

Integrating low-temperature renewables in district energy systems

Guidelines for policy makers

Bertelsen, Nis; Mathiesen, Brian Vad; Djørup, Søren Roth; Schneider, Noémi Cécile Adèle; Paardekooper, Susana; Sánchez García, Luis; Thellufsen, Jakob Zinck; Kapetanakis, John; Angelino, Luca; Kiruja, Jack

Publication date:
2021

Document Version
Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link to publication from Aalborg University](#)

Citation for published version (APA):

Bertelsen, N., Mathiesen, B. V., Djørup, S. R., Schneider, N. C. A., Paardekooper, S., Sánchez García, L., Thellufsen, J. Z., Kapetanakis, J., Angelino, L., & Kiruja, J. (2021). *Integrating low-temperature renewables in district energy systems: Guidelines for policy makers*. International Renewable Energy Agency.

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal -

Take down policy

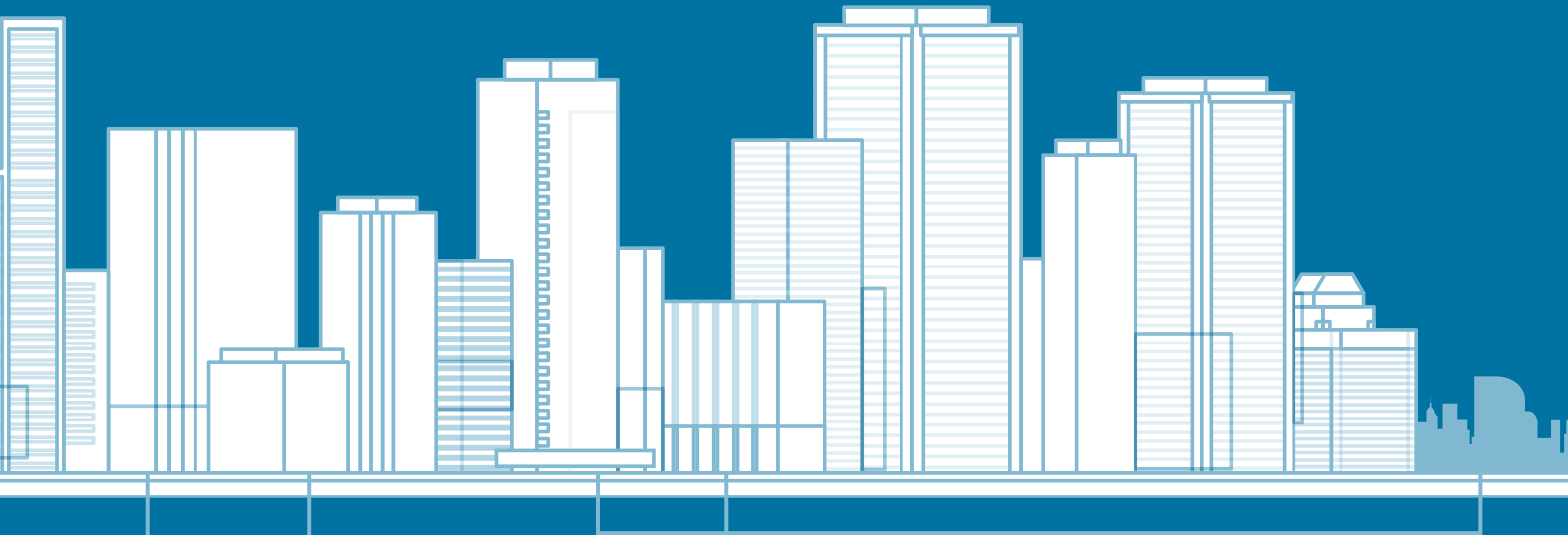
If you believe that this document breaches copyright please contact us at vbn@aub.aau.dk providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.



AALBORG UNIVERSITY
DENMARK

IRENA
International Renewable Energy Agency

将低温可再生能源 整合到区域能源系统



决策者指南



支持单位：



Federal Ministry
for the Environment, Nature Conservation
and Nuclear Safety

除非另有说明，否则本出版物和文中使用的资料均属于国际可再生能源署 (IRENA) 的财产且其版权为 IRENA 所拥有。本出版物中的材料可自由使用、分享、复制、再版、打印和 / 或存储，但需注明其出处源于 IRENA 并载有版权符号 (© IRENA) 和版权年份。本出版物中由第三方提供的资料可能受第三方版权和单独的使用条款和限制的约束，包括与任何商业用途相关的限制。

ISBN: 978-92-9260-318-2

引用：IRENA 和奥尔堡大学 (2021)，“将低温可再生能源整合到区域能源系统：决策者指南”相关的基本内容，国际可再生能源署，奥尔堡大学，阿布扎比，哥本哈根。

本文件为 “*Integrating low-temperature renewables in district energy systems: Guidelines for policy makers*” 的译本 ISBN: 978-92-9260-316-8 (2021)。

如中文译本与英文原版的内容不一致，概以英文版为准。

关于 IRENA

国际可再生能源署 (IRENA) 是一个政府间组织，它为各国向可持续能源未来转型提供支持，并作为国际合作的主要平台、卓越中心以及可再生能源政策、技术、资源和金融知识的信息库。IRENA 推进广泛采用和可持续利用各种形式的可再生能源，包括生物能源、地热、水电、海洋、太阳能和风能，以追求可持续发展、能源获取、能源安全和低碳经济增长和繁荣。 www.irena.org

关于奥尔堡大学

奥尔堡大学建立于 1974 年。奥尔堡大学规划部就包括能源规划在内的多个领域开展了研究。奥尔堡大学规划部的可持续能源规划 (SEP) 研究组开发的跨领域方法将可持续能源计划与技术经济、地理和社会政治进行了全方位结合，现已拥有超过 25 年的经验。 www.en.plan.aau.dk/research+groups/SEP/

致谢

IRENA 对来自 IRENA 和奥尔堡大学的特设专家咨询团队成员（小组成员来自全球地热联盟 (GGA) 和其他与区域供热供冷部门相关的机构）作出的宝贵贡献表示诚挚的谢意。我们收到了以下专家（团队）提供的意见和反馈：Eiríkur Bragason（北极绿色能源公司），Leoni Paolo 和 Ralf-Roman Schmidt（奥地利技术研究所 - 能源中心），Wang Wei-quan（中国能源研究会可再生能源专业委员会 - CREIA），Isabel Cabrita 和 Maria Carla Lourenco（能源与地质总局 - 葡萄牙），Olivier Racle（Engie 集团），Samra Arnaut（Enova - 波斯尼亚），Eloi Piel（Euroheat & Power），Bojan Bogdanovic 和 Greg Gebrail（欧洲复兴开发银行），Catherine Hickson（Geothermal Canada），Christiaan Gischler（美洲开发银行 - IDB），Marit Brommer（国际地热协会 - IGA），Jure Cizman（约瑟夫·斯特凡研究所 - 斯洛文尼亚），Annamaria Nador（匈牙利矿业和地质调查局），Paul Bonnetblanc（生态、可持续发展和能源部长 - 法国），Paul Ramsak（荷兰企业管理局 - RVO），Jón Örn Jónsson（雷克雅未克地热有限公司），Christian Holter（SOLID solar thermal systems 公司），Sebastien Danneels（特伦特河畔斯托克市议会 - 英国），Celia Martinez 和 Zhuolun Chen（联合国环境规划署），Astu Sam Pratiwi 和 Marc Jaxa Rozen（日内瓦大学），Elin Hallgrímsdóttir 和 Joeri Frederik de Wit（世界银行能源部门管理援助计划）及 Emin Selahattin Umdü（亚萨尔大学 - 土耳其）。来自 IRENA 的同事 Fabian Barrera、Yong Chen、Jinlei Feng、Imen Gherboudj、Seungwoo Kang、Paul Komor 和 Toshimasa Masuyama 均给予了宝贵意见。2019 年 12 月，塞尔维亚举办了一场主题为“将低温可再生能源整合至区域供热供冷系统”的活动，其参与者提供的宝贵意见完善了本报告的内容。

若想了解更多研讨会的相关情况，请访问 IRENA 网站：

<https://irena.org/events/2019/Dec/Energy-Solutions-for-Cities-of-the-Future>。

撰稿人：本报告在 Gurbuz Gonul 和 Salvatore Vinci (IRENA) 的指导下，由多位作者撰写，包括 Luca Angelino 和 Jack Kiruja (IRENA)、Nis Bertelsen、Søren Roth Djørup、Luis Sánchez-García、Brian Vad Mathiesen、Susana Paardekooper、Noémi Schneider 以及 Jakob Zinck Thellufsen（奥尔堡大学）。同时我们对 Amjad Abdulla (IRENA) 提供的宝贵意见表示诚挚谢意。

IKI 支持：

本报告是“未来城市能源解决方案”项目的一部分，该项目得到了国际气候倡议 (IKI) 的支持。德国联邦环境、自然保护与核安全部 (BMU) 基于一项德国联邦议院决议为该项计划提供支持。

如需了解更多信息或提供反馈，请访问：publications@irena.org

本报告下载网址：www.irena.org/publications 和 <https://vbn.aau.dk/>

免责声明

本出版物及文中所使用的资料均按“原样”提供。

IRENA 已经采取了所有合理的措施，以验证本出版物中材料的可靠性。IRENA 及其官员、代理人、数据或其他第三方内容提供者或许可方均不对此类材料的准确性、完整性、特定用途及适用性或不侵犯第三方权利作出任何担保，且对于本出版物或其中的材料使用不承担任何责任或法律责任。

本文件所含材料不一定代表 IRENA 成员的观点，也不代表对任何项目、产品或服务提供商的认可。本文件中使用的名称和出现的材料并不意味着 IRENA 对任何地区、国家、领土、城市或地区或其当局的法律地位，或对其边境或边界的划定发表任何意见。

将低温可再生能源 整合到区域能源系统

决策者指南

目 录

图片	6
表格	7
文本框	8
照片	8
缩写	9
执行摘要	11
简介	14

A 部分：

供热供冷部门概述 21

A.1	迈向供热供冷部门脱碳：释放能源效率、区域能源和可再生能源潜力	22
A.1.1	供热供冷问题迫切需要解决	23
A.1.2	未来能源系统和可持续供热（供冷）	26
A.2	DHC 的可再生能源来源和关键使能技术概述	31
A.2.1	区域供热的可再生能源（和余热）来源和技术	31
A.2.2	用于区域供冷的可再生能源	37
A.2.3	关键使能技术	38

B 部分：

低温区域能源系统决策者指南

46

B.1	制定战略性供热供冷规划	47	B.4	将低温供应整合到现有建筑和区域供热网络	78
B.1.1	需要相互促进的国家、地区和地方行动	47	B.4.1	评估与现有建筑存量的兼容性	78
B.1.2	通过战略性供热供冷规划建立可持续能源供应	49	B.4.2	评估与现有热网的兼容性	84
B.1.3	定义战略性供热供冷规划的范围和目的	51	B.5	应对低温能源开发中的技术挑战	87
B.2	利益相关者参与	55	B.5.1	地热能	87
B.2.1	识别和协调利益相关者	55	B.5.2	太阳热能	90
B.3	供热（供冷）需求与能源资源的评估与匹配	62	B.5.3	余热能	91
B.3.1	供热供冷需求的匹配	63	B.5.4	自然冷却	91
B.3.2	确定当地热资源	66	B.6	启用监管条件、融资和业务模式	93
B.3.3	量化评估热能节能潜力与可持续供应能力	73	B.6.1	所有权结构	94
B.3.4	建立供热情景	75	B.6.2	DHC 系统供应定价	97
			B.6.3	监管	98
			B.6.4	融资	102
	检查清单	111			
	参考文献	112			

图片

图 ES1: 将低温能源整合至区域能源系统的框架示意图 13

图 1: 采用可再生能源的区域能源系统有助于实现可持续发展目标 15

图 2: 使用多种能源的区域供热系统示意图 16

图 3: 区域能源技术的演变、运行温度和能源示例 17

图 4: 本指南的结构 20

图 5: 2014 年至 2019 年按类型划分的可再生能源监管激励措施和强制性规定的数量 23

图 6: 建筑在未来具有成本效益的可持续能源系统中发挥重要作用的三大要素 25

图 7: 2019 年全球住宅和服务部门建筑中按技术分类的供热设备估计比例（不包括传统使用的生物质能） 25

图 8: 2017 年以及“2050 年能源转型情景”中按能源载体分类的最终能源消耗总量分解 27

图 9: 智能能源系统中部门与技术之间的相互作用 27

图 10: 从以化石燃料为基础的单体供热到第四代区域供热的转型途径 28

图 11: 14 个欧洲国家 / 地区总能源系统成本中区域供热（占欧盟供热总需求的 90%）和节能的协同作用 29

图 12: 废弃煤矿：西班牙阿斯图里亚斯 Barredo Colliery 区域供热项目（米耶雷斯） 32

图 13: 丹麦屋顶和地面太阳能装置成本 ... 34

图 14: 巴黎（法国）区域供冷网络 38

图 15: 压缩式热泵的工作原理 39

图 16: 吸收式热泵的工作原理 40

图 17: 各种可再生和低碳热源之间的供应竞争以及旨在克服竞争的季节性储存潜力 ... 42

图 18: 季节性蓄热概念 43

图 19: 季节性储能成本 44

图 20: 各种城市环境中区域能源网的应用 50

图 21: 基于影响和感兴趣程度的利益相关者分类..... 55

图 22: 输热成本 62

图 23: 多能源区域能源系统示意图..... 66

图 24: 使用蓄热的混合式区域供热系统每日产热示例..... 67

图 25: 美国洛杉矶县屋顶太阳能地图应用程序..... 71

图 26: 评估可行的节能水平方法 73

图 27: 从一次能源到有用能源的能效价值链..... 74

图 28: 直接和间接空间供热系统示意图 ... 79

图 29: 保温效果不佳的公寓在不同供热时间所需的供热功率 81

图 30: 整栋建筑（左）和单套公寓（右）的 DHW 制备..... 83

图 31: 将低温网络整合到传统网络中的混合分流器示意图..... 85

图 32: 在国家和国际法规背景下进行本地 / 战略供热规划并协调多种利益与需求 93

图 33: 区域能源网络：连接供应装置与消费者的重要基础设施..... 94

图 34: 高 IRR 和低 IRR 下的区域供热开发示例..... 103

图 35: 风险缓解方案与地热市场成熟度的关系..... 105

图 36: 形成区域供热治理方案的因素..... 109

表 格

表 1: 能源系统中可再生能源、余热源和使用能技术的主要优势和作用 45

表 2: 用于匹配供热规划公共监管框架的矩阵模型..... 48

表 3: 可能涉及的利益相关者在 SHCP 中扮演的角色及其参与策略 56

表 4: 新一代区域供热开发方案以及系统要素的潜在修改需求 74

表 5: 直接和间接换热站的优缺点 79

表 6: DHC 系统中开发低温可再生能源或余热能源面临的主要挑战及潜在解决方案 92

文本框

文本框 1: 奥尔堡（丹麦）：“奥尔堡 2050 年能源愿景”	52
文本框 2: 中国郑州：新区的战略性热能规划	53
文本框 3: 主要利益相关者的作用	58
文本框 4: 德国大盖劳：成功的利益相关者参与策略.....	60
文本框 5: 用于初步研究的公开数据：瑞士案例.....	64
文本框 6: 供热和供冷需求匹配工具	65
文本框 7: 地热资源利用潜力评估工具	70
文本框 8: 太阳热能资源利用潜力评估工具	71

文本框 9: 余热资源利用潜力评估工具	72
文本框 10: 区域供热供冷规划工具	76
文本框 11: 级联：法国巴黎的多温度地热区域供热系统	89
文本框 12: 所有权模型的部分示例	96
文本框 13: GeoDH 项目地热区域供热监管框架的关键建议	100
文本框 14: 中国济南	104
文本框 15: EBRD 的西巴尔干计划中的可再生区域能源系统	105
文本框 16: 地热风险缓解计划	106
文本框 17: 开发可盈利的可再生能源项目：IRENA Project Navigator.....	108

