

分类号：
学 号：20232210004

密 级：
单位代码：10759

石河子大学

硕士学位论文



严寒区大型建筑多能互补供能系统优化与综合评价研究——以石河子大学第一附属医院为例

学 位 申 请 人	于子薇
指 导 教 师	马玉薇副教授
申请学位门类级别	专业硕士
学 科、专 业 名 称	土木水利
研 究 方 向	建筑节能
所 在 学 院	水利建筑工程学院

中国·新疆·石河子
2026年5月

分类号：
学号：20232210004

密级：
单位代码：10759

石河子大学

硕士学位论文



严寒区大型建筑多能互补供能系统优化与综合评价研究——以石河子大学第一附属医院为例

学位申请人	于子薇
指导教师	马玉薇副教授
申请学位门类级别	专业硕士
学科、专业名称	土木水利
研究方向	建筑节能
所在学院	水利建筑工程学院

中国·新疆·石河子

2026年5月

**Optimization and Comprehensive Evaluation of Multi-energy
Complementary Heating System for Large Buildings in Severe Cold
Regions: A Case Study of the First Affiliated Hospital of Shihezi
University**

A Dissertation Submitted to
Shihezi University
In Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of
Master of Engineering

By

Yu Ziwei
(Civil and Hydraulic Engineering)

Dissertation Supervisor: Prof. Ma Yuwei

May, 2026

石河子大学学位论文独创性声明及使用授权声明

学位论文独创性声明

本人所呈交的学位论文是在我导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明并表示谢意。

研究生签名： 于占薇

时间： 2026 年 5 月 21 日

使用授权声明

本人完全了解石河子大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文在学校图书馆保存并允许被查阅。有权自行或许可他人将学位论文编入有关数据库提供检索服务。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

研究生签名： 于占薇

时间： 2026 年 5 月 21 日

导师签名： 马玉薇

时间： 2026 年 5 月 21 日

摘要

针对严寒地区大型医疗建筑供暖周期长、负荷波动大及传统供暖能耗高、碳排量大的挑战，本研究以新疆石河子市某医院住院楼为对象，旨在构建并优化一种高效、低碳的多能互补供暖系统。首先，通过现场环境实测与问卷调查，量化分析建筑的热舒适需求与用能规律。随后，利用 EnergyPlus 构建精细化建筑能耗模型，获取全年动态热负荷基准。在此基础上，依托 TRNSYS 平台搭建集成太阳能集热、空气源热泵、燃气锅炉及燃煤锅炉的多能互补仿真模型，并采用 Hooke-Jeeves 算法对系统关键设计参数进行多目标寻优。最后，从节能、环保、经济三个方面开展全生命周期综合评价。研究结果如下：

(1) 验证了多能互补供暖系统在严寒气候下的供能可靠性与深度脱碳潜力。仿真结果显示，优化后的系统清洁供热占比达 95%，其中太阳能与空气源热泵分别贡献了 48%和 47%的热量，成功替代了传统燃煤锅炉模式，解决了严寒条件下可再生能源处理不稳的行业痛点。

(2) 揭示了换热介质物对系统运行能效的影响机制。通过对比四种介质发现，40%乙二醇水溶液在防冻安全、动力粘度与换热效率间达到了最优平衡，系统最高性能系数 (COP) 可达 10.59。该发现为严寒地区集热系统的介质优选提供了量化依据。

(3) 确立了系统多参数协同匹配的最优设计准则。经多目标优化迭代，获取的最优参数组合为：太阳能集热器面积 $2.00 \times 10^4 \text{ m}^2$ 、太阳能倾角 30° 、蓄热水箱容积 $2.03 \times 10^3 \text{ m}^3$ ，综合目标函数达到最小值-14.61。在此工况下，系统综合 COP 提升了 21.7%，一次能源消耗降低了 21.6%，实现了热源出力特征与建筑动态负荷需求的精准耦合。

(4) 论证了系统的资源替代效益与全生命周期经济可行性。从太阳能角度出发，系统在供暖季可替代标煤 $4.44 \times 10^5 \text{ kg}$ ， CO_2 减排 $1.18 \times 10^6 \text{ kg}$ 、 SO_2 及 NO_x 各 $8.88 \times 10^3 \text{ kg}$ 。虽受局部低煤价影响静态投资回收期为 21.39 年，但仍处于 25 年设备服役周期内。煤价敏感性分析表明，在高煤价区域及碳减排政策驱动下，该方案具备显著的市场竞争和推广价值。

