kW；余热回收机组只承担热负荷，约为 1 394 kW；考虑到空气源热泵存在融霜时间及性能衰减等，并考虑一定的余量及供热可靠性，空气源热泵承担冷负荷为 922 kW，承担热负荷约为 990 kW。

因此，该项目设计配置 1 台螺杆式地源热泵机组，制热量为 1 386 kW，功率为 291.5 kW，制冷量为 1 335 kW，功率为 196.7 kW；配置 1 台余热回收利用的水源热泵机组，制热量为 1 856 kW，功率为 369.2 kW。同时，该项目配置 8 台空气源热泵机组，单台制热量为 135 W，

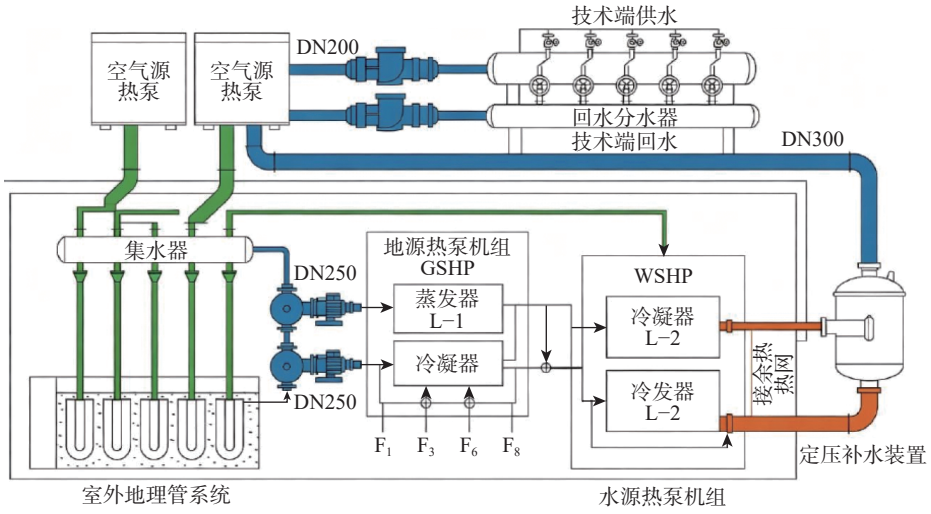

图 1 地源热泵复合供热系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the hybrid heating system with ground source heat pumps

功率为 37.1kW；单台制冷量为 130 kW，功率为 39 kW。

地源热泵设计需要满足土壤热平衡计算，因此对工区布孔区域的静态储量进行评价，并结合项目的室外地埋孔设计估算地源热泵系统全年运行引起的地温场变化，详见式(3) ～ (8)。该计算模型基于局部热平衡假设，忽略了地下水渗流带来的对流换热影响，主要适用于评估地埋管周围岩土体的静态显热储存能力。静态储量是指地表以下一定深度范围内岩土体 [按照地下水赋存状态划分为包气带和饱和带(含水层与相对隔水层)] 中所蕴藏的热量，包括岩土体颗粒、岩土体中含水和岩土体中所含空气的热量。

(1)包气带地热能

$$Q_{R1} = Q_S + Q_{W1} + Q_A \tag{3}$$

$$Q_S = \rho_S c_{p,S}(1-\varphi)Md\Delta T \tag{4}$$

$$Q_{W1} = \rho_W c_{p,W}\omega Md\Delta T \tag{5}$$

$$Q_A = \rho_A c_{p,A}(\varphi-\omega)Md\Delta T \tag{6}$$

式中：Q_{R1}、Q_S、Q_{W1}、Q_A分别为包气带地热能储存总量、岩土体中的热储存量、包气带岩土体所含水中的热储存量以及岩土中所含空气中的热储存量，kJ；ρ_S为岩土体密度，kg/m^3；$c_{p,S}$为岩土体比热容，kJ/(kg·℃)；φ为岩土体的孔隙率；M为计算面积，m^2；d为计算厚度，m；ΔT为利用温差，℃；ρ_W为水的密度，kg/m^3，取值为 1 000 kg/m^3；$c_{p,W}$为水的比热容，kJ/(kg·℃)，取值为 4.18 kJ/(kg·℃)；ω为岩土体的含水率，%；ρ_A 为空气的密度，kg/ m^3；$c_{p,A}$为空气的比热容，kJ/(kg·℃)。

(2)含水层和相对隔水层地热能

$$Q_{R2} = Q_S + Q_{W2} \tag{7}$$

$$Q_{W2} = \rho_W c_{p,W}\varphi Md\Delta T \tag{8}$$

式中：Q_{R2}、Q_{W2}分别为含水层和相对隔水层地热能储存总量、岩土体所含水中的热储存量，kJ；d_{w2} 为地下水面至计算下限的岩土体厚度，m，为所涉及深度范围内各含水层与相对隔水层厚度之和。