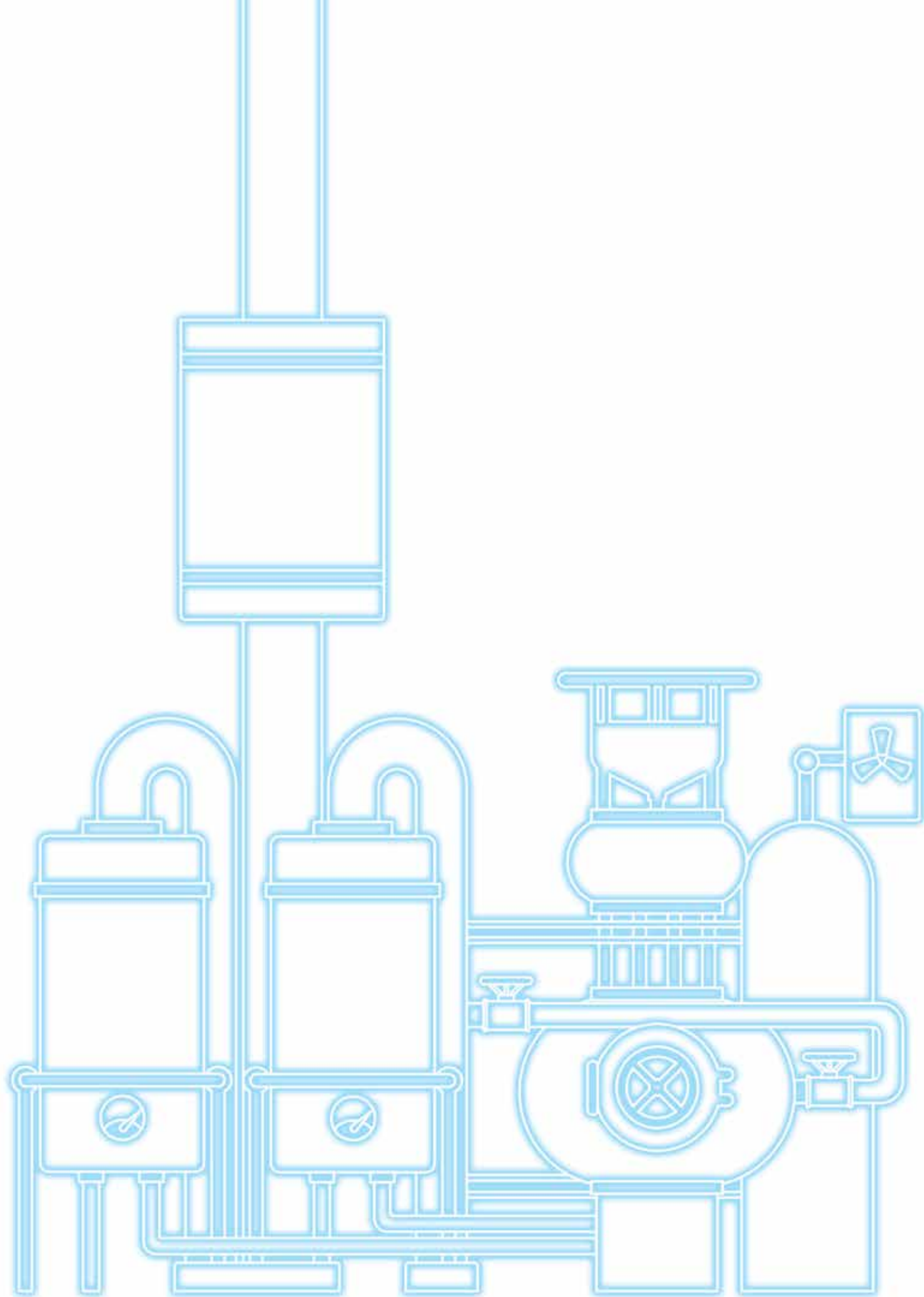
照片

照片 1: 蒙古的空气污染	22
照片 2: 丹麦 Løgumkloster 配置平板集热器的太阳能发电厂（左）和丹麦 Brønderslev 配置槽型抛物面 CSP 的太阳能发电厂（右）	34
照片 3: 丹麦区域供热系统中的压缩式热泵	40
照片 4: 丹麦哥本哈根 AvedøreKraftværket 的蓄热装置 (44,000 m ³)	41

照片 5: 比利时燃气锅炉房中的燃气锅炉（左）和某建筑中的换热站（右）	79
照片 6: 用于 DHW 制备的水罐（左）和板式热交换器（右）示例	83
照片 7: 美国亚利桑那州斯科茨代尔太阳能区域供冷设备（左）和奥地利格拉茨 Fernheizwerk 的部分集热器场（右）	90

缩写

AAU	奥尔堡大学	km	千米
ATES	含水层蓄热系统	km²	平方千米
BTES	埋管蓄热系统	kW	千瓦
CHP	热电联产	m²	平方米
CSP	聚光太阳能热发电	m³	立方米
°C	摄氏度	mm	毫米
CO₂	二氧化碳	MTES	矿井蓄热系统
CoP	性能系数	MW	兆瓦
DHC	区域供热供冷	Mwh	兆瓦时
DHW	家用热水	O&M	运营和维护
EBRD	欧洲复兴开发银行	PETA	泛欧热图集
EJ	艾焦	PPP	公私合作伙伴关系
ESCO	能源服务公司	PTES	基坑蓄热系统
EU	欧盟	ReDEWeB	西巴尔干半岛的可再生区域能源系统
EUR	欧元	REN21	21 世纪可再生能源政策网
GHG	温室气体	SEP	战略性能源规划
GIS	地理信息系统	SHCP	战略性供热供冷规划
GJ	吉焦	SITG	地域信息系统门户网站（日内瓦）
Gwh	吉瓦时	TES	蓄热
HFC	氢氟烃	THERMOS	热能资源建模与优化系统
hm³	立方百米	TRV	恒温散热器阀
IEA	国际能源署	TWh	太瓦时
IRENA	国际可再生能源署	USD	美元
IRR	内部收益率		



执行摘要

减少供热供冷部门的碳排放量对于缓解气候变化和减少空气污染至关重要。因此，区域供热供冷系统可以按照一定比例增加可再生能源的使用率，提高能源效率、降低供热供冷部门化石燃料的使用率，优化城市空气质量。

传统模式中，区域供热系统需在高温环境下运行，以满足保温性能较差的建筑的高热量需求。在大多数情况下，只有使用化石燃料才能达到所需的高温。然而，科技创新和数字化的发展以及当今世界的节能建筑转型浪潮，使得广泛部署清洁能源技术成为大势所趋，例如新一代区域能源系统中的低温地热能、太阳热能、水源热能以及低温余热能源。许多区域的地方级机构均可广泛利用这些资源。不过，由于无法立即与目前的区域能源基础设施和现有建筑相兼容，这些技术仍然具有极大的开发空间。

区域能源系统中的低温可再生能源和可持续余热能源的利用存在许多障碍，包括：

- 数据匮乏
- 知识储备量不够充足，对最佳技术不了解
- 与建筑改造策略的脱节
- 与化石能源供热系统或电力供冷系统存在的不公平竞争
- 高昂的前期成本
- 市级政府的财政预算有限
- 监管不到位且审批程序繁琐

在此背景下，本指南列举了可用工具和解决方案的示例，以提高低温可再生热源在新兴和既有区域能源系统中的使用率，为决策者提供了有益的指导方针。除此之外，本指南还概述了采用低温可再生能源发展区域供热供冷及使能技术的应用。本指南重点介绍了在低温环境下利用太阳热能、地热能和水体能量的能源系统和热泵支持系统。在区域供热中，生物质能是一种举足轻重的可再生能源，其现有的相关基础设施也在高温条件下运行，不存在重大的技术整合问题。因此，本报告不会重点介绍将生物质能整合至区域供热系统的过程。

主要建议如下：

以明确的政治驱动因素为基础，制定供热供冷战略规划，并确保主要利益相关者全程参与。尽管该过程可由地方主管部门牵头，但仍需国家政府提供关键支持，以制定宏伟的目标和支持框架。

- ➔ 对于国家层面来说，制定适当的管理和监管框架、确定整个能源系统的实施方向以及发挥区域能源在脱碳和可持续发展中的作用十分重要。
- ➔ 提升劳动者的必要技能，包括他们需掌握的与可再生能源技术和某些市场上与区域能源基础设施现代化改造相关的知识。
- ➔ 制定因地制宜的供热供冷战略规划，确定参与这一过程的利益相关者及其参与原因，以及让其参与这一过程的方法。
- ➔ 提高公众对于低碳供热供冷技术的接纳度，实施基于可再生能源的区域能源项目。该目标可以通过全民参与和透明化流程实现，使公众进一步了解区域能源系统和可再生能源的优势所在。

根据供热供冷的需求和资源分布情况，制定详细的技术方案。

- ➔ 实地测量建筑物的各种数据或借助既有工具对建筑物进行自上而下 / 自下而上的建模以预估其需求，扩展供热供冷需求数据的收集范围。
- ➔ 借助地理信息系统等既有工具或通过绘制热资源分布图册，评估建筑物供热供冷中可利用的热资源。可充分利用从这些工具中获得的信息支持区域能源系统的规划和投资。
- ➔ 确保针对供热供冷开发提出的情景符合长期目标。

整合供应变化、管网现代化技术和建筑改造计划，使技术性能和社会经济效益均达到最佳水平，并避免产生锁定效应和脱节的情况。

- ➔ 协调区域能源和节能建筑的发展，并构建其协同效应的形成机制。例如，制定近邻计划，在需求侧和供应侧同时实施节能措施。大力提倡节能措施，逐步转向对所有消费者实行以用量为基础的计费方式。
- ➔ 采取措施降低现有居民区中已投入运行的原有系统和新型区域供热网络的运行温度。此目标可从两方面着手：i) 在建筑物方面，可通过引入控制系统、重新设计供热设备、改造为节能型建筑物围护结构以及重新设计家用热水系统和换热站等来实现此目标；ii) 在管道网络方面，通过采取管道保温措施、采用增温技术、采取措施降低回水温度、避免因高流量而造成网络损坏等来实现此目标。

解决根深蒂固的问题，推行利用当地的可再生能源进行供热供冷。

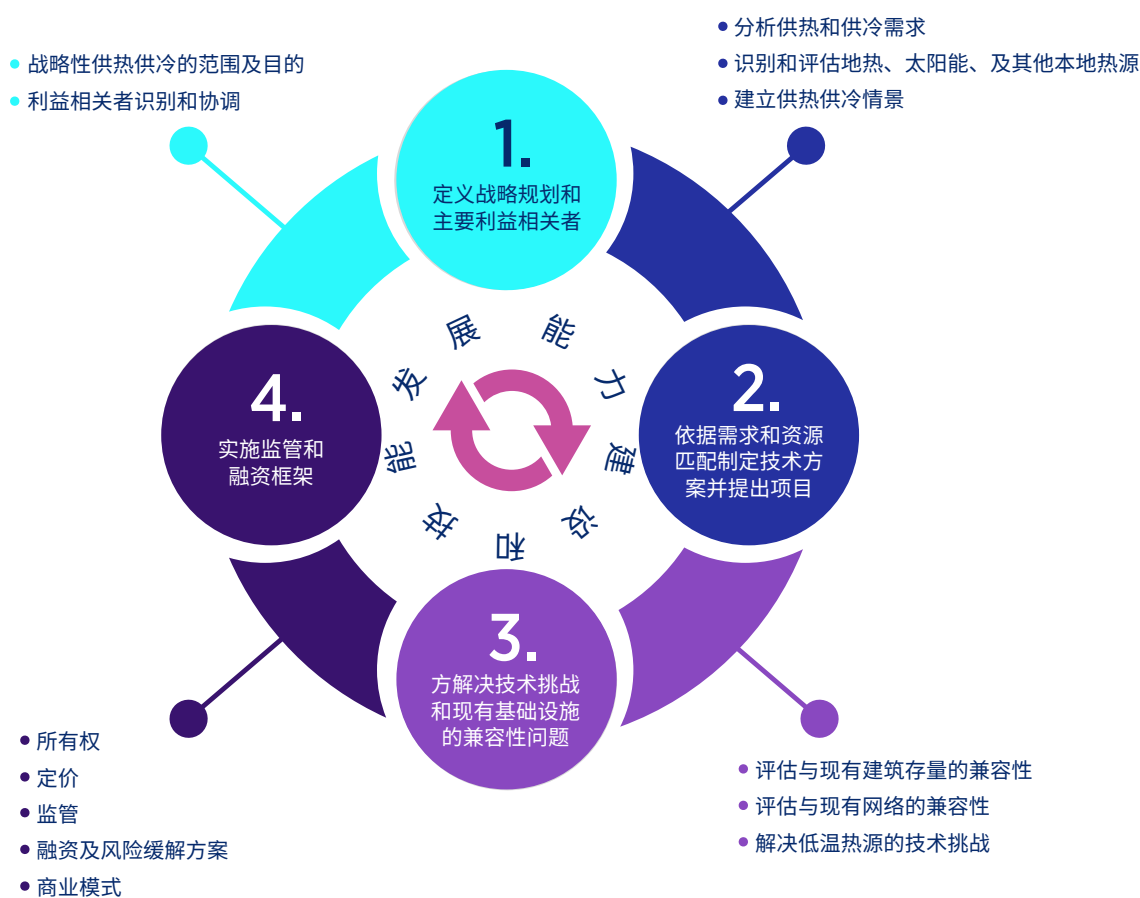
- ➔ 加强建设能力，合理开发可再生能源项目，并在将低温能源整合至新的或既有的区域能源系统的过程中，积极应对存在的技术挑战。
- ➔ 务必遵守当地利用可再生能源的最佳实践，从而最大程度提升成本效益和资源可持续利用率。例如，地热回灌或季节性太阳能储能。

提供支持性的监管条件、扶持融资方案和商业模式，并确保这些措施落实到位。

- ➔ 将区域能源网络划分为公共基础设施，并借助财政杠杆实施立法与价格监管等机制，确保公平的竞争环境，同时也需考虑温室气体排放或空气污染物等产生的外部效应。

- ➔ 率先付诸行动，与高需求消费者对接以吸引投资，这不仅能够克服与供热供冷需求相关的不确定性，还能确保充分挖掘潜力。
- ➔ 除了寻求公共财政资金支持（包括资助），还需深入调查私营部门的参与程度和创新实践，例如与能源服务公司 (ESCO) 建立合作伙伴关系或发起众筹项目。
- ➔ 制定计划，降低可再生能源应用的风险。例如，完善根据市场成熟度制定的地热能支持计划，降低投资者钻探低产能地热井的可能性和 / 或减少投资者面临地热井产能下降的风险。
- ➔ 通过制定所有权方案并出台监管和定价机制，建立全面透明的管理方案，推广区域供热供冷系统。同时确保这些系统能够以可再生能源和余热能源为基础运行，并与社会目标保持一致。

图 ES1：将低温能源整合至区域能源系统的框架示意图



引言

空气污染、能源贫困、健康风险、对波动性碳氢化合物市场的成本依赖性以及气候变化 - 这些只是与当前城市使用的化石能源系统相关的部分挑战，而城市化的快速发展可能会导致这些问题进一步加剧。

供热是全球能源使用最多的形式，占最终能源需求的一半以上。建筑供热和家庭热水供应约占总生产热能的一半（国际能源署 (IEA)，2019a）。这些能量绝大部分通过化石燃料燃烧获得，因而建筑部门成为温室气体 (GHG) 排放、空气污染和相关健康影响的重要因素，现已成为全球众多城市关注的主要问题。供冷方面，当前全球范围内的供冷需求正在迅速增长。新兴国家 / 地区（例如气候温暖的地区 / 地区）通常在空间供冷方面有较高需求，例如东南亚、非洲、印度和中国等。因此，供热供冷部门需要采取紧急行动。对于城市而言更是如此。如今，全球约一半人口 (55%) 居住在城市地区，到 2050 年这一趋势预计将上升至 68%（联合国，2019 年）。

好消息是，该部门能够实现脱碳。建筑在提高能源效率以及从供应层面转换为可再生能源和可持续能源方面极具潜力。区域能源系统可以增加可再生能源的应用、提高能源效率、避免能源贫困、减少化石燃料的使用及供热供冷部门的 CO₂ 和氢氟碳化物 (HFC) 排放。这些举措有助于供热供冷部门达到由《巴黎协定》（联合国，2015 年）和《蒙特利尔议定书》基加利修正案（联合国，2016 年）设定的人口密集地区（城市地区）供热供冷部门的减排目标。

部分地区的区域供热系统已经实现高效运行。斯堪的纳维亚半岛利用聚合多种热负荷逐步优化能源供应。这可以通过热电联产 (CHP) 和 / 或利用工业余热实现 (GalindoFernández 等人，2016 年)。但是，降低区域供热的碳强度仍需极大努力。尽管部分地区的生物能源和（高温和中温）地热资源在供热供冷方面发挥着重要作用，但可再生能源在全球区域供热中所占的整体比例仍然很小。2018 年，区域供热中使用可再生能源比例不到 8%（IEA，2019b）。