本研究构建的多能互补供暖系统实现了严寒气候下建筑能源供应的低碳化与高效运行，其形成的“动态仿真-多参数寻优-多维效益评估”技术路径，可为严寒地区医疗类大型公共建筑的供暖系统绿色改造与精细化设计提供可量化的技术标准与工程范式。

关键词：多能互补供暖系统；医院建筑；系统优化；综合效益；严寒地区

Abstract

To address the challenges of long heating periods, significant load fluctuations, high energy consumption, and intensive carbon emissions in large medical buildings in severe cold regions, this study focuses on an inpatient building of a hospital in Shihezi, Xinjiang. A high-efficiency, low-carbon multi-energy complementary heating system was developed and optimized. First, field environmental monitoring and questionnaire surveys were conducted to quantify thermal comfort requirements and energy consumption patterns. Subsequently, a refined building energy model was developed using EnergyPlus to establish a baseline for annual dynamic thermal loads. On this basis, a simulation model integrating solar collectors, air-source heat pumps, gas-fired boilers, and coal-fired boilers was constructed via the TRNSYS platform. The Hooke-Jeeves algorithm was employed to perform multi-objective optimization of key system design parameters. Finally, the system was evaluated via a life-cycle assessment focused on energy, environmental, and economic factors. The research findings are as follows:

(1) The system demonstrates high reliability and significant potential for decarbonization. Results show that clean heating accounts for 95% of the total supply. Solar energy and air-source heat pumps contribute 48% and 47%, respectively. This configuration successfully replaces traditional coal-fired boilers. It also solves the problem of unstable renewable energy output in extreme cold.

(2) The impact of heat transfer media on system efficiency was identified. A 40% ethylene glycol solution provides the optimal balance between frost protection and heat transfer efficiency. A peak Coefficient of Performance (COP) of 10.59 was achieved during maximum solar radiation. These findings offer a quantitative basis for media selection in similar climates.

(3) Quantitative criteria for optimal multi-parameter matching were established. The optimal configuration consists of a 2.00×10^4 m² solar area, a 30° tilt angle, and a 2.03×10^3 m³ storage volume. This setup minimized the composite objective function to -14.61. Under these conditions, the system COP increased by 21.7% while primary energy consumption decreased by 21.6%, ensuring a precise match between heat supply and building demand.

(4) Resource substitution benefits and life-cycle economic feasibility were confirmed. During the heating season, the system substitutes 4.44×10^5 kg of standard coal. It reduces emissions of CO₂ by 1.18×10^6 kg, and SO₂ and NO_x by 8.88×10^3 kg each. Although the static payback period is 21.39 years, it remains within the 25-year equipment service life. Sensitivity analysis indicates strong market potential in regions with higher coal prices or under carbon reduction policies.

The proposed system ensures low-carbon and efficient energy supply in frigid climates. The established technical path of “simulation-optimization-evaluation” provides a quantifiable standard for the green

retrofitting of large-scale medical buildings.

Key words: Multi-energy complementary heating system; Hospital building; System optimization; Comprehensive benefits; Severe cold regions

目录

摘要.....	I
Abstract.....	II
第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.1.1 严寒地区建筑供暖的能源与环境挑战.....	1
1.1.2 大型公共建筑供暖需求与高能耗问题.....	2
1.1.3 多能互补系统的研究价值与发展前景.....	4
1.2 国内外研究现状.....	4
1.2.1 多能互补供暖技术研究进展.....	6
1.2.2 多能互补供暖系统优化研究进展.....	7
1.2.3 多能互补供暖系统综合评价研究进展.....	9
1.2.4 研究现状评述.....	9
1.3 研究目的与意义.....	10
1.3.1 研究目的.....	10
1.3.2 研究意义.....	10
1.4 研究内容与技术路线.....	11
1.4.1 研究内容.....	11
1.4.2 技术路线.....	13
第 2 章 材料与方法.....	14
2.1 研究对象与环境.....	14
2.1.1 建筑概况及气候特征.....	14
2.1.2 现状调研方案设计.....	17
2.2 仿真模型构建方法.....	22
2.2.1 建筑能耗模型.....	22
2.2.2 系统仿真模型.....	22
2.2.3 设备选型原则.....	26
2.3 优化算法与评价指标.....	29
2.3.1 多目标优化.....	29
2.3.2 综合评价.....	29
2.4 数据处理工具.....	30
第 3 章 医院住院楼能耗特征分析.....	32