对该项目地源热泵地埋管布孔区域的资源量进行评价，并结合项目的室外地埋孔设计估算地源热泵系统全年运行引起的地温场变化。考虑到北京地区参数并结合实际情况，制冷天数为 120 d，供暖天数为 123 d。热泵夏季使用系数为 0.9，冬季使用系数为 0.9。设计夏季每天供冷约 10 h，冬季每天供暖 11 h。综上所述，经过一个制冷季与供暖季后，热泵向地层侧释放的能量与从地层侧吸收的热量分别为 9.38×10^9 kJ 和 8.47×10^9 kJ。在地源热泵系统影响范围内地质体(0 ～ 198 m 土壤)每变化 1 ℃ 释放或吸收的热量约为 4.35×10^9 kJ，因此，地源热泵系统运行一年导致地层

上升的温度是 0.209 ℃。由于地下水流动对地层散热的影响，以及热泵系统的间歇期，均有利于地层温度的恢复，总体上本项目地埋管系统对地层温度的影响较小，但应动态监测地温场的变化过程及恢复情况。

3　投资估算及经济效益分析

3.1　投资估算

该项目总投资为 1 498.70 万元，其中：建设投资为 1 454.60 万元（工程费用为 1 221.71 万元，工程建设其他费用为 163.62 万元，预备费为 69.27 万元），建设期利息为 23.86 万元，流动资金为 20.25 万元。

3.2　经济效益分析

该项目建设期为 1 年，运营期为 20 年，固定投资贷款年利率为 4.1%。按现有设计方案计算，项目第 1 年完成建设，运营期第 1 年实现供热供冷 60% 达产，第 2 年 70% 达产，第 3 年 80% 达产，第 4 年 90% 达产，第 5 年和第 6 年 95% 达产，第 7 年 100% 达产。根据现有设计文件，依照现有供热收费政策，供热收费标准按照供能合同协议价测算，101、102、103、104 楼非居民供热收费价格标准为 53 元/m^2。夏季供冷收费价格标准暂定为 67 元/m^2。103 楼供热价格分为基本热价 18 元/m^2 和计量热价 91.6 元/GJ 两部分。达产后年供能面积共计 3.5 万 m^2。2031 年达产后，供热收入为 215.22 万元/年，供冷收入为 149.48 万元/年。经测算，达产年水电费为 59.91 万元；工资福利费约为 38.60 万元，随后按每年递增约 1%；修理费为 9.29 万元；余热购买费用为 19.47 万元；总成本费用为 173.43 万元。

在上述边界条件下，计算该项目所得税后全投资财务内部收益率为 8.02%，所得税前全投资财务内部收益率为 11.12%。资本金内部收益率为 15.25%。项目计算期内所得税前全部投资财务净现值（基准收益率 I=6%）为 712.39万元，所得税后全部投资财务净现值（基准收益率 I=6%）为 268.49 万元。所得税后项目投资回收期 12.41 年（包含建设期），所得税前项目投资回收期 10.25 年（包含建设期）。该财务分析指标表明，在项目计算期内，项目整体收支基本平衡且略有盈余；达产后，项目具备稳定的现金流入与合理的偿债保障，财务可持续性较强，抗风险能力良好。

4　节能及生态效益

4.1　节能效益

假设该项目使用燃气锅炉（锅炉效率 η=92%）和分体空调（η_{COP}=3.5）供热供冷，计算得到的年消耗电量约为 563.08 万 kW·h，年消耗燃气为 21 万 m^3，年能耗总量折合标准煤量为 971.33 t，单位面积能耗约为 27.75 kgec/m^2，详见表 5。

该项目选用方案的消耗能源为电力。经初步估算，供热采暖和夏季制冷年消耗电力约为 120.15 万 kW·h，年能耗总量折合标准煤量为 147.67 t，单位面积能耗约为 4.22 kgec/m^2，详见表 6。该项目可减少能耗折合标准煤量 813.38 t，节能率约为 84.8%。

北京地区同类型建筑具有层高较高、冷热指标较高等特点，但不同建筑能耗差异较大，整年供热供冷单位面积能耗多在 16 ～ 22 kgec/m^2。经计算，该项目采用地源热泵后，全年采暖和供

表 5　燃气锅炉 + 分体空调方案系统能耗指标

Tab. 5　Energy consumption indicators of the gas boiler and split air conditioning system