通过区域供热供冷 (DHC) 扩大对可再生能源或可持续余热能的利用，有助于实现联合国 (UN) 2015 年通过的可持续发展目标¹（UN，2015 年），包括减少空气污染、增加更清洁和更实惠的能源技术的使用、创造当地就业机会、发展可持续的基础设施以及减少温室气体排放等（图 1）。

技术创新、朝着更加节能的建筑迈进这一趋势以及新一代区域能源网络的发展可能促使低温可再生能源（例如地热能和太阳能以及来自工业（或商业）的余热能）得到更广泛的部署。在许多地区，这些资源可在当地大规模获取，但由于人们认为它与区域能源基础设施和大多数现有建筑并不兼容，因此当前大多资源尚未开发。

¹ 联合国 2030 年可持续发展目标包括 17 个目标，希望通过应对贫困、不平等、气候变化、环境退化、和平与正义相关的全球挑战以实现更好、更加可持续和包容的未来。

图 1：采用可再生能源的区域能源系统有助于实现可持续发展目标



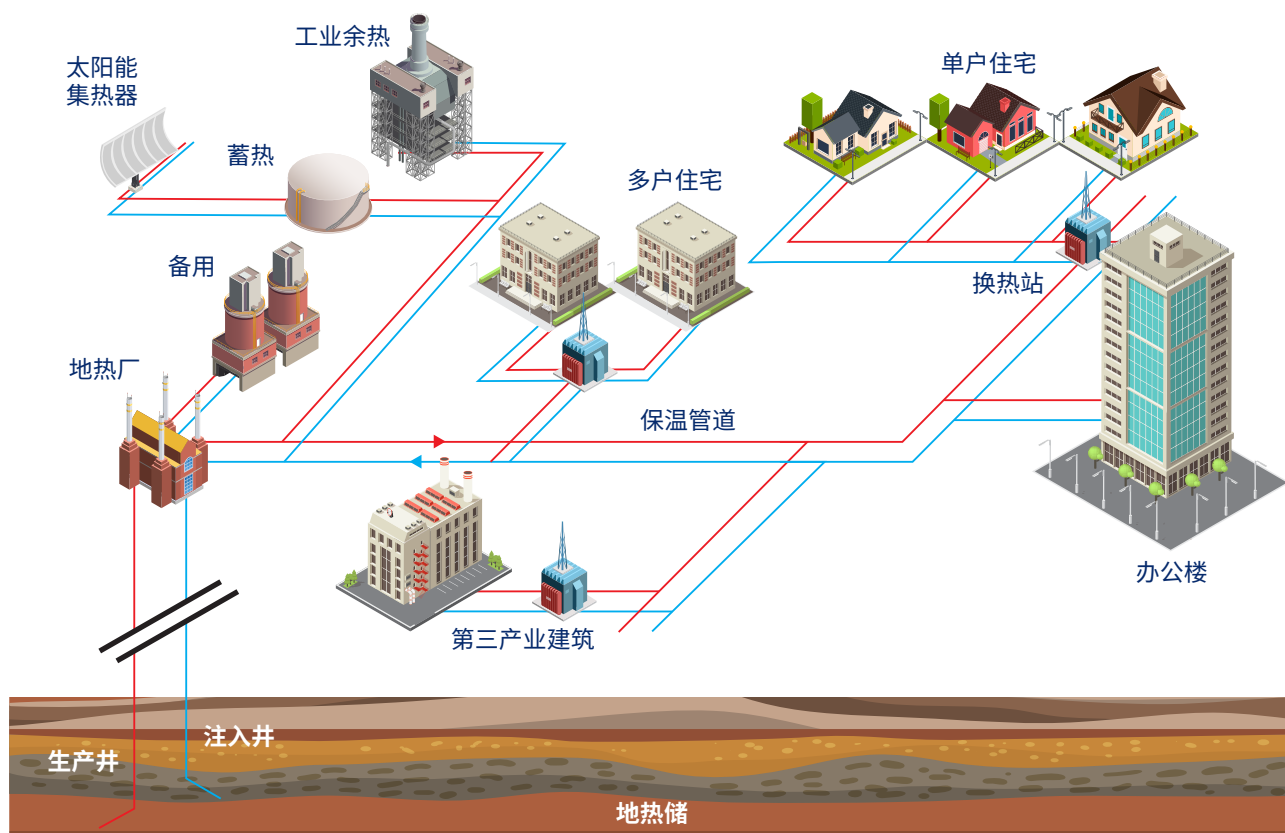
向整合智能化的电网、热网和燃气网的可再生能源和智能能源系统转型需要通过支持性框架（包括创新的规划实践和支持工具）开发与脱碳能源系统兼容、可盈利的项目。

为此，本指南旨在增强决策者对最佳实践和可用方案的了解，以应对将可再生能源和低温可持续余热资源整合至 DHC 系统的关键挑战。本研究在“未来城市能源解决方案”项目框架下进行，并通过由全球地热联盟支持下作为国际可再生能源署 (IRENA) 和奥尔堡大学 (AAU) 的合作项目实施。²

² www.globalgeothermalalliance.org/

“节能建筑和新一代区域能源网络可以利用低温可再生资源实现区域供热”

图 2：使用多种能源的区域供热系统示意图



注： 这些仅为区域供热网络可能的能源示例。

范围和基本原理

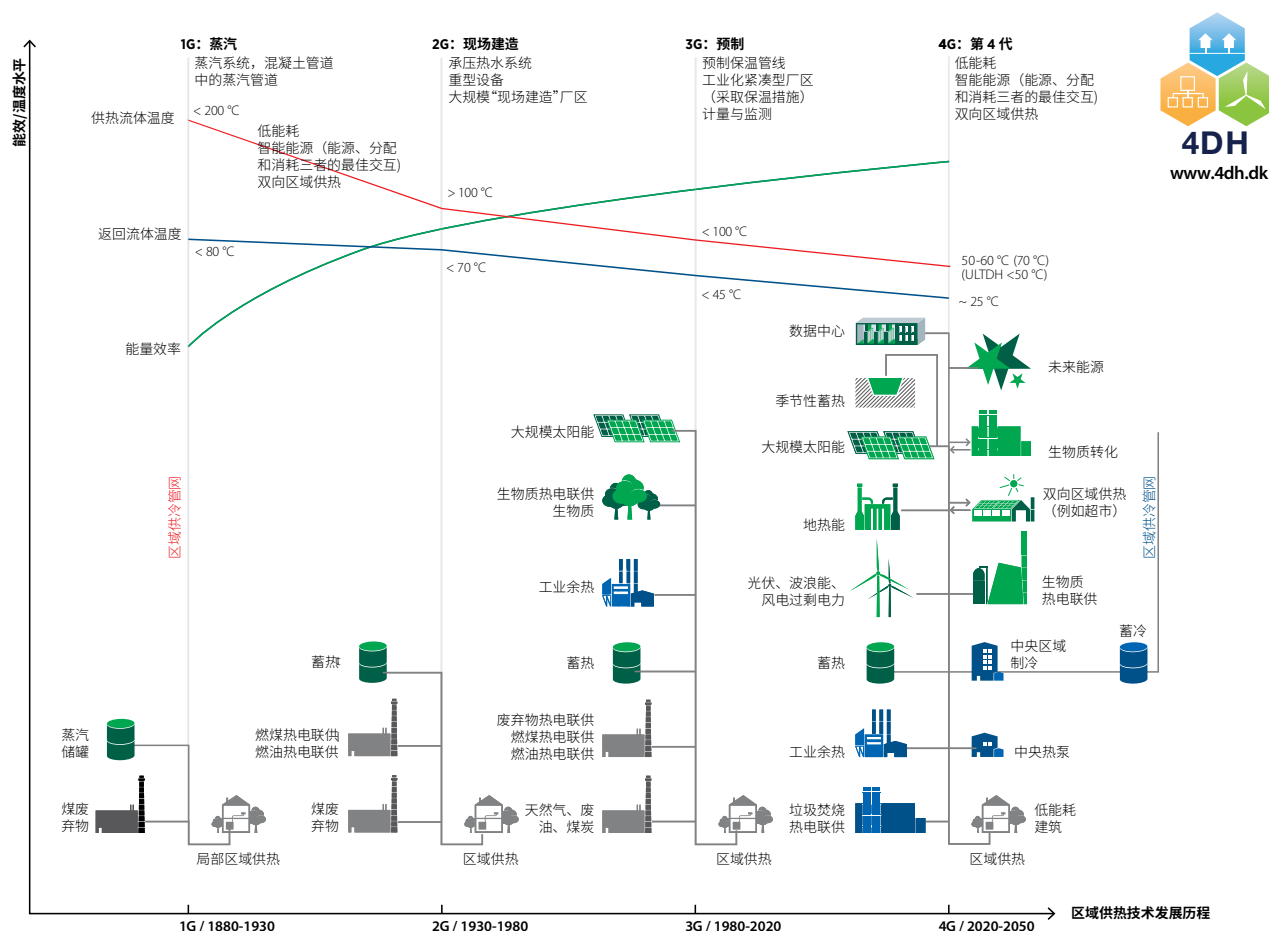
区域供热或热网是一个热能分配系统。热能在一个（或几个）中央（或分散）地点生产，并通过隔热输配管道网络和辅助设备传输。该系统可满足住宅和商业建筑的空间供热和生活热水（DHW）需求。图 2 为使用多种能源和技术的分散式区域供热系统示例，包括：太阳能、中温地热资源、工业余热、备用锅炉和季节性储能。其他可以使用的技术包括热电联产、热泵和服务部门的余热等。

区域供冷可以看作逆向热网，其运行原理与区域供热原理大致相同。区域供冷将冷却水分配给住宅、商业建筑以及办公室和工厂。

区域能源网络的主要优势在于它们可以利用不适用于独立供热系统的热源和冷源。区域能源网络可以从锅炉、热电联产、热泵、季节性储能或可再生资源（例如地热能或太阳能）中获取能源用于供热供冷。这提高了区域能源的发电效率，并促进利用了工业或服务部门的余热。

智能能源系统可以更有效地开发 100% 的可再生能源系统。这些系统背后的主要原理是通过整合电网、热网和燃气网以实现各部门之间的共同利益，并实施具有成本效益的储能解决方案（H. Lund 等人，2017 年）。为了实现智能能源系统，所有能源相关部门（包括电力、供热、工业和运输）都被视为能源系统的一部分，通过整合以利用各部门之间现有的协同作用。区域能源系统是此类智能能源系统中必不可少的一环（Mathiesen 等人，2019 年）。

图 3：区域能源技术的演变、运行温度和能源示例



注：1G：第一代区域供热系统；2G：第二代区域供热系统；3G：第二代区域供热系统；4G：第四代区域供热系统；CHP：热电联产。

来源：Lund 等人（2018 年）

如图 3 所示，后续一代 DHC 技术的发展提高了效率并使用了更低的供应温度。第一代区域供热系统的特征为蒸汽高温供热，第二代系统使用承压热水，而第三代和第四代系统则在越来越低的分配温度下运行。这一趋势为更好地利用可再生能源和回收的低温热能铺平了道路。例如第二代系统只能使用高温地热能，第三代系统可以使用低温地热能，而第四代区域供热系统则可以使用超低温地热能。

区域供冷系统的技术发展如下：第一代系统使用制冷剂作为分配流体，第二代系统开始使用水作为分配流体，从而导致了潜在的更高供应温度和更多的可用能

源（Lund 等人，2018 年）。这一趋势甚至有助于供热 / 供冷季节分离的国家 / 地区共享区域供热供冷分配网络。

“低温”不是指绝对的特定温度范围，而是取决于所考虑的能源或指区域能源网中的温度设定。

在给定城市或区域中，各种不同当地热源无法在区域供热网络中实现相同的运行温度范围。

燃料 - 化石（如天然气）或可再生能源（如生物能源）的温度可达到几百摄氏度，因此能够轻易将载热体的温度提高到 100°C（摄氏度）。相反，诸如浅层地热能或非传统余热回收（例如通过数据中心供冷获得的热能）等来源则难以达到这样的温度。太阳能、工业余热、大型热泵等温度处于中等范围。热网的运行温度越低，可利用能源的范围就越广，实现脱碳和利用清洁能源的潜力也就越大。

就本指南而言，术语“低温”是指能源的温度范围。本指南将低于 100°C 的能源视为低温能源，因为它们可以用于第三代或第四代区域能源系统，同时这也是本指南的关注重点。

不同国家、地区和城市之间使用的 DHC 系统存在很大差异。某些城市的区域能源系统继承自 19 世纪，而另一些城市的区域能源系统则是近期使用最先进的技术建造而成。某些地区的大多数城市（例如部分北欧和东欧国家 / 地区、俄罗斯联邦以及中国北部）当前已实施较高的区域供热比例。因此，全球存在各种类型的区域供热市场：新兴市场（例如英国和荷兰）、老一代传统区域供热系统市场（例如东欧、中国）以及成熟且正在扩展的市场。区域供冷市场广阔且增长迅速，海湾阿拉伯国家合作委员会地区更是如此。

但全球范围内用于空间供热供冷的绝大部分能源由建筑中的独立系统提供，只有一小部分是由区域能源系统提供的（Werner, 2017 年）。此外，现有的区域供热系统主要利用化石燃料产生热能和冷能，这导致了高碳排放。这些化石燃料的燃烧过程还会产生较多颗粒物，引发空气污染及相关的健康问题。

为了在未来（可再生）可持续能源系统中发挥作用，DHC 系统需要：

- 利用低温资源为现有的、新建的和翻新的建筑供热及供冷
- 确保输配网络中较低的热能损失
- 整合可再生热源（例如太阳能、地热能以及低温余热能）

- 成为整合波动性可再生能源并提高能源效率的智能能源系统的组成部分
- 开发时需要考虑当地的能源规划、政策方案及系统成本
- 为未来可持续能源系统的发展做出贡献（Lund 等人，2018 年）。

供热供冷的局部性及分散性使该部门情况较为复杂；因此，有效的国家政策制定面临一定挑战。此外，供热供冷部门的这种特殊性也使得地方政府能够在其中发挥重要作用。他们可通过不同方法发展区域能源系统：包括城市和能源规划、制定适当法规、提供或保证资金、提供区域能源基础设施和服务以及促进区域能源与公共建筑的连接。

尽管区域能源规划具有局部性，但应从地区和国家层面着手协调，以实现更广泛的社会目标。因此，本指南将介绍最佳实践以及可用的工具和解决方案，使得国家和地方政府可根据不同情况应用这些方法，以将低温可再生能源整合到全新和现有的 DHC 系统中，同时还要考虑到不同地方的情况和国家框架。

本指南旨在补充合作伙伴之前编写的报告，例如由联合国环境规划署（UNEP，2015 年）发布的“城市区域能源倡议”中的一份报告，以及其他可在参考资料部分找到的报告。此外，本指南还希望在发达和新兴区域供热供冷市场之间分享各种见解及最佳实践。

“区域能源规划本质上是地方性的，但需要在地区和国家层面与更广泛的社会目标协调，”

方法论

本研究基于：

- 文献综述，包括之前 IRENA 和 AAU 针对区域能源和未来能源系统的相关研究
- 在中型城市（人口 3 万至 1 百万）区域能源项目和系统案例进行的一系列研究，这也是“未来城市能源解决方案”项目的重点
- 向来自政府、行业、学术界、政府间组织和多边开发银行的专家顾问小组进行的咨询。

通过使用这些方法以最全面和最具体的方式确定如何克服挑战，并为整合低温可再生能源至 DHC 提供可行的解决方案。

能源部门制度层面的多样性以及各国在国家、地区和地方各级之间的能力差异限制了实施本指南中全球性指导方针时的细致程度。但是，由此可以得出低温可再生能源和区域能源技术所面临的某些常见挑战。已根据关键主题对这些挑战进行分类并提出解决方法。

本指南的结构如图 4 所示。

本指南 A 部分“供热供冷部门概述”分为两节。A 部分第 1 节旨在说明全球供热供冷部门所面临的挑战，以及使用低温可再生能源和余热能源的现代 DHC 网络如何在向可再生能源系统转型中发挥关键作用。

A 部分第 2 节概述了 DHC 和使能技术中的可再生能源应用。

B 部分“低温区域能源系统决策者指南”分为六节。B 部分第 1 节提出了一个战略性供热供冷规划方法模型，并将其作为增加 DHC 系统中可再生能源比例的第一步。

B 部分第 2 节详细介绍了推动利益相关者参与战略性供热供冷规划流程以及 DHC 项目开发的良好实践。

B 部分第 3 节介绍了国家、地区和地方各级在评估供热供冷需求、绘制和量化能源资源以及建立可持续供热（包括 DHC 中的低温能源）技术方案等方面所面临的挑战、选择和工具。