3.1 室内外热环境实测与问卷结果.....	32
3.1.1 室内外热环境实测分析.....	32
3.1.2 问卷结果分析.....	36
3.2 建筑热负荷模拟分析.....	37
3.3 供暖系统设备选型结果.....	38
3.3.1 太阳能集热系统.....	38
3.3.2 空气源热泵系统配置.....	38
3.3.3 辅助热源.....	38
3.3.4 水泵选型.....	38
3.4 系统容量匹配与负荷分析.....	39
3.5 本章小结.....	39
第4章 基于 TRNSYS 多能互补供暖系统建模与仿真分析.....	41
4.1 多能互补供暖系统仿真模型建立.....	41
4.1.1 关键模块选择.....	41
4.1.2 仿真模型搭建.....	42
4.2 仿真模型可靠性验证.....	44
4.2.1 误差评价指标.....	44
4.2.2 典型严寒工况逐时验证.....	44
4.2.3 性能指标与变工况验证.....	46
4.3 系统运行性能分析.....	46
4.3.1 累计供热量构成分析.....	46
4.3.2 集热效率动态变化.....	47
4.4 换热介质对比试验.....	49
4.5 本章小结.....	50
第5章 多能互补供暖系统优化与综合评价.....	52
5.1 关键参数对系统能效的影响机理分析.....	52
5.1.1 太阳能集热器面积的边际效应与能耗平衡.....	52
5.1.2 安装倾角对辐射资源的时空分配调节.....	52
5.1.3 蓄热水箱在缓冲能力与储热效率件的权衡.....	52
5.2 优化参数配置与目标函数构建.....	53
5.2.1 变量设置与约束边界.....	53
5.2.2 目标函数的构建.....	53
5.3 优化过程演变与结果分析.....	54
5.3.1 迭代收敛机理分析.....	54

5.3.2 最优参数组合识别与性能提升	55
5.4 系统全生命周期综合效益评价	57
5.4.1 节能效益量化	57
5.4.2 环保效益评价	57
5.4.3 经济性分析与敏感性研究	58
5.5 本章小结	59
第 6 章 结论与展望	60
6.1 结论	60
6.2 展望	61
参考文献	62
附录 A	68
附录 B	70
附录 C	73
附录 D	74
致谢	76
作者简介	78

第1章 绪论

1.1 研究背景

1.1.1 严寒地区建筑供暖的能源与环境挑战

社会快速发展与能源需求持续攀升的背景下，全球气候变化同能源危机一道，被国际社会视作亟待应对之核心议题，《巴黎协定》所确立的全球温控目标，促使各国加速推进能源结构转型与低碳发展进程。根据国际能源署（International Energy Agency, IEA）报告指出，建筑和建筑部门使用能耗占全球总能源消耗的三分之一^[1]，且这一比例呈上升趋势^[2]。在我国碳达峰、碳中和作为推动经济社会高质量发展、保障国家能源安全重要国家战略的背景下，尽快实现建筑领域节能减排已成为当务之急^[3,4]。

我国地域纬度跨度大，不同气候区域的建筑用能需求和能耗差异大。按照《民用建筑热工设计规范》（GB 50176-2016）的气候分区标准（图 1-1），我国严寒地区最低月平均气温低于-10℃，极端温度可达到-58℃，日平均气温低于 5℃ 的天数超过 145 天。由于冬季气温低，严寒地区采暖运行时间长达半年之久，供暖成为建筑运行的基本刚性需求。当前，我国严寒地区供暖的能源结构仍以化石能源为主，其中燃煤占据主导地位，辅助部分以天然气及电力^[5]。这种高度依赖化石燃料的供暖模式，在满足巨大热需求的同时，也带来了严峻的环境挑战。一是直接导致大量的二氧化碳排放，是区域碳排放的重要贡献源。二是煤炭等燃料的燃烧排放出二氧化硫、氮氧化物和颗粒物等污染物，对空气质量构成压力，尤其是在冬季天气下加剧雾霾现象。三是系统能效总体偏低，存在能源浪费，进一步加剧了能源供应与环境容量的双重压力。因此，如何推动严寒地区建筑供暖的能源结构转型与能效提升，是实现建筑低碳、清洁化发展的核心课题。