季节	年耗电量/（万kW·h）	电力当量值/[(t标准煤·(万kW·h)$^{-1}$]	电力折合标准煤量/t	年耗气量/Nm^3	燃气低位发热量折算系数/[(t标准煤·(万m^3)$^{-1}$]	燃气折合标准煤量/t	总标准煤量/t	单位面积能耗/(kgec·m^{-2})
夏季	514.1	1.229	631.8	0	13.3	0	631.8	18.05
冬季	49.0	1.229	60.2	210 000	13.3	279.3	339.5	9.70
合计	563.1		692.0	210 000		279.3	971.3	27.75

注：(1)电力折合标准煤量＝年耗电量 × 电力当量值；(2)燃气折合标准煤量＝年耗气量 × 燃气低位发热量折算系数。

表 6 本项目所采用方案的系统能耗

Tab. 6 Energy consumption indicators of the selected scheme

系统	年耗电量/(万kW·h)	电折合标准煤量/t	总标准煤量/ t	单位面积能耗/(kgec·m^{-2})
夏季	43.63	53.62	53.6	1.53
冬季	76.52	94.04	94.0	2.69
合计	120.15	147.67	147.6	4.22

冷单位面积能耗合计 4.22 kgec/m^2，低于现阶段北京地区同类型建筑单位面积能耗平均水平。

4.2 环保效益

经计算，本项目与同等条件全部使用燃气锅炉（η=92%）和分体空调（η_{COP}=3.5）供热供冷相比，可减少能耗折合标准煤量 752.53 t，并可减少二氧化碳排放 2 001.73 t、减少二氧化硫排放 17.01 t、减少氮氧化物排放 14.81 t。

5 结论

（1）“地源热泵 + 空气源热泵 + 余热热泵”复合式能源系统相比于单一系统在运行时更能取长补短。根据土壤热平衡及负荷需求等条件，适时调节空气源热泵及数据中心余热热泵运行时间，可以有效避免“冷热堆积”，提高整个系统长期运行可靠性。

（2）该复合式能源系统具有良好的经济、节能及环保效益，单位面积能耗约为 4.22 kgec/m^2，可减少能耗折合标准煤量 752.53 t，并可减少二氧化碳排放 2 001.73 t，减少二氧化硫排放 17.01 t，减少氮氧化物排放 14.81 t，节能率约为 84.8%，具有很强的可推广性。

参考文献：

[1] 中共中央国务院. 中共中央国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见 [EB/OL]. (2021−09−22)[2021−09−22]. https://www.gov.cn/zhengce/2021-10/24/content_5644613.htm.

[2] 北京市人民政府办公厅. 北京市人民政府办公厅关于印发市发展改革委等部门制定的《北京市新增产业的禁止和限制目录 (2022 年版)》的通知 [EB/OL]. (2022−02−14)[2022−02−14]. https://www.beijing.gov.cn/zhengce/zhengcefagui/202203/t20220314_2629801.html.

[3] 高承苗, 刁乃仁, 石维群, 等. 工业余热在改善冬季地源热泵系统运行中的应用 [J]. 建筑热能通风空调, 2012, 31(3)：50 − 52.

[4] 任万辉, 何理霞, 曲志光, 等. 复合式地源热泵系统在青岛科技馆项目中的应用 [J]. 暖通空调, 2022, 52(1)：36 − 42.

[5] 刘冉冉, 刘桂义, 王德敬, 等. 某工业园地源热泵空调系统改造方案及分析 [J]. 节能, 2017, 36(10)：60 − 63.

[6] 张博, 田煦嘉. 基于深度强化学习策略的空气源热泵除霜能效提升 [J]. 能源研究与信息, 2025, 41(1)：27 − 32.

[7] 于齐东. 循环水对水环热泵系统运行的影响研究 [J]. 能源研究与信息, 2020, 36(2)：88 − 94.

[8] 徐向阳. 天宝工业园区地源热泵项目节能减排与技术经济分析 [D]. 保定: 华北电力大学, 2016.

[9] 宫静, 王松庆. 严寒地区某办公建筑空气−土壤源热泵系统经济性与 CO_2 减排率分析 [J]. 节能技术, 2022, 40(4)：315 − 320.

[10] 安均. 关中大平原地区地源热泵系统项目应用与分析 [J]. 洁净与空调技术, 2018(4)：95 − 98.

[11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50176—2016 民用建筑热工设计规范 (含光盘)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.

[12] 北京市发展和改革委员会, 北京市规划和自然资源委员会, 北京市城市管理委员会, 等. 北京市发展和改革委员会等 10 部门关于印发全面推进新能源供热高质量发展实施意见的通知 [EB/OL]. (2023−10−09)[2023−10−09]. https://www.beijing.gov.cn/zhengce/zhengcefagui/202311/t20231110_3299506.html.