B 部分第 4 节描述了将低温供应整合到现有建筑和区域网络时所面临的主要技术挑战。

B 部分第 5 节重点介绍了一些方案，旨在克服 DHC 中地热能、太阳热能和余热能的整合及运行等主要挑战。

最后，B 部分第 6 节探讨了 DHC 系统的监管、定价、融资及商业模式的不同方案。

图 4：本指南的结构





A

部分：

供热供冷部门概述

本部分概述了供热供冷部门的情况，该部门当前主要使用化石燃料，因而导致了空气污染和温室气体排放。将针对影响当前能源系统向可持续性转型的因素进行讨论并重点关注未来能源系统的愿景。通过结合利用当地现有的可再生能源（和余热）促进能源系统转型。

A.1 迈向供热供冷部门脱碳：充分释放能源效率、区域能源系统和可再生能源的潜力

如引言部分所述，供热供冷行业至关重要但又严重依赖化石燃料。但是，该行业具备极大的脱碳潜力。有多种途径可促使供热供冷供应系统脱碳。不仅可从需求侧（例如通过改造和优化技术建筑系统减少建筑供热需求）入手利用各种途径（包括多种应用措施的组合）实现脱碳，还可从供应侧促成这一目标的实现。

一种途径是将城市地区从基于化石燃料或效率低下的电加热器和空调装置等独立供热供冷系统转型到 DHC 系统。这有助于提高能源效率、充分利用可再生能源或余热、同时减少供热供冷部门化石燃料的使用。

地方主管部门在推动能源转型方面的作用也正日益增强。联合国称，预计到 2050 年全球城市人口数量将达到总人口的三分之二（联合国，2019 年）。城市化水平至关重要，因为 2018 年城市占全球能源需求的 60-80%，而城市碳排放量占人为碳排放量的 70%（联合国人居署，2019 年）。另外，供热需求高峰时期，区域能源系统和独立能源系统都使用化石燃料生产能源用于 DHW 和空间供热与供冷，这导致了严重的局部污染，就像蒙古国乌兰巴托等城市一样。（见照片 1）（世界卫生组织（World Health Organisation），2019 年）。

因为城市的能源消耗巨大，当地决策部门可以据此行使权力作出重大影响。例如，他们可能会鼓励建筑行业利用可再生能源，并采用高效的集中式区域能源系统（可以使用可再生能源并储存热能以供未来使用）（IRENA，2019b）。

为了更好地理解可再生 DHC 系统在能源系统脱碳中的作用，本指南的这一部分简要介绍了全球供热供冷部门相关的最新知识。之后针对客户端提高能源性能的能效潜力做了概述，并介绍了如何根据新一代使用低温能源的 DHC 系统发展潜力对供热系统进行重新设计。

照片 1：蒙古的空气污染



来源：Shutterstock

A.1.1 迫切需要解决 - 供热供冷问题

热需求及资源的地方性和时间性使得供热供冷分析变得复杂。此外，传统的能源平衡表以及最终能源需求相关的已有的统计和数据无法提供与终端用途（如供热供冷）相关的详细信息。与其他系统相比，时空分析数据和方法的缺乏不利于 DHC 技术的发展。因此，这些技术在脱碳计划中仍未得到充分利用甚至被忽视了。

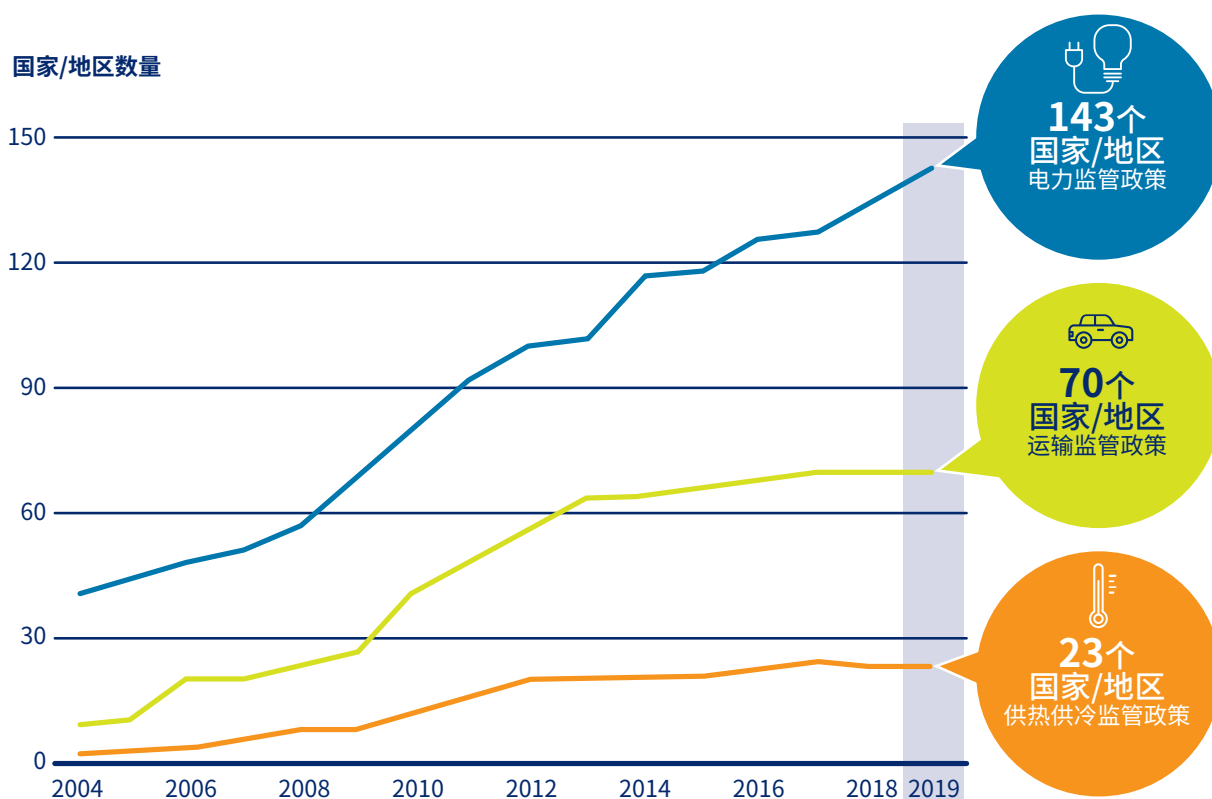
图 5 所示事实进一步说明了这一点，即大多数国家 / 地区推出的激励政策仍仅侧重于可再生能源发电目标。近年来，与制定电力监管政策的国家 / 地区数量相比，由于缺乏支持性政策鼓励建筑和工业部门采用可再生能源进行供热供冷，实施相关监管激励措施或强制实行可再生能源进行供热供冷的国家 / 地区较少（REN21，2020 年）。

但是，要达到碳减排目标，建筑和工业部门的供热供冷系统就必须大幅减少二氧化碳（CO₂）的排放（IRENA，2017c）。IRENA（2017b）指出，若要符合《巴黎协定》的要求，CO₂ 排放与常规情景相比需要减少 73%。

基于 2018 年“转型时期的可再生能源政策”报告（IRENA，IEA 和 REN21，2018 年），IRENA、国际能源署（IEA）和 21 世纪可再生能源政策网（REN21）共同撰写了第二版《转型时期的可再生能源政策：供热供冷》。（IRENA、IEA 和 REN21，2020 年）。该研究旨在支持政策制定者促进供热供冷系统向可再生能源转型，并最大程度地提高社会经济效益。

该研究着重介绍了各国的相关经验和最佳实践，并提供了一个全面的政策框架，以克服可再生能源供热供冷部署中的主要挑战，帮助各国推进终端使用部门的脱碳和可持续发展。

图 5：2014 年至 2019 年按类型划分的可再生能源监管激励措施和强制性规定的数量



来源：REN21（2020 年）

此外，也为决策者提供了一些关键建议，以最大程度地降低供热供冷部门的碳强度，其中包括：

- 将供热供冷电气化与可再生能源发电部署相结合，以提供具备成本竞争力的可再生能源。在最低性能标准和质量保证政策的支持下，利用热泵和其他高效电器可提高系统灵活性，并促进整合更高比例的波动性可再生能源。为此，电力市场的改革、电价的重新设计以及基础设施的升级都势在必行。
- 降低地热勘探风险，以加快地热的直接利用。支持政策包括地热资源数据共享平台、勘探风险保险以及用于钻井的贷款担保或补助。
- 改善配电网络的能源效率以将低温太阳热能、地热能和其他基于可再生能源的热能整合到现有网络中。

先前的研究 - Connolly 等人。（2012 年，2015 年），Connolly 等人。（2013a），Xiong 等人。（2015 年），Paardekooper 等人。（2018 年，2020 年） - 已经显示，通过节能、提高能效，以及利用各项可再生能源技术，加上扩大 DHC 系统的部署，做到充分考虑供热供冷行业的节能潜力，就可以实现更快、更具成本效益的能源系统的脱碳。

因此，有必要更详细地了解建筑和工业部门供热供冷供需系统的“黑箱”，并开发出可供相关部门使用的供热需求建模技术，以量化区域能源在能源转型中发挥的作用。

建筑的热能需求和能效

在大多数国家 / 地区，建筑部门的能源消耗占比极大。节能建筑的发展在努力将国家 / 地区能源系统转变为未来可持续能源系统以及减少化石燃料产生的 CO₂ 排放中发挥着关键作用。

自 2000 年以来，建筑热性能每平方米 (m²) 的最终能源需求) 的改善表明，新的建筑越来越节能，而许多旧建筑也正在翻新中。但是，自 2010 年以来的热能使用总量并未减少。没有出现下降趋势的原因一方面是发展中国家 / 地区可利用的能源增加，另一方面是由于全球的建筑面积正在每年以近 3% 的速度增长（全球建筑建设联盟、IEA 和 UNEP，2018 年）。

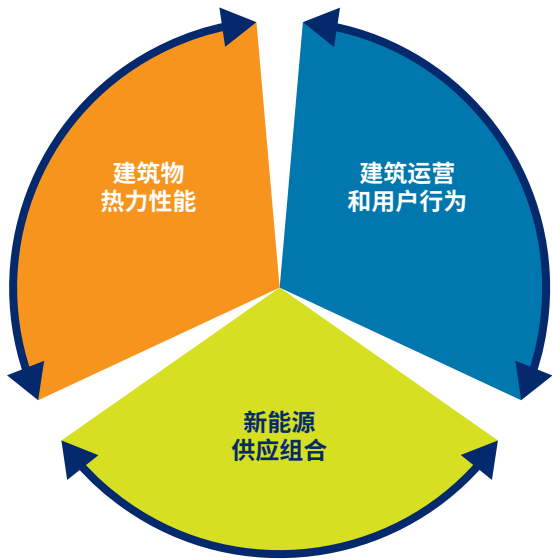
同时，供冷技术在过去二十年中增长强劲。自 2000 年以来，空间供冷需求翻了一番，至少占住宅高峰用电需求的一半。2017 年夏季的北京对这一趋势深有体会，高温热浪引发了每天的用电需求尖峰（IEA，2018 年）。尽管取得了显著增长，但各个地区的能耗差异极大，供冷在全球平均建筑能耗中所占的比例仍然不到 6%。但是，通常有一些因素会引发供冷需求，尤其是空间供冷，这是提高效率方面需要重点关注的话题。例如，气候温暖国家 / 地区的经济增长，使得这些国家 / 地区可以通过空间供冷获得更高的热舒适性。另外，城市地区的气候变暖和热岛效应也增加了空间供冷需求。这些因素将导致未来几年供冷需求将不断增长（预计 2015 至 2050 年将增长一倍以上）（IEA，2018 年），因此，供冷能效便成为了重要话题。此外，根据《蒙特利尔议定书》基加利修正案（联合国，2016 年）的要求，高效、清洁的供冷替代方案对于减少氢氟碳化物的排放至关重要。为达到这一目的，使用造成全球变暖可能性较小的制冷剂的区域供冷方案将发挥至关重要的作用。

全球范围内，重要的是应将建筑保有量视为一种长期投资和基础设施，因为它使用重质材料，并且可能决定着未来几十年内的能源需求。在迅速崛起的经济体中，新建筑的建筑性能和质量评估非常关键。截至 2018 年，已有 73 个国家 / 地区通过制定建筑节能法规，设定了自愿或强制性的新建筑能源性能水平（全球建筑和建设联盟、IEA 和 UNEP，2019 年）。但是，这依然无法完全解决建筑存量问题。三分之二的国家 / 地区缺乏相关的能源法规，而预测这些地方恰恰是未来建筑部门增长最快的地方。此外，仅通过节能和新建筑的低能耗无法将能源需求降低至可实现能源系统转型的水平。这是因为对新建筑的关注使人们或多或少忽视了节能以及现有建筑中供应技术转换的重要性。

实现建筑部门的可持续能源系统需要三大要素（图 6）（Mathiesen 等人，2016 年）。首先，要实现灵活的可再生能源系统，整个存量（尤其是现有建筑）必须实现更高的能源效率。其次，为了逐步节省热能和电力需求，必须优化建筑运行和用户行为。第三是考虑供应侧选择，该选择为将可再生能源整合到系统中提供了可能性。为了充分利用建筑对可再生能源未来的潜在贡献，需要针对这三个紧密联系的要素实行整体性方法（Mathiesen 等人，2016 年）。

如果要对建筑的能源使用做出有效决策，理解能源供应侧的技术也变得非常关键。区域能源在这一领域扮演了重要角色。由于其相关技术基础设施能够为现有建筑和新建筑提供能源，因此区域能源可以将构成智能能源系统基础的供热和电力部门相关联（参阅 A 部分第 1.2 节），同时提供系统灵活性。

图 6：建筑在未来具有成本效益的可持续能源系统中发挥重要作用的三大要素



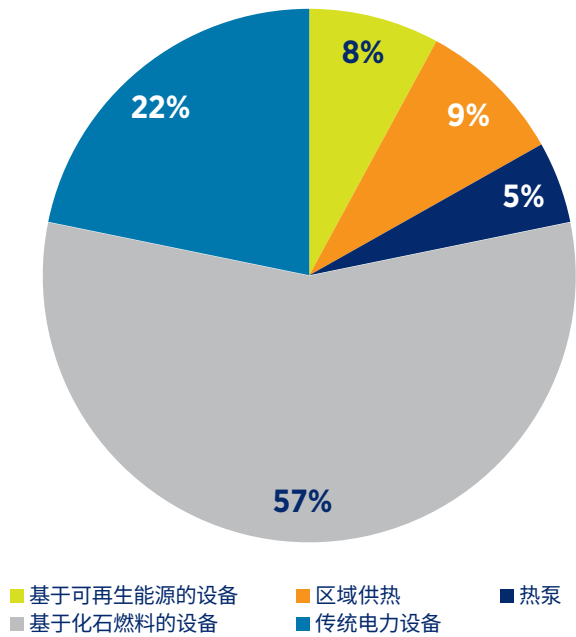
来源：Mathiesen 等人（2016 年）

一个主要用化石燃料为单独建筑物提供供热供冷解决方案的部门

我们一方面提倡节能，建议鼓励改变建筑运行中的行为，同时也给出供应侧方面的建议。技术（例如用于区域供热的大型热泵、季节性蓄热装置和地源热泵）以及生物能源有助于以经济高效的方式将可再生能源整合到能源系统中。

图 7 展示了 2019 年住宅和服务业建筑供热技术销售的估计比例。其中不包括生物质的传统使用方式，由于许多发展中国家 / 地区和农村地区仍在使用这一能源，因此它在全球的热能使用中仍占据主导地位。市场份额方面，基于化石燃料的设备占全球建筑供热设备的 57%、传统的电加热设备占 22%、单体热泵所占比例不到 5%，而可再生能源供热设备（例如太阳能热水系统）占 8%。

图 7：2019 年全球住宅和服务业建筑中按技术分类的供热设备估计比例（不包括传统使用的生物质能）



注：基于可再生能源的设备包括太阳能供热、基于氢能的设备以及现代生物能供热。

依据：IEA 数据（未注明日期）

2018 年区域供热网络提供的热能不到全球热能消耗的 6% (IEA, 2019b)。但是, 国家 / 地区之间也存在很大差异。北欧、中欧和东欧、俄罗斯联邦和中国北部的区域供热系统 (用于空间供热) 所占比例较高, 后两个国家的 DHC 供应比例均超过了三分之一。