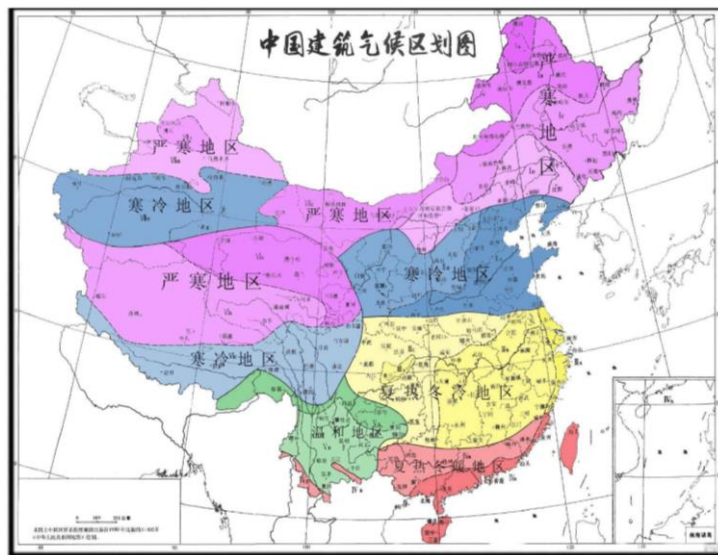


图 1-1 中国建筑气候规划图

Figure 1-1 China Building Climate Zoning Map

1.1.2 大型公共建筑供暖需求与高能耗问题

据《中国城乡建设领域碳排放研究报告（2025）》数据显示（图 1-2），2024 年我国城镇建筑运行能耗达 13 亿吨标准煤（tce），占全国能源消费总量的 21.8%，碳排放总量达 24.7 亿 tCO₂，占全国碳排放的 22.1%。在建筑运行阶段，公共建筑部分的能耗占比明显，由此可见该领域具有较大的节能降碳潜力^[6, 7]。同时，我国北方采暖地区建筑能耗占建筑运行总能耗的 40%以上^[8]，是建筑领域能源消耗与碳排放最为集中的环节。因此，聚焦与严寒地区公共建筑的供暖节能技术与管理优化，对于整体降低建筑能耗、落实国家“双碳”战略目标具有重要的显示意义。

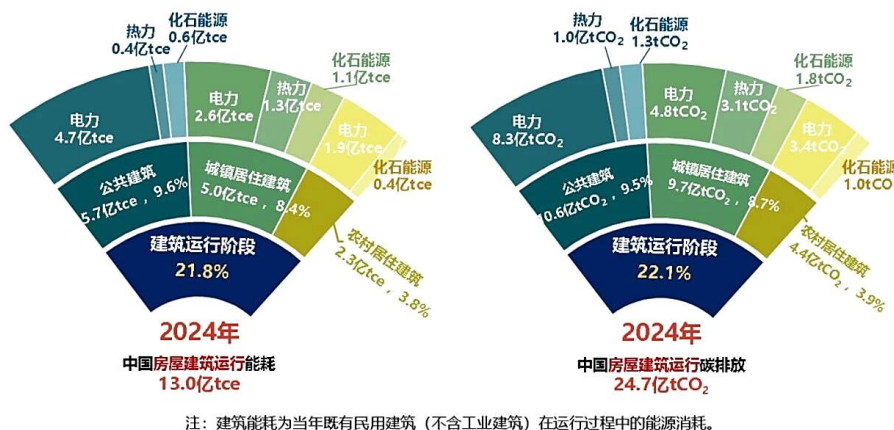


图 1-2 2024 年全国房屋建筑运行能耗与碳排放^[9]

Figure 1-2 Building Operation Energy Consumption and Carbon Emissions of National Buildings in

在我国，公共建筑是城市能源消耗的重要组成部分，其运行能耗在全国建筑用能中占据相当大的比例^[10]。依据《大型公共建筑能耗监测系统工程技术规范》（GB/T 51161-2016），大型公共建筑被界定为单栋建筑面积 $2.00 \times 10^4 \text{ m}^2$ 及以上、且采用集中空调系统的公共建筑，其业态覆盖办公建筑、商业建筑、科教文卫建筑、交通枢纽建筑等多个领域。在工程实践中，也常将建筑面积 $1.00 \times 10^4 \text{ m}^2$ 及以上、具备全年连续用能特征的高能耗公共建筑纳入该研究范畴，其核心共性特征为建筑体量大、供能业态复杂、室内环境参数要求严苛、用能系统种类繁多、运行周期长。