某些情况下, 不同地区区域供热比例的差异是由特定的气候和天气条件以及当地能源资源的情况所决定的。例如, 若某个地区具备良好地热资源, 或有燃料以及由发电或垃圾焚烧产生的余热, 则该地区部署 DHC 系统的潜力较大。然而, 更广泛的热能分析显示, 几乎所有城市通常都能使用某种热能资源 - 无论是可再生的还是可持续的热能二次利用 (Moller 等人, 2018 年)。另外, 有了大型热泵之类的技术将会推动开发使用低温本地能源的 DHC 系统 (否则将不会考虑使用)。目前区域供热发展水平的差异还受到城市和能源政策驱动的影响。这些政策确定了有益于利用当地条件促进区域供热 (供冷) 发展的城市结构以及供热规划的传统和类型 (Paardekooper 等人, 2018 年)。全球范围内 DHC 的主要能源很大程度上来源于化石燃料, 2018 年可再生能源占比不到 8% (IEA, 2019b)。

供冷需求则主要由单户制冷解决方案提供, 例如分体式空调系统。节能供冷系统, 例如电动冷却装置可通过区域供冷系统实现 (IEA, 2018 年)。但是, 区域能源系统供应的冷能明显少于热能 (Werner, 2017 年)。如前节所述, 预计未来的供冷需求将大幅增加 (IEA, 2018 年)。全球气候将对区域供冷产生越来越大的影响, 但很多情况下, 未来的区域供冷系统很大程度上仍然基于对区域能源系统规划实践的了解。值得注意的是, 瑞典斯德哥尔摩拥有欧洲最大的区域供冷系统之一, 这表明该技术即使在寒冷气候国家也是可行的。

A.1.2 未来能源系统和可持续供热 (供冷)

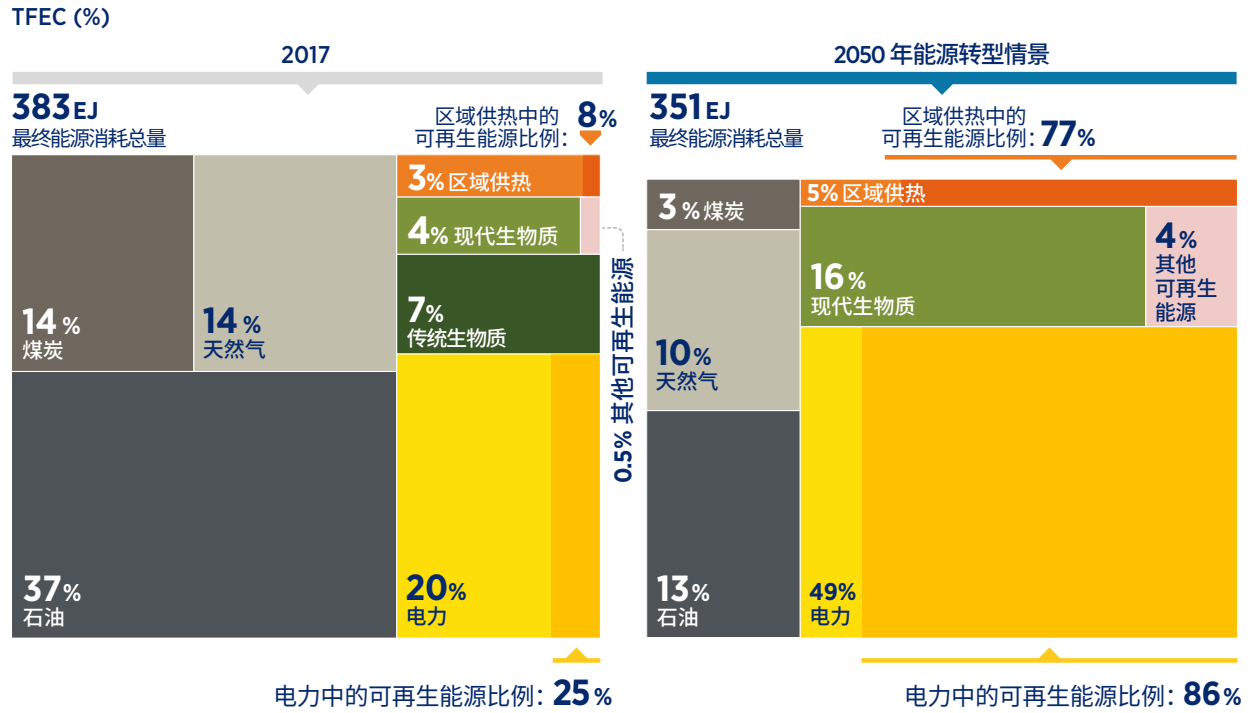
从集中式能源系统到智能能源系统

尽管事实上大多数 DHC 系统仍然使用煤和天然气运行, 但区域能源网络可以整合地热、余热和太阳能等低品质可再生热源。根据 IRENA 在 “全球可再生能源展望” 中描述的 “能源转型情景”, 如图 8 所示, 可再生能源在区域供热中的比重将从 2017 年的 8% 增长到 2050 年的 77%。此外, 基于这一情景, 到 2050 年, DHC 系统将占最终能源消费总量的 5%, 高于 2017 年的 3% (IRENA, 2020a)。但是, 部分区域层面研究表明, 更高比例的区域供热极具成本效益 (请参阅图 11)。

区域能源系统可能是降低建筑部门碳强度的关键因素, 同时也有助于向智能能源系统转型。这种系统是智能电网、热网和燃气网的整合。此外, 智能能源系统为利用蓄热、电锅炉、电制气 (即将电力转换为氢气或甲烷等气体燃料并储存的技术) 和大型热泵的波动性可再生能源发电提供了极大的灵活性 (David Connolly 等人, 2013b; Ridjan, 2015 年; Lund 等人, 2016 年; IRENA, IEA 和 REN21, 2018 年; Paardekooper, Lund 和 Lund, 2018 年)。

图 9 描绘了不同转换技术和回收系统下智能电网、热网和燃气网之间的相互作用。盘根错节的关系意味着不同的情境 (例如高 (尖峰) 需求、产量较低的风力发电、产量较高的太阳能发电等) 可以激活不同的生产和供应系统。

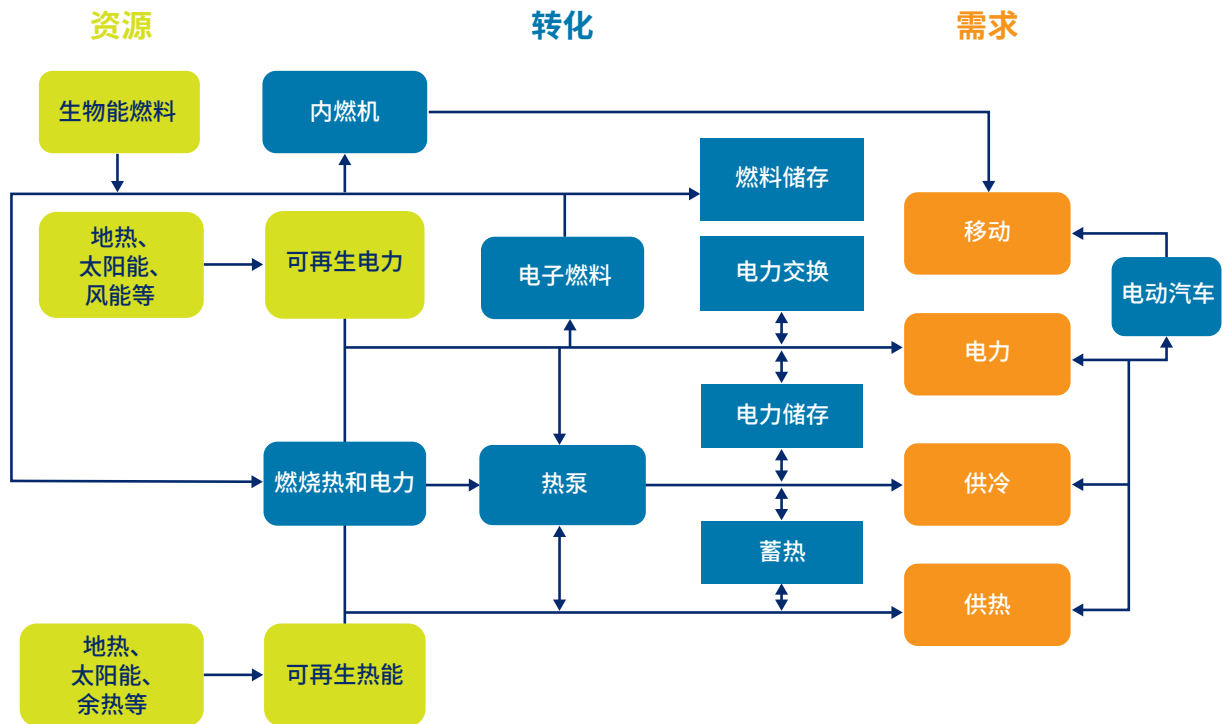
图 8：2017 年按能源载体分类的最终能源消耗总量分解以及“2050 年能源转型情景” (EJ)



注：EJ = 艾焦

来源：IRENA (2020 年)

图 9：智能能源系统中部门与技术之间的相互作用



依据：Paardekooper 等人 (2018 年)

第四代区域供热

未来区域能源基础设施的设计方案应将设想中的智能能源系统（已在上一节进行介绍）考虑在内。第四代区域供热概念参考前三代系统，描述了未来这些区域供热技术和系统（图 3）（Lund 等人，2018 年）。供应温度的逐步降低与不断提高的系统能源效率密切相关。而能源效率的提高又得益于输配网和建筑存物总体热能损失的减少，以及整合各种新型热源（例如可再生能源和余热）能力的提高，如图 10 所示。新型热源的整合意味着 CO₂ 排放减少，并且与其他能源部门的整合程度更高，从而有效提高了系统的灵活性。建筑节能措施是第四代区域供热系统发展的重要组成部分。

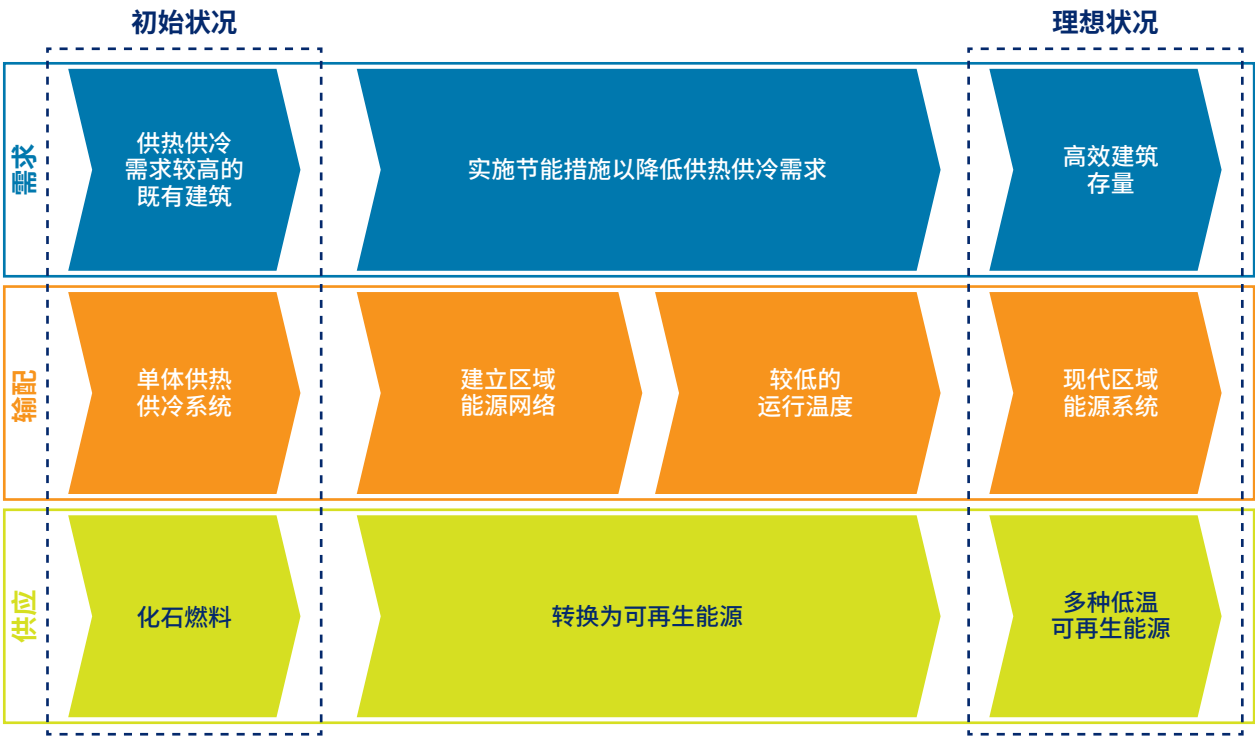
需要注意的是，尽管第四代系统才是理想情况，事实上第三代系统也可以利用低温能源 - 主要通过使用大型热泵实现。最重要的一点是将网络设计为使用热水而非蒸汽运行。

供冷系统的目标是使用天然制冷剂而非传统的 HFC 制冷剂 - 根据《蒙特利尔议定书》基加利修正案（联合国，2016 年），该制冷剂将逐步淘汰。现代和中型 DHC 系统将依靠各种当地和分布式资源，包括低温可再生能源和余热能源。

通过节能（建筑）和全新可持续供热系统 (DHC) 释放巨大潜力

考虑供热部门脱碳时，一个关键问题是如何确定节能投资与能源供应投资之间的最佳成本平衡。传统方法采用简单的边际成本方法，并且主要关注建筑层面的节能（例如翻新和改善保温）。但是，无论考虑的能源系统规模（国家、地区、城市或地区层面）如何，都可在整个能源系统（从发电到传输再到使用）中实现节能。应部署边际成本低于开发全新供应系统成本的节能措施。

图 10：从以化石燃料为基础的单体供热到第四代区域供热的转型途径



注：区域能源系统可以代替人口高密度区域中的大多数甚至全部单体供热供冷系统（参阅 B 部分第 6.4 节）。

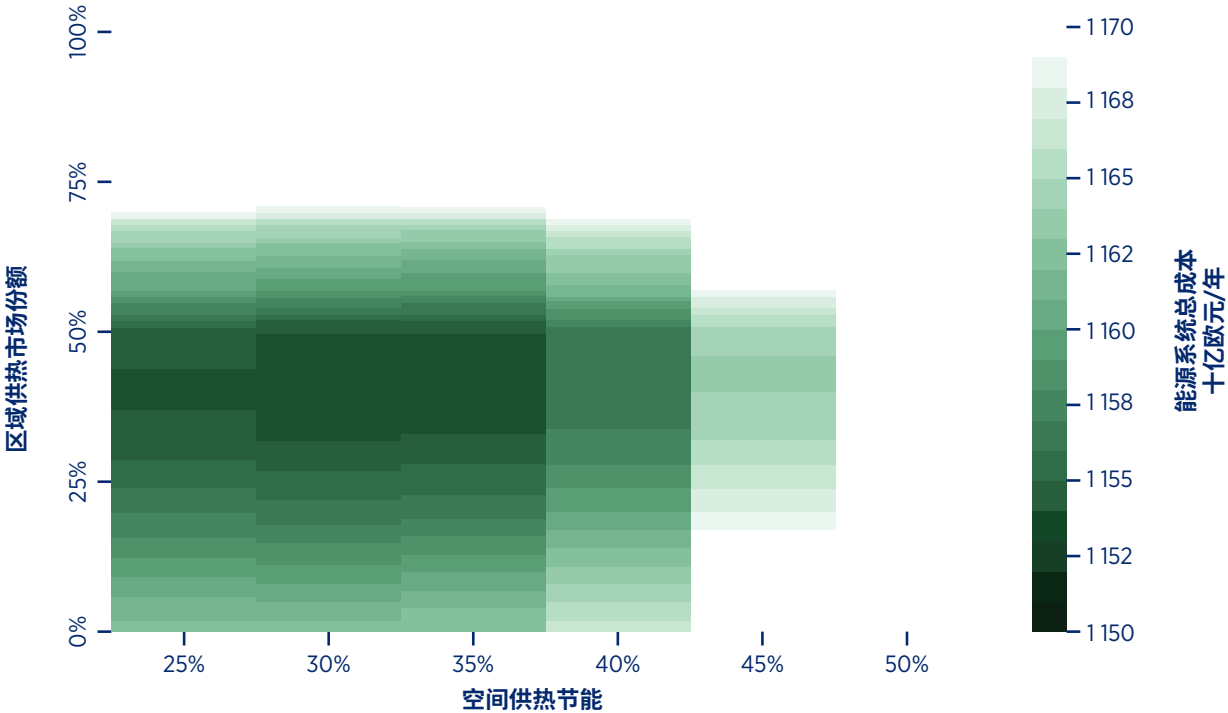
Hansen（2019 年）认为，“估计供热的事前（系统）成本可能比实施简单的平准化能源成本 (LCOE) 措施更为复杂”³，但在未来的能源系统中，外部收益和能源系统的协同作用决定了这一估计是非常必要的。很难通过例如简单的边际方法估算由发电厂余热产生的节能效果。该机制通过区域供热系统进一步得到证明，该系统在建筑层面使用地热能而非热泵，从而减少了尖峰电量需求，并减少了潜在的温室气体排放（取决于天气系统）。

这些相互作用是系统的复杂性和相互依赖性产生的结果，如果未在适当的时间尺度进行明确的能源系统建模，则无法通过简化的 LCOE 评估正确了解这些相互作用。因此，必须针对整个能源系统中的能源流进行分析，将电力和供热系统的节能考虑在内。

例如，图 11 显示了供热市场中节能和区域能源系统各占的合理比例，其中考虑了占欧盟 90% 供热需求的 14 个最大欧盟 (EU) 成员国的能源系统总成本（Mathiesen 等人，2019 年）。该图展示了 14 个国家 / 地区的汇总结果和差异。例如，与当前能源效率政策相比，到 2050 年，捷克共和国、匈牙利、波兰和罗马尼亚的热能节能水平可能提高 25%，而其他国家 / 地区的建筑性能政策有望将能源系统成本降至最低。更多相关详情，请参阅 Paardekooper 等人（2018 年）的著作。

³ 均化成本的计算为能源项目的生命周期成本除以其能源生产。

图 11：14 个欧洲国家 / 地区总能源系统成本中区域供热（占欧盟供热总需求的 90%）和节能的协同作用



HRE14: 在“欧洲供热路线图”项目中，以供热需求计算，欧盟 14 个最大成员国占欧盟总供热需求的 90%。

来源: Mathiesen 等人（2019 年）

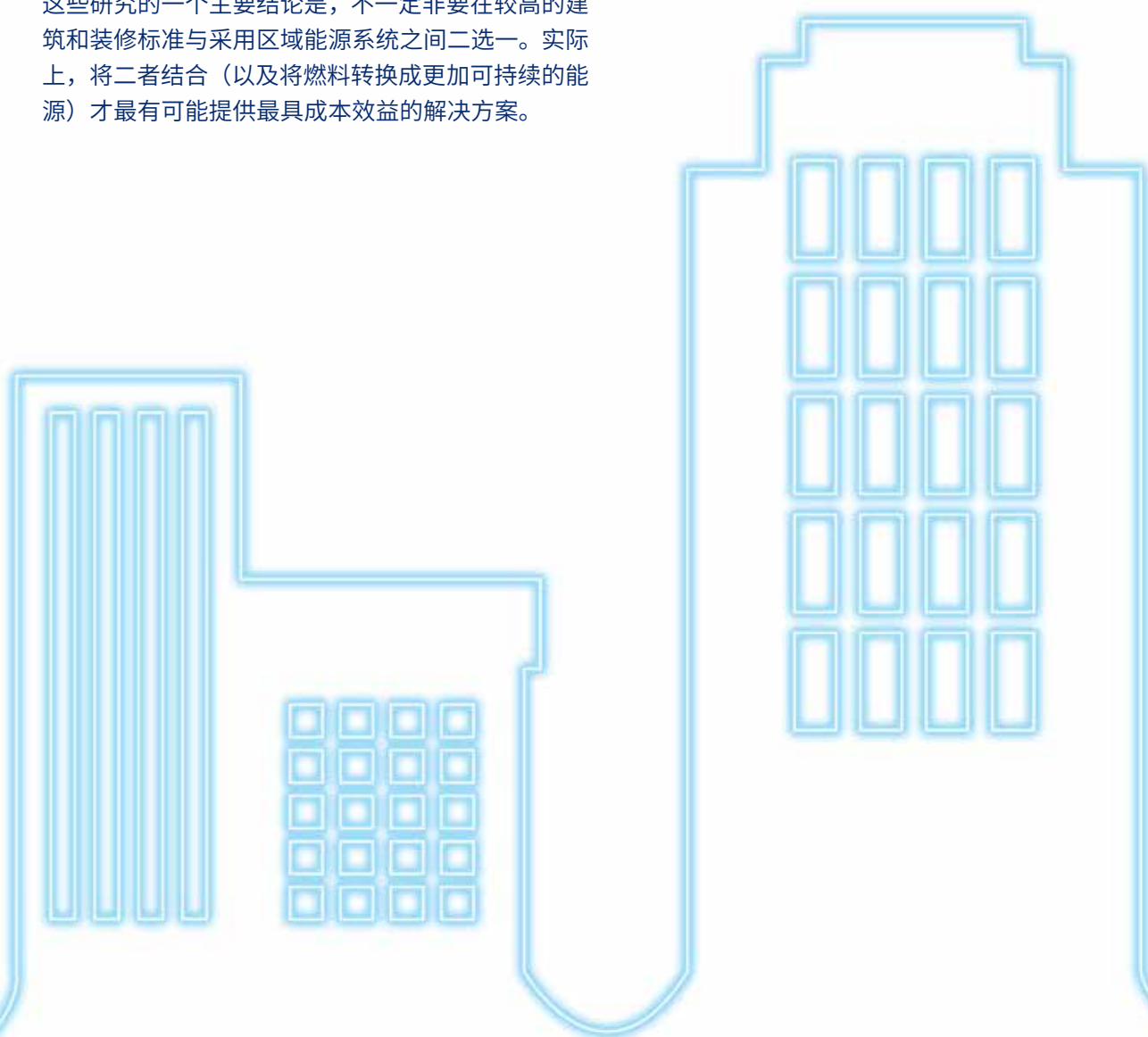
图 11 显示，投资区域供热和节能有助于降低总能源系统成本。该图显示了在不同节能水平和区域供热比例下热需求最高的 14 个欧盟国家 / 地区的总能源系统成本。

最低能源系统成本出现在区域供热的市场份额约为 50% 时，与 2015 年的欧洲水平相比节省了 30% 的热能，图中以最暗颜色表示。它显示了将能源系统视为复杂的、相互依赖的系统至关重要，电力、天然气以及供热供冷部门之间存在协同作用。该示例中，这种协同作用显示了同时投资区域供热系统和节能从而降低能源系统总成本的巨大潜力。

中国一项相关研究（Xiong 等人，2015 年）还指出：能源回收、高能效供应商和节能的结合可提供一种更具吸引力的解决方案，从而提高成本效益并进行节能供热。

这些研究的一个主要结论是，不一定非要在较高的建筑和装修标准与采用区域能源系统之间二选一。实际上，将二者结合（以及将燃料转换成更加可持续的能源）才最有可能提供最具成本效益的解决方案。

“将可持续区域能源供应与节能建筑相结合可提供经济高效的解决方案”



A.2 可再生能源区域供热及相关技术概述

A.2.1 区域供热中使用的可再生能源（及余热）和技术

区域供热能够利用不同能源，不依赖于单一类型的能源供应。欧洲区域供热市场的演变明确阐明了这点。20 世纪 90 年代，欧洲大陆 50% 的热能来源于煤炭燃烧。1990 年开始，天然气（取代热电联产厂中的煤炭）的比例有所增加，约占区域供热总生产量的三分之一。1990 年到 2017 年，生物质在区域供热生产中的比例增加至 20%，其他可再生能源则增加至 6%（Mathiesen 等人，2019 年）。

DHC 可以利用广泛的当地能源（否则部分能源将无法有效利用）。其中包括地热、太阳热、工业过程或自然冷却产生的余热。因此，这些低温能源对于 DHC 系统的发展具有战略意义，反之，DHC 系统的发展对于低温能源的开发也极具战略意义。以下各节介绍了 DHC 系统的主要战略性能源。

地热资源

地热能是一种地球表面下自然产生的可再生能源。发电通常需要温度高于 150°C 的地热资源。但是，诸如二元循环发电厂等先进技术能够利用低温资源（IRENA，2017a）。

可通过钻入较浅或较深的地下获取地热能。高温地热资源通常位于热梯度高的深表层。中低温资源通常位于低至中等热梯度的浅表层或深表层。

另一方面，储存在浅表层上层中的低温热能主要来自太阳辐射。这些热能被地面吸收并由地下水系统分配（英国地质调查局，2020 年）。

相比发电所需的高温地热资源，适用于直接利用（包括 DHC）的中低温地热资源更为广泛（Limberger 等人，2018 年）。

来自水热系统的地热能温度范围有所不同，具体取决于其所在的地质环境。根据所提取能源的地热系统特征，采用了几种方法对地热资源进行分类。主要分类基于温度、焓、流体的物理状态及地质环境。温度和焓主要用于根据使用目的对地热资源进行分类。根据温度可将地热资源分为三个级别：低温、中温和高温。

由于这些温度水平本身并不明确，因此不同作者对于每个级别使用了不同的温度范围。在利用低温资源的 DHC 系统中，低于 90-100°C 的地热资源视为低温。高于 80°C 的地热能可整合到现有的区域供热网络，且无需对系统进行重大改造。但较低温度地热资源的利用则可能需要对现有的区域供热网络和建筑进行改造（参阅本指南 B 部分第 4 节）。

传统上，高温地热系统主要用于发电，某些情况下可通过热电联产以直接利用，例如通过级联方法进行空间供热。

这些系统（将热能从基载电力级联到区域能源）在冰岛占主导地位，例如雷克雅未克（Reykjavik）地热区域供热系统以 75°C 的温度向雷克雅未克市提供热水。部分能源由 Nesjavellir 和 Hellisheiði 地热发电厂共同产生，并通过管道输送到城市。在雷克雅未克，地热热电联产厂约占峰值热需求的 50%，而其余部分则由低温地热场提供。冰岛 90% 以上的空间供热需求都通过地热能满足（Testeret 等人，2015 年）。

与冰岛和其他地质条件有利的地方发现的高温地热资源不同，世界上大多地热资源温度较低，例如沉积盆地发现的地热资源。这些沉积盆地中，部分井产生的流体温度可能高于 100°C（例如匈牙利东南部的 Pannonian 盆地），而其他井产生的流体温度则为 40-60°C（例如中国的盆地）。

某些情况下，用于供热供冷的地热能来自从较浅储层（通常小于 1,000 米）获取的低温流体。显著示例之一是美国爱达荷州博伊西地区的供热系统，该系统从钻探深度为 30-900 米的多处井中获得温度为 66-82°C 的热水，为数栋住宅和商业建筑供热（Tester 等人，2015 年）。

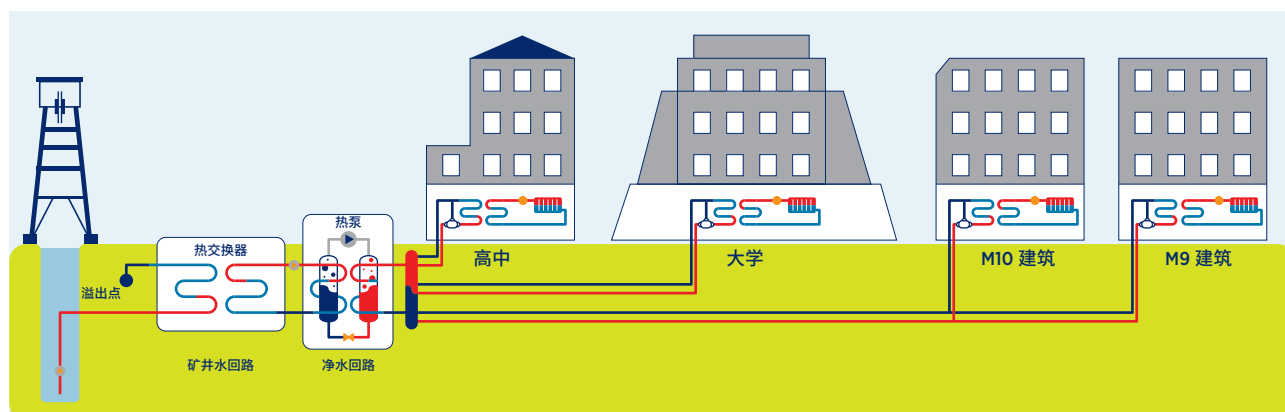
近来的发展可从浅层地热井中获得温度较低的热水，再通过热泵增温用于区域供热。通常使用这种浅井钻探策略降低钻探成本，并最大程度地降低深层地热钻探相关的风险。风险包括资源在温度和流速方面是否可用的不确定性（Tester 等人，2015 年）。由于浅层含水层中温度较低的流体更利于使用，因此该策略还能够最大程度地避免地热流体结垢和腐蚀。但是，这些温度较低的浅层流体可能会与饮用水供应联系在一起，通过其他用途（例如农业）而造成污染和含水层水位下降的危险，因此必须严格监控。

Paris Saclay 区域供热系统的地热井钻至 700 米深，获取约 30°C 的低温地热水，之后使用热泵将温度提高至 45-63°C，在冬天为建筑供热。热泵在夏季用于产生 6-12°C 的冷水为建筑物供冷（Galindo Fernández 等人，2016 年）。

随着区域供热网络的发展趋向于利用低温资源，目前也正在开发新的地热来源，为低温系统（例如废弃煤矿以及开闭环地源热泵）创造广阔前景。

采矿作业结束后，随着时间的推移，煤矿会注满地下水。由于地球自然存在的热梯度，这种水可以全年保持恒温，根据深度不同，温度范围通常为 18-35°C。荷兰海尔伦的 Minewater (Mijnwater) Project (Mijnwater BV, 2014 年) 应用热泵将旧矿井中 28°C 的水增温，为城市建筑和区域供热。该矿还被用作散热器，吸收过剩太阳能以及工业和供冷运营产生的余热（Verhoeven 等人，2014 年）。该创新项目正不断扩大，以推动海尔伦集聚区域的热能转型（供热部门脱碳）。同样，西班牙米耶雷斯 Barredo Colliery 的区域供热项目使用废弃煤矿的泵送水，该水的流量（每年 3.96 立方百米 [hm³/年]）、温度 (23°C) 和质量等特性保持恒定。

图 12：废弃煤矿：西班牙阿斯图里亚斯 Barredo Colliery 区域供热项目（米耶雷斯）



来源：低碳欧洲（2020 年）

如图 12 所示，2018 年开发的区域供热项目的设计和运营由潜水水泵、一台热交换器、两台热泵以及一系列地下管道组成，连接一所高中、一所大学（高温网络）和 245 栋住宅（低温网络）。

该项目取代了之前使用的燃气锅炉进行空间供热。热泵运行使用的电力由一项协议提供，该协议确保从可再生资源中获取电力。从而每年减少 653 吨 CO₂ 排放（Lettenbichler 和 Provaggi，2019 年）。通过从废弃煤矿提取热能并与热泵结合，无需进行大量勘探和钻探即可获取和利用地热能，矿山靠近热能或冷能需求中心的地区更是如此。

同样，中低温地热资源与油气共存，可利用这些地热资源为油气田附近地区的空间供热符合中心提供热能。例如，朱砂能源公司（Vermilion Energy）利用油气井联合产生的热水为 15 公顷种植西红柿的温室供热。该项目在法国运营产生的热能还用于满足 550 套公寓 80% 的供热需求（朱砂能源，2019 年）。此外，油气井还提供了宝贵的地下结构信息，例如岩性形成、温度和孔隙度。这些数据除了可以节省勘探钻探成本，还有助于大幅降低地热项目相关的资源风险。

在彻底废弃⁴一口油井之前，应先评估油气井运行联产的可行性。从废弃油气井中提取地热能的主要挑战包括，废弃后重新疏通油井的成本以及油井的残破带来的较高风险，这将限制油气井的长期使用。由于生产数据中通常会记录井的流速（或“含水量”），因此可利用这点确定重新进入废弃油气井是否具备经济优势。此外，油气井的狭窄设计限制了井下水泵（为区域供热提取水）的使用（Hickson 等人，2020 年）。

4 废弃矿井涉及井的密封或填充（通常设置水泥塞以阻止井中向上或向下的任何流动）。

作为联产的替代方案，油气井可能适合通过安装钻孔热交换器利用低温地热能进行空间供热。由此一来，可根据周围岩石的热性质从深度 1,000-3,000 米的井中提取 20-70°C 或更高温度的地热流体。但是，只有提取的地热流体温度和流量足够大，才能在地表进行热交换。