在大型公共建筑的诸多业态中，不同类别的建筑因其使用功能差异，展现出迥异的负荷特征^[11]。相比于一般性办公或商业建筑，医疗建筑在用能强度与供能可靠性方面具有极高的特殊性，被公认为公共建筑领域中节能降碳难度最大、潜力也最显著的典型代表^[12, 13]。首先，在空间功能与负荷特性方面，医院内部功能分区极其复杂，涵盖了门诊、急诊、住院、手术、实验室及大型医用设备机房等多种功能用房。不同区域的人员密度、设备发热量及新风需求差异巨大，导致热负荷在时空分布上呈现高度的不均衡性，对供暖系统的调控精度提出了严苛要求^[14-16]。在时间维度与运行保障方面，医院作为特殊的社会公共服务机构，需维持全年 24 小时不间断运行。与居住建筑或办公建筑可在夜间或节假日进行负荷下调不同，医疗建筑的供暖负荷具有极强的连续性与刚性特征。尤其对于严寒地区的医院，冬季室内热环境不仅关系到医患的热舒适，更是保障医疗安全、辅助患者康复的关键物理因素。最后，从能效强度来看，由于高频次的使用率和高密度的精密设备运行，医院的用能密度远超普通公建。研究表明，我国医疗建筑的单位面积能效强度通常比其他公共建筑高出 1.6-2.0 倍^[17, 18]，而在部分发达国家这一差距甚至高达 3 倍^[19, 20]。在各类能耗中，供暖、通风与空调系统占主导地位，约占医院总能耗的 40%-60%^[21]。

值得注意的是，在大型建筑的综合供能体系中，供能系统通常涵盖了供暖、制冷、供电及生活热水等多个维度。然而，立足于严寒地区的特殊气候背景，建筑全年的能源消耗表现出极强的季节非对称性。实测与能耗统计表明，严寒地区医疗建筑的冬季供暖负荷在全年总热负荷中占据绝对主导地位，且其对应的碳排放强度与能源保障压力远高于夏季制冷及日常用电。因此，为深度聚焦严寒地区建筑用能的核心矛盾，提升研究的针对性与工程实用价值，本研究将大型建筑多能互补“供能系统”的研究范畴聚焦于“冬季供暖系统”。通过对供暖这一关键供能环节的精细化模拟与多维优化，旨在为严寒地区医疗建筑的清洁能源替代与低碳化运行提供典型示范。降低医院的能源消耗对于应对全球变暖以及实现 2030 年碳排放峰值和 2060 年碳中和的国家目标而言具有极其重要的意义^[22]。

1.1.3 多能互补系统的研究价值与发展前景

面对严寒地区医院建筑供暖的多重矛盾，传统单一热源供暖系统难以同时满足高供能可靠性、高能效、低碳排放、低环境影响的多元目标，亟需突破传统供能模式的技术局限。目前，使用可再生能源替代化石能源是一种主要解决方法^[23, 24]。我国地域辽阔，自然资源丰富，但可再生能源尚未在供暖系统中得到规模化、高效率的利用^[25]。在此背景下，多能互补供暖系统作为一种新型能源集成技术，通过整合太阳能、地热能、生物质能等可再生能源与天然气、电能等常规能源^[26, 27]，充分发挥不同能源的品位优势与时空互补特性，依托系统集成与协同优化，实现多能源的梯级利用与供需精准匹配^[28-30]，是破解严寒地区供暖能源与环境双重约束、推动建筑领域低碳转型的核心技术路径之一。