太阳热能

太阳热能包括通过捕获太阳辐射产生热能。小型太阳能系统已广泛应用于家庭热水制备、温带气候下的单体建筑供热，以及低于 100°C 的特定应用（Pauschinger，2016 年）。由于其显著的规模经济特性，大型系统尤其适合与区域供热网络进行整合。

根据特定技术和厂址地点可建立不同分类。

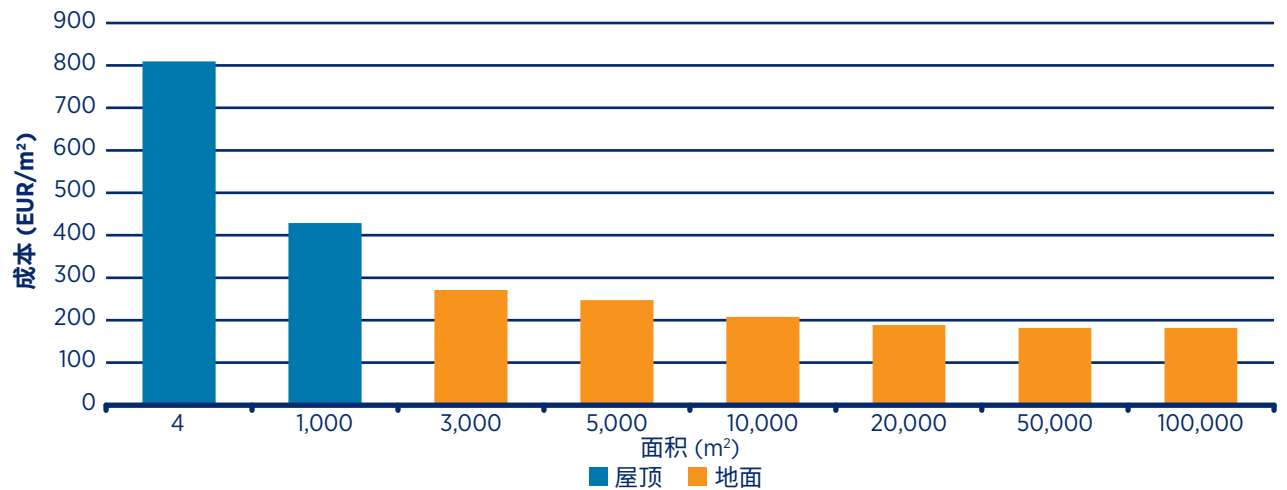
现有两种主要太阳热能技术：平板集热器和集中式（聚光）太阳能热发电（CSP）（参阅照片 2）。

- 平板集热器由包含热交换器的面板组成，热交换器将吸收的辐射转移到传热流体中。正面通常是玻璃，背面则是隔热层以减少热能损失（Duffie 和 Beckman，2013 年；丹麦能源署，2016a）。热交换器通常是带有吸收板的盘管，但目前例如多通道吸热器等全新设计也正在开发。平板太阳能集热器产生的热能通常低于 100°C。
- CSP 使用反射镜将吸收的辐射聚焦到接收器上。根据反射镜和接收器的形状，可将 CSP 分为四类：槽型抛物面集热器、菲涅耳反射式集热器、太阳能塔和太阳能碟式集热器。与平板太阳能集热器不同，CSP 可达到的温度较高，通常在 300°C 至 500°C 之间，还可能会更高。这意味着可将其用于发电和供热。

照片 2：丹麦 Løgumkloster 配置平板集热器的太阳能发电厂（左）和丹麦 Brønderslev 配置槽型抛物面 CSP 的太阳能发电厂（右）



图 13：丹麦屋顶和地面太阳能装置成本



来源：Dyrelund 等人。（2010 年）

平板太阳能集热器的效率对区域供热系统的温度相当敏感，因此降低该温度将获得极大的优势。从该意义上来讲，Averfalk 和 Werner（2020 年）确定了初始投资的节省潜力，即回收流中每生产 1 太焦耳 (TJ) 及降低 1 摄氏度 (°C) 可节省约 100 欧元，这是所有研究技术中成本节省的最大值。与平板太阳能集热器的效率相比，CSP 效率不受热载体温度的显著影响，因此可以利用更高的温度。两种技术之间的另一区别是 CSP 所需的设置更为复杂，该技术需要通过反光镜跟踪太阳，而平板集热器则通常是固定的。

使用集中式和分散式技术都可以进行不同类型的整合：

- 集中式集热器场在单一位置为区域能源系统供热。例如，拉脱维亚萨拉斯皮尔斯市于 2019 年启用的 15 兆瓦 (MW) 太阳能区域供热厂可满足系统每年约 20% 的热需求，剩下需求由 3 MW 的生物质锅炉提供（Epp, 2019 年），或更小一点规模的有，如南非约翰内斯堡 Wits University Junction 住宅的 600 m² 屋顶太阳能集热器装置（Kganyapa, 2019 年）。集中式供热厂可以位于地面、屋顶或其他建筑顶部。

- DHC 网络上任何合适位置安装的分散式或分布式太阳能集热器场均与现场 DHC 一次回路连接。其中一个示例是加拿大艾伯塔省的德雷克太阳能社区，该地区将 798 个集热器安装在新社区 52 栋房屋的独立车库上，并通过地下管道连接到该社区的能源中心（德雷克太阳能社区，未注明日期）。

如果能够以合理的价格获得土地，则地面安装是最便宜的选择，因为它有可能从规模经济中获益：更大规模的集热器、更快、更标准化的安装。如图 13 所示，太阳能区域供热的具体供热成本随着规模的扩大而降低，且地面安装成本远远低于屋顶安装成本。

由于太阳辐射遍及全球，大多数国家 / 地区的太阳热能资源潜力超过了当前的 DHC 需求。但是，由于缺乏地面或屋顶空间，其理论上的潜力可能会受到极大限制。中国便是一个例子，其需求很高，但城市地区的太阳能集热器空间可能有限（IRENA，2017b）。

太阳能生产遵循两个相互交织的周期：日和年。日周期中，晚上的产量为零，在当地正午（晴朗无云的天气）达到最大产量。此外，由于地轴的倾斜，还存在季节性变化，夏季达到最大产量而冬季为最小产量。后者变化很大程度上取决于该地点的纬度，位于较低纬度的生产设施全年产量相当平稳，而位于较高纬度的工厂（如斯堪的纳维亚半岛）则呈现出更加显著的夏季产量高峰趋势。

这种变化需要进行蓄热，以适应热能生产到消耗的高度变化。通常，太阳能区域供热厂依靠每日的蓄热可以弥补昼夜循环的变化，使之趋向平稳。容量通常约为几千立方米。另一方面也可以通过季节性蓄热来使年度周期趋向平稳，这便需要更高的容量。

考虑到季节性储能成本，大多数太阳能发电厂用于满足夏季需求，例如丹麦太阳能占夏季热需求的 15-20%。但前提是一整年都存在区域供热需求，例如生活热水（DHW）或其他类似的基本负荷。相反，

如果夏季不存在区域供热消耗，则太阳能区域供热可能并非最佳选择。但是，随着季节性储能成本的不断下降，太阳能热发电将发挥越来越重要的作用。太阳能热电厂也可以提供区域供冷。其优点是高产时间段通常与高供冷需求时间段重叠，从而减少储能需求以及生产能力过剩。

与蓄热相结合，太阳能热电厂可为区域供热系统提供更高比例的可再生和零排放能源（Pauschinger，2016 年）。

Mathiesen 和 Hansen（2017 年）的研究结果表明，奥地利、丹麦、德国和意大利各种能源系统中，太阳热能的整体潜力占总热能生产的 3% 到 12%。但是，与单体供热地区相比，太阳热能潜力可以满足更大比例的区域供热需求。能源系统的灵活性是创建太阳热能整合能力的关键。反过来，这基于区域供热基本负荷生产比例（这将影响系统整合太阳热能的能力）以及波动性可再生能源的比例。此外，热泵和热电联产厂与供热部门的连接至关重要（Mathiesen 和 Hansen，2017 年）。

太阳能热电厂与低温地热资源结合提供的运营效率可使两种技术都从中受益。将这些技术结合使用可实现比任一技术更加广泛的应用。

使用太阳辐射的另一种解决方案涉及利用光伏电池将太阳辐射转换为电力。该解决方案可用于配备电动空调系统的区域供冷系统。

余热

余热也称废热包括任何工业过程产生而无法为工艺本身回收的所有热流，但可重新用于其他用途，例如 DHC。该定义包括发电厂发电产生的过剩热能，但由于其重要性，通常将其单独视为一个类别，“余热”一词则用于其他工业流程。

无数工业过程会将热量释放到环境中，这些热能可为 DHC 利用。传统来源包括炼油厂，例如腓特烈西亚（丹麦）或哥德堡（瑞典）炼油厂（Frederiksen 和 Werner，2013 年）；水泥生产厂，例如奥尔堡（丹麦）水泥厂（Aalborg Varme A/S，2020 年）以及炼钢厂，例如拉夫内纳科罗什凯姆（斯洛文尼亚）（Konovšek 等人，2017 年）或敦刻尔克（法国）钢厂等（Belot 和 Juilhard，2006 年）。

上述热源提供的温度足够高，因而可通过简单的热交换器直接由区域供热网络使用。此外，它们也可以通过使用吸附式制冷剂用来供冷，消耗少量电力将热能转化为冷气（Calderoni 等人，2019 年）（参阅 A 部分第 2.3 节）。

利用热泵能够从温度通常低于 70°C 的更广泛热源中回收热能。这种情况下，即使需要热泵，相较于将空气、余热作为热源，其电力消耗也更低。这些全新非传统来源的例子包括数据中心，例如丹麦欧登塞的 Facebook 数据中心（Fjernvarme Fyn A/S，2020 年）或芬兰曼采莱（CELSIUS Project，2020a）；火葬场，例如瑞典（Petersen，2017 年）；废水处理厂，例如丹麦 Rødskær（Støchkel，Paaske 和 Clausen，2017 年）或加拿大温哥华市（加拿大温哥华市，未注明日期）；地铁站，例如伦敦伊斯灵顿等（CELSIUS Project，2020b）。如丹麦 Høje Taastrup（Schleiss，未注明日期）实施的那样，从区域供冷网络回流中回收热能也是一种方案。这些热源中，随着互联网流量的迅速增长，数据中心可能是未来潜力最大的来源（Jones，2018 年）。

在欧洲，考虑到位置、温度和时间，估计无需进行升级，工业余热源便可覆盖至少 25% 的潜在区域供热（Paardekooper 等人，2018 年）。其他类型的非传统低温余热源例如数据中心、超级市场、污水处理设施或地铁通风系统的实际潜力可能更高（Persson 和 Averfalk，2018 年）。中国的工业余热有潜力成为区域供热系统的重要资源，因为其工业能耗占全国总能耗的 70%（Xiong 等人，2015 年）。

生物能

生物质是迄今为止最大的可再生热能来源。一些国家/地区有大量未被充分利用的生物质原料可用于能源部门，包括用于区域供热锅炉或热电联产厂（Paardekooper 等人，2020 年）。现有农田中，由农业废料和现有生产林可持续生产的生物质预计将在未来能源系统中发挥更大作用。IRENA《全球可再生能源展望》显示，到 2050 年，生物质能满足全球一次能源总供应的 23%，主要用于发电以及供热和运输（IRENA，2020a）。

用于区域供热的生物能源包括新鲜木材、能源废料、农业废弃物、食品废料、工业废料和制造业的副产品以及沼气（Wiltshire，2016 年）。沼气在生物质的厌氧分解过程中产生，主要由甲烷组成。另一方面，生物质可进一步用于生产各种产品，例如木质颗粒和木片。

木质颗粒通过压缩木质原料（例如锯末）获得，形成直径约 70 毫米（mm）、长度约 600 mm 的圆柱形碎片。与木材相比，木质颗粒具备有较高能量密度（10 GJ [吉焦耳]/m³ [立方米]）、较低水分含量（<8%）和均匀的燃料特性。同时便于运输。将木材分裂/切割成 5 至 50 mm 的小块则为木片。木片的能量密度较低（3 GJ/m³），水分含量较高（20-25%）（IRENA，2018 年）。

但需要注意的是，必须确保生物质的可持续利用。完全可再生能源系统中大量可用（可持续）的生物质对于生产绿色气体和燃料必不可少，绿色气体和燃料的生产相较于供热供冷更加困难，因此区域能源系统应致力于限制其生物能源消耗。从能源系统角度来看，区域能源在整合其他种类的可再生能源中也能够发挥重要作用。根据供热技术的诸多分析，区域供热系统对生物质的依赖不大，因此生物能源可供其他部门使用，同时仍可促进完全可再生能源系统的发展（Mathiesen，Lund 和 Connolly，2012 年）。

A.2.2 用于区域供冷的可再生能源

生物质不会给高温下运行的现有基础设施带来重大技术整合挑战，因此并非本指南的关注重点。

可为区域供冷服务提供不同的技术解决方案；特别是以下两种配置：

- 集中供冷：供冷系统集中并安装冷水网络，可与供热供冷系统中的热水网络（专用于区域供热）分开，将系统连接到用户。
- 用户级别供冷：不用专门的区域供冷网络，而是使用了区域供热网络；这些系统位于用户附近，从网络自身分配的热能中受益。

集中式供冷可使用电力驱动的设备（压缩制冷机），也可以使用热力设备（吸收式制冷机）。用户级别的区域供冷只能使用吸收式供冷设备，因为压缩式供冷设备在用户级别进行的供冷属于单体供热定义（不使用热水或冷水分配网络的单体空调，因此不属于区域供冷范围）。

吸收式制冷机可以使用热源，例如来自工业的余热、地热和太阳热。供热供冷季节分开的地区可采用 DHC 组合系统，将低温热源在冬天用于供热，夏天用于供冷。例如中国郑州（见文本框 2）。太阳热能吸收式

供冷技术是一项已经过证实的成熟技术（Hassan 和 Mohamad, 2012 年；Inayat 和 Raza, 2019 年）。受应用太阳能技术的便捷性及供冷能力的驱动，全球当前该类技术的装置数量正不断增长（Inayat 和 Raza, 2019 年）。某些地方可以使用自然资源，通过热交换将水部分或全部冷却，这种方法称为“自然冷却”（IEA, 2018 年）。

自然冷却

由于全球多数大中型城市都靠近大型自然水体，因此 DHC 拥有大量的自然水资源。地表水水源热泵系统（使用来自海洋、湖泊或河流的水作为热源 / 冷源或二者兼有）能够帮助 DHC 系统供热和 / 或供冷。通常该系统的运行方式是将冷水泵入区域供冷设备，然后通过热交换器从区域供冷网络中提取余热。完成该步骤后，将水排放至水源中。自然冷却的另一方法是冬季将大量的雪或冰储存在蓄热系统中，夏季将其用于供冷。

哥德堡能源公司（瑞典的 DHC 系统）主要将自然冷却（即来自约塔河的冷水）转换为区域供冷。或者利用工业余热或垃圾焚烧，通过所谓的吸收式技术进行补充供冷。哥德堡能源公司为企业和组织提供冷却水，并且计划在 2050 年前扩大区域供冷网络。

在巴黎，欧洲最大的区域供热系统 CLIMESPACE 为高消耗客户提供冷却水，如大型公司和政府建筑、百货商店、酒店以及文化场所。容量最高的三个生产工厂使用塞纳河的水进行自然冷却（图 14）。