从政策导向来看，我国《城乡建设领域碳达峰实施方案》《“十四五”建筑节能与绿色建筑发展规划》等顶层设计文件，均明确将多能互补清洁供暖作为建筑领域节能降碳的核心技术方向，提出要因地制宜整合区域可再生能源与常规能源资源，构建多能协同的供暖系统，提升能源梯级利用效率与可再生能源消纳比例，为该技术的研发与工程落地提供明确的政策支撑与发展空间^[31]。从技术优势来看，多能互补系统相较于传统单一热源系统，具备三大核心应用价值：一是可充分适配严寒地区资源禀赋，最大化就地消纳太阳能、浅层地热能等本地可再生能源，降低化石能源消费占比，从源头实现供暖系统的碳减排与污染物减排；二是可通过多能源的协同运行，弥补单一可再生能源低温环境下能效衰减、出力间歇性的技术短板，提升供暖系统的供能可靠性与抗风险能力，适配医院建筑的刚性供能需求；三是可通过能源梯级利用与负荷精准调控，实现供需双侧的动态匹配，显著提升系统综合运行能效，降低供暖系统全生命周期能耗与运行成本^[32]。

对于新疆地区得天独厚的太阳能资源和广泛分布的空气能，本研究旨在结合该区域的地理特征，针对严寒地区大型医疗建筑提出一套多能互补供暖系统方案，以建设绿色医院为目标^[33]。通过系统的优化与设计，将可再生能源与现有常规能源有机结合，实现各类能源的协同高效利用，进一步提升的能源利用效率。该研究不仅为大型医院建筑解决能耗高、运行维护成本高的现实难题提供切实可行的技术路径，同时也为在严寒地区及具有相似气候特征的区域推广和应用此类供暖系统提供理论参考与实践启示。

1.2 国内外研究现状

图 1-3 展示了基于 CiteSpace 软件生成的严寒地区供暖领域关键词共现网络演化图。

从图谱的拓扑来看，“严寒地区”节点具有显著的词频优势与中心性，作为整个只是网络的核心锚点，其辐射效应最为突出。与之紧密耦合的“地源热泵”、“太阳能”及“节能”等高频节点，构成了该研究领域的核心知识骨架。节点间的连线密度与聚类特征清晰地表征了学术界地研究范式：在极寒气候约束下，如何通过可再生能源地多能互补与建筑节能技术地深度融合，实现供暖系统地绿色低碳转型，始终是该领域的核心科学问题与长期演进的主线。

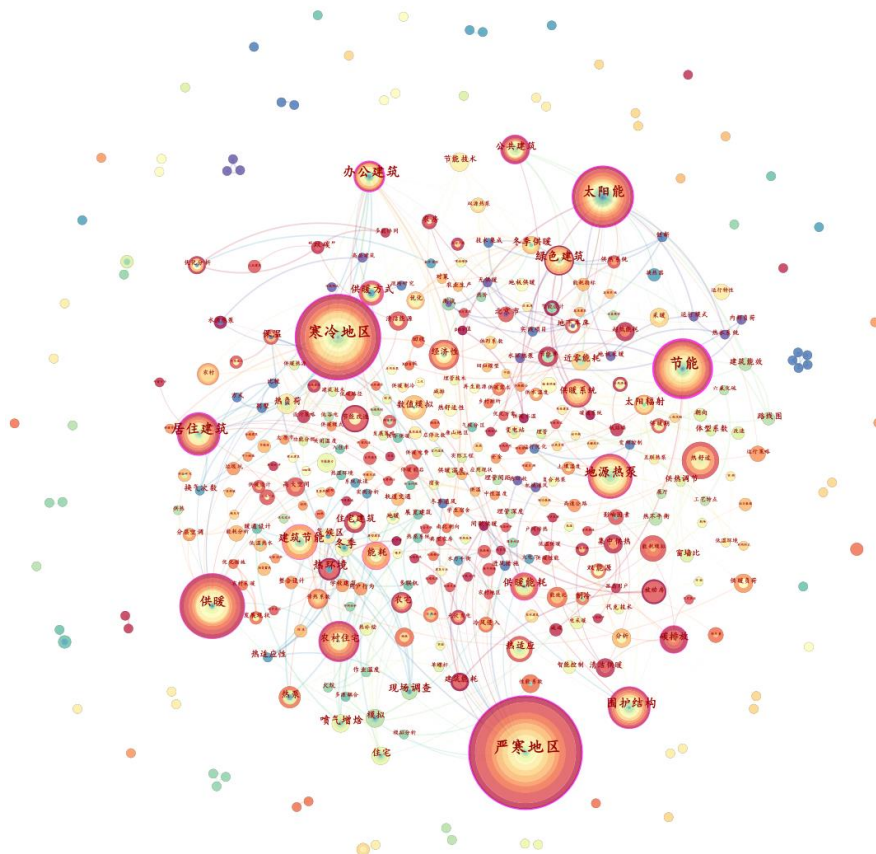


图 1-3 CiteSpace 关键词分析图谱

Figure 1-3 Keywords Analysis Atlas of CiteSpace

在研究对象上，现有成果高度聚焦于居住建筑、农村住宅及常规办公场景，而针对具备高可靠性、高负荷密度特征的医院类特殊公共建筑，其研究节点在知识网络中的占比极低，表现出明显的场景适配性缺位。在技术路径层面，研究范式已完成从“单一能源利用”向“多源协同互补”的深刻转型，太阳能、地热能及空气源热泵等技术与“多能耦合”、“梯级利用”的集成理念实现深度绑定，极端低温环境下的设备能效匹配与动态调度成为核心攻关方向。在研究目标领域，已由单一的能效提升演进为节能、减碳与供能安全的多维协同，尤其是在严寒地区极端气候约束下，系统的抗风险能力与热韧性逐渐成为学术界关注的重点。

1.2.1 多能互补供暖技术研究进展

在全球能源转型与低碳减排的背景下，探索高效的清洁供暖技术已成为国内外学术界关注的焦点。作为关键的绿色能源技术之一，太阳能因其易于获取、安全且成本低廉的优势，已被广泛应用于建筑和工业领域的供暖及发电。然而，由于太阳能本身具有不稳定和间歇性的特点，在某些特定条件下难以持续满足能源需求。

随着清洁能源的快速发展，单一能源已无法满足建筑的供暖需求。因此，国内外越来越多的学者开始整合多种能源，致力于开发多能互补的清洁供暖系统^[34]。这种方法解决了太阳能、地热能、生物质能等单一可再生能源固有的技术挑战一如间歇性、波动性、环境适应性等技术瓶颈，并已成为建筑供暖领域低碳转型的核心研究方向和关键技术路径。

为节约传统能源，国内外学者已开发出多种供暖技术。作为关键的绿色能源技术之一^[35]，太阳能因其易于获取、安全且成本低等优势，已被广泛应用于建筑和工业领域的供暖、发电^[36]。然而，由于太阳能本身具有不稳定性与间歇性的特点，在某些特殊条件下难以持续满足能源需求^[37]。为此，常需要引入其他技术与其结合。热泵作为高效、清洁的低碳供能设备，替代化石燃料可持续发展的重要选择^[38]，在建筑供暖中具有广阔的发展前景^[39]。20世纪50年代 Jordan 和 Threlkeld 率先提出了将太阳能和热泵联合运行的思想^[40]。太阳能辅助热泵系统将聚光集热器或光伏光热组件与热泵及蓄热装置相结合，提高了系统性能系数，减少了晴好时段辅助电力或燃料需求，相较于独立热泵或太阳能系统，可显著提升季节性能因数^[41]。在各种热泵类型中，空气源热泵是当前市场主流产品。在制热过程中，以环境空气为热源，并通过输入电能将其转化为高品位热能。Gu^[42]等人采用太阳能集热器与空气源热泵并联布置的方式展开研究。研究表明，太阳能集热器的热效率可达 63%，空气源热泵的性能系数为 5.03。相比之下，Tolga^[43]等人设计并测试了一种串联耦合的太阳能辅助空气源热泵系统（SAASHP）。与独立运行的空气源热泵相比，该新型系统的性能系数和热效率分别提高了 27.4%和 31.6%。由此可见，SAASHP 系统在不同耦合模式下均能有效提升供暖性能。在严寒地区，众多学者针对 SAASHP 系统在低温工况下的运行性能展开了深入分析。Chen^[44]等人的研究发现，晴天条件下，SAASHP 系统的性能系数可达 4.92，而在极端寒冷天气下该系数会降低至 1.79，雨雪天则降至 2.12，这一现象凸显了此类系统对天气变化的敏感性，以及其在恶劣环境下适应能力的局限性。Cai^[45]等人的研究也得出了相似结论，随着环境温度的降低，太阳能集热器与其周围环境的温差会逐渐增大，进而导致集热器热损失增加，热效率显著下降。

为了解决 SAASHP 系统固有的局限性，Sun^[46]等人提出一种结合太阳能、沼气和空气源热泵的新型混合供暖系统。该系统通过将沼气能源集成到传统 SAASHP 系统中，