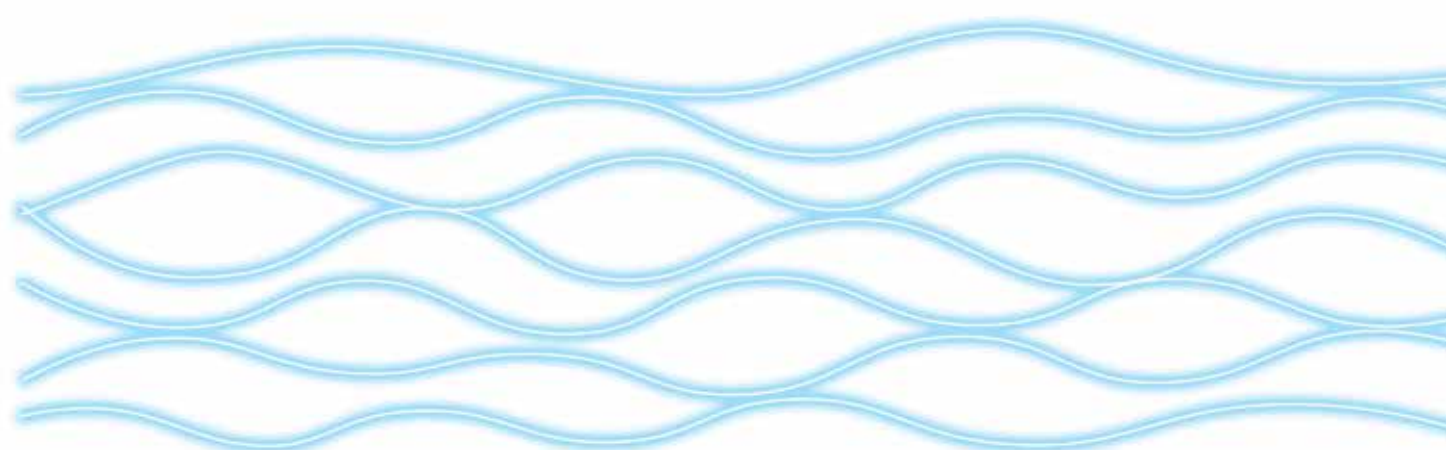


图 14：巴黎（法国）区域供冷网络



依据：Engie（2020 年）

A.2.3 关键使能技术

在未来的可再生能源系统中，电制热可能会成为供热部门的重要来源。首先，电气化是供热部门中使用可再生能源和替代固体燃料的直接方法。其次，电制热的灵活利用可能有助于除供热部门以外的其他部门更多地使用可再生电力（例如大风时段），从而提高可再生电力技术的容量系数，并使供热部门能够利用更高比例的可再生能源。这种灵活互连是一项关键机制，区域能源可通过该机制支持能源系统的脱碳和净化（减少颗粒物）。在电力与供热供冷部门的互连中，有三个要素至关重要：热泵、蓄热和电力生产中的余热。另外，将可再生能源用于供热供冷还需要区域能源网络以及具有供热供冷需求的建筑。

热泵

热泵使用电力（压缩式热泵）或热能（吸收式热泵）作为主要能源。热泵可以将低温热源升级至更高温度水平或生产冷能。图 15 和图 16 解释了这些装置的基本功能。

压缩式热泵对制冷剂进行机械压缩，从而利用电力升级低温热源（参阅图 15 和照片 3）。这些制冷剂可以是天然的，例如 CO₂ 或氨，也可以是合成的，例如氢氟碳化合物（丹麦能源署，2016b）。由于天然制冷剂对臭氧层无害且不会显著造成全球变暖，因此其利用呈增加趋势（丹麦能源署，2016b）。实际上，丹麦等一些国家 / 地区的热泵运行中禁止使用 10 千克以上的合成制冷剂（丹麦能源局，2016b）。

区域能源系统中的电热泵在电力和供热部门之间提供了关键的转换技术。当与适当的蓄热方式结合后，热泵为波动性可再生能源的整合提供了灵活性（Henrik Lund 等人，2016 年），而这是单体热泵无法提供的。此外，使用连接到输电网（高电压）的热泵可以抵消配电网（低电压）的容量限制，从而避免对电网提升或其他诸如电化学电池等昂贵的储能系统的投资（Andrews 等人，2012 年）。连接到 DHC 系统的大型热泵还有助于防止城市地区大规模部署独立装置时输配网出现较高损耗（Andrewset 等人，2012 年）。

尽管制造商或工作流体之间确实存在差异，但电热泵的效率主要取决于热源温度及所需的网络温度。其效率通过性能系数 (CoP) 比率衡量。CoP 是指热泵的热能输出与电力输入之间的比率。热能输出相同，较高的 CoP 代表较低的电力消耗。较高温度的热源意味着较高的 CoP，且通过区域供热网络将热源增加至所需温度时所需的电力消耗较少。这是使用余热或任何其他低温热源而不用空气或水的主要原因，尽管空气或水通常更容易获得。例如，低温余热工业设施、低温地热资源或连接到太阳热能设施的蓄热设施将以比环境热能更低的成本提供热能，因为热泵产生的电费将大幅降低。

此外，无论使用哪种热源，当热泵在较低温度而非较高温度下传递热能时，其效率也将更高（CoP 较高）。这也是从第一代 DHC 升级到第三代 DHC 并转型到第四代 DHC 的主要动力。由于许多制冷剂都存在工作温度上限，因此除了效率外，较低的工作温度还开辟了广泛的热泵技术应用场景。

另一方面，吸收式热泵由热能驱动。其耗电量极低，某些情况下甚至为零（Klein 和 Nellis，2012 年）。这种热泵利用了当一种物质被吸收进另一种物质（例如水和氨或水和溴化锂）时会释放热能的现象（Frederiksen 和 Werner，2013 年）。比较图 15 和图 16 中的热泵 CoP 可以得出，其效率高于压缩热泵，通常约为 1.7（丹麦能源署，2016a）。

吸收式供冷装置是吸收式热泵的一种变体，利用高温下的热能产生冷能。从这方面来讲，热源温度存在一个下限，约为 80°C（Klein 和 Nellis，2012 年）。常见类型的 CoP（即冷能输出与热能输入之间的比率）限制为 0.5-0.7⁵（Herold, Radermacher 和 Klein，2016 年）。

5 相同温度下，电动供冷装置或吸收式供冷装置的 CoP 要比热泵装置的 CoP 低一个单位。

图 15：压缩式热泵的工作原理



kW: 千瓦

图 16：吸收式热泵的工作原理



照片 3：丹麦区域供热系统中的压缩式热泵



来源：Luis Sánchez-García

吸收式热泵提供了利用廉价热能升级低温热源，从而增加总热能输出或进行供冷。吸收式热泵的潜在热源包括生物能源（沼气或生物质锅炉）、太阳热能（集中阵列和平板式集热器中的太阳能）、直接地热、工业过程或通过热循环或垃圾焚烧发电产生的余热。尽管热源可能不是可再生的（热能是工艺的副产品，不加以利用便会散发到环境中产生“浪费”），可以认为它对环境的影响很小，并且吸收式热泵的应用可免除其他能源的开发需求（Sanner 等人，2011 年）。

蓄热

蓄热 (TES) 在加速供热供冷脱碳中发挥着重要作用，人口密度高因而采用区域系统的城市尤其如此。TES 能够让热能 / 冷能的生产与使用分离开来，从而使能源系统具备更大的灵活性。这些技术可以适应从短期（数小时）到季节性储能的各种时间范围，更好地将供应与需求相联系，减少弃电并避免昂贵的电网提升需求。

IRENA 报告《创新前景：蓄热》中讨论了用于供热供冷系统的不同蓄热技术和用户案例，并预测了未来几十年的发展和创新需求（IRENA，2020 年）。

蓄热系统是一个储存热能以备未来使用的系统。由于巨大的热能容量和低廉的价格，TES 通常利用水作为储能介质，但也可以使用大地进行储能。诸如相变材料等其他材料也可作为储能介质，但当前尚未广泛应用于 DHC 网络。储冷方面当前已经使用了冷冻水、冰或盐水作为储能介质（Frederiksen 和 Werner，2013 年）。

TES 不仅可用于储存可再生能源（例如太阳能或地热）产生的热能，还可以利用热泵或电锅炉将过剩风电或光伏发电转化为热能并储存。后者的优势是使电力和热能部门耦合，从而共同实现智能能源系统概念（Mathiesen 等人，2015 年）（参阅 A 部分

第 1.2 节），因而整个能源系统的脱碳成本会更低。此外，蓄热相比电池或抽水等电力储存方案要便宜得多（Lund 等人，2016 年；Paardekooper，Lund 和 Lund，2018 年）。

蓄热的规模范围很广，从几百立方米到数十万立方米容量不等。低端最典型的类型是水罐，如照片 4 所示。传统上，它们已用于热电联产厂的负荷转移或太阳能热电厂的日常负荷匹配。

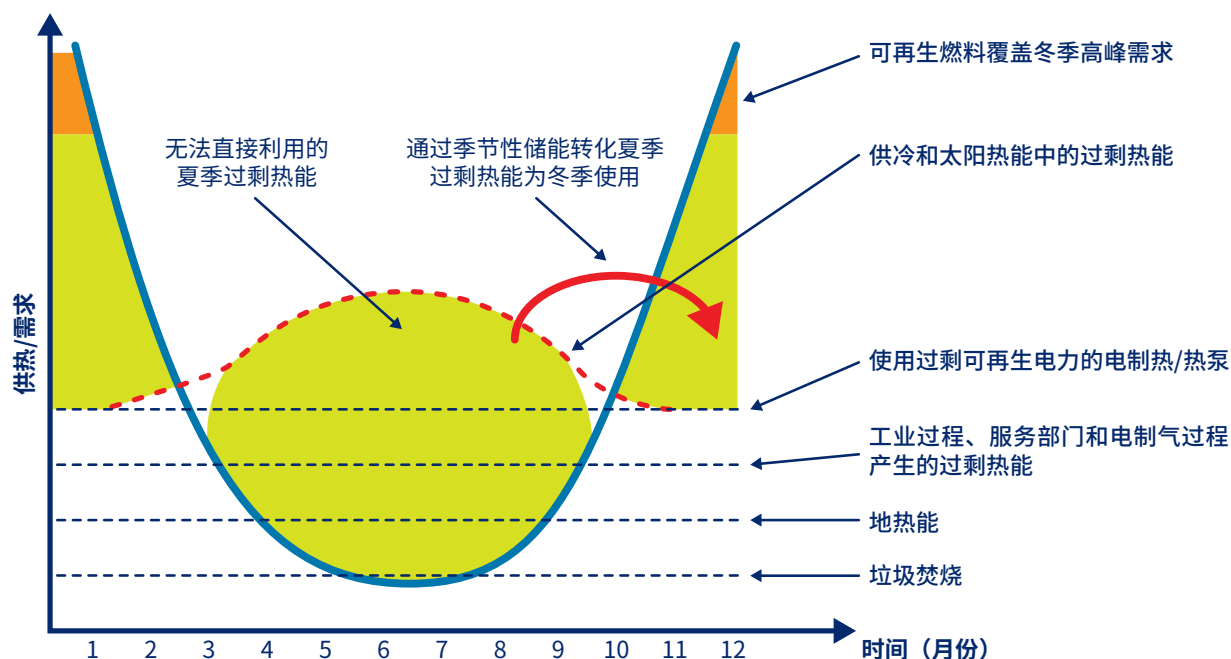
更大规模的储能容量将有可能消除区域供热网络整合大量不同可再生热源（不包括生物质）的主要障碍。这些障碍包括供需之间的季节性差异，以及夏季各种可再生热源之间的竞争。夏季的余热可以储存起来以供过渡或冬季使用，从而替代化石燃料（Köfinger 等人，2018 年）（图 17）。

照片 4：丹麦哥本哈根 AvedøreKraftværket 的蓄热装置（44,000 m³）



来源：Luis Sánchez-García

图 17：各种可再生和低碳热源之间的供应竞争以及旨在克服竞争的季节性储能潜力



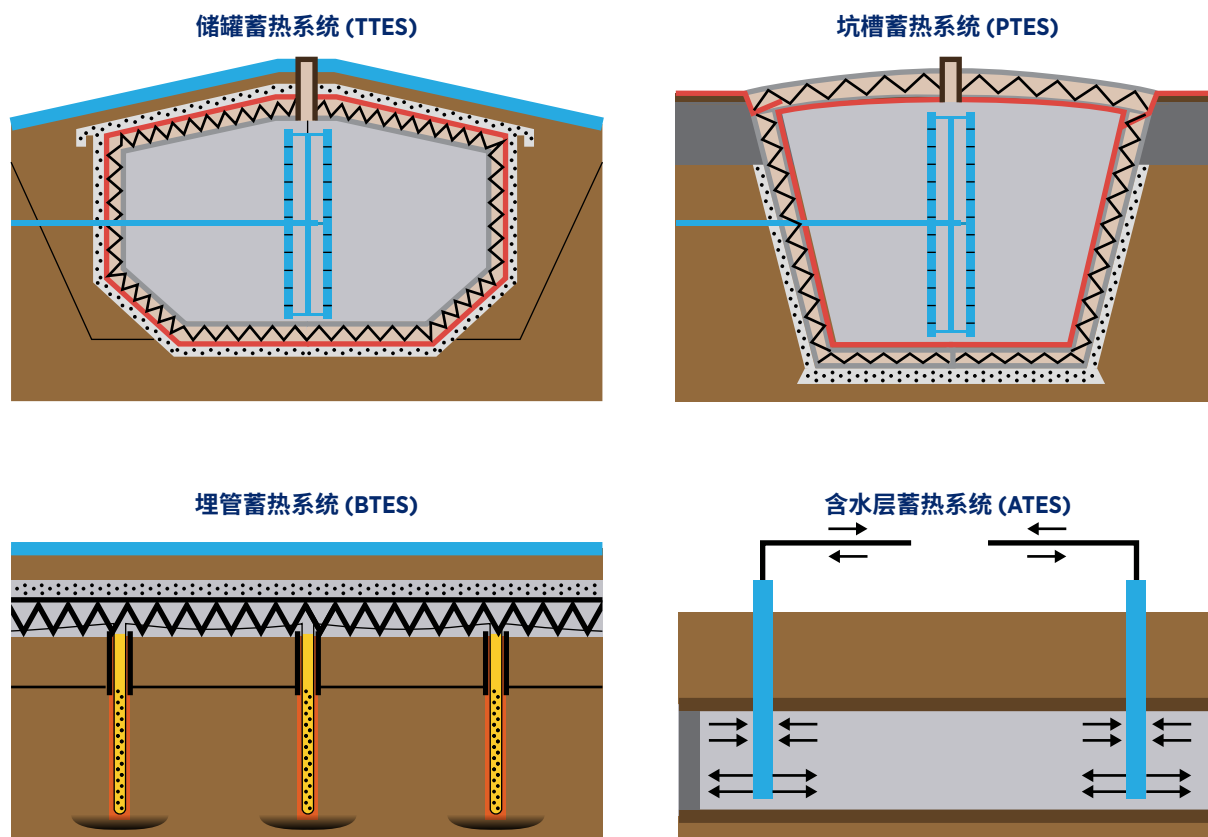
来源：AIT（2020 年）（Schmidt, Geyer 和 Lucas, 2020 年）

大型或季节性储能系统的类型更加多样，包括含水层、埋管或坑槽储能系统（Xu, Wang 和 Li, 2014 年），部分如图 18 所示。

1. 含水层蓄热系统 (ATES)：热能以低温 ($<30^{\circ}\text{C}$)、中温 ($30\text{--}60^{\circ}\text{C}$) 和高温 ($>60^{\circ}\text{C}$) 形式储存在地下水库中。
2. 埋管蓄热系统 (BTES)：热能（最高 90°C ）储存在地下 20-200 米的上层。例如，加拿大的 Drake Landing Solar Community 项目由 144 个深度为 35 米的钻孔组成。屋顶 $2,300\text{ m}^2$ 太阳能集热器产生的太阳能储存在钻孔中供冬季使用，以满足 52 座高效建筑 90% 的供热需求。另一个例子是丹麦 Brædstrup 镇的季节性储能，该项目使用 48 个钻孔储存附近 $18,600\text{ m}^2$ 太阳场的热能（PlanEnergi, 2017 年）。

3. 坑槽蓄热系统 (PTES)：配备保温盖的大型开挖坑槽可储存高达 90°C 的热水。丹麦已在马斯塔尔 ($75,000\text{ m}^3$)、多宁隆德 ($60,000\text{ m}^3$) 和沃延斯 ($200,000\text{ m}^3$) 等地建造多个坑槽储能装置（PlanEnergi, 2017 年）。
4. 矿井蓄热 (MTES)：废弃或透水煤矿中的水被作为空间供热的低温热源。加拿大斯普林菲尔德的废弃矿山及荷兰海尔伦的 Mijwater 项目夏季作为蓄热设施储存建筑和工业产生的余热。矿井蓄热的一种变体是洞穴蓄热，即专门挖掘洞穴用于蓄热。瑞典的 Lyckebo 便是如此，它在基岩中挖掘 $100,000\text{ m}^3$ 的洞穴中储存能源（Duffie 和 Beckman, 2013 年）。

图 18: 季节性蓄热概念



来源: Schmidt 和 Miedaner (2012 年)

如前文所述, TES 相比电力存储不仅便宜得多,而且还具有重要的规模经济效益。因此,大型坑槽蓄热系统的特定成本相较于 $1,000 \text{ m}^3$ 规模的水罐成本要低约 20 倍。相关成本的降低如图 19 所示。

目前为止,尚未在大型系统中实施大规模蓄热系统。前文所述的示例通常适用于数千居民的小镇。但较大城镇目前也正在考虑和开发一些项目。一个著名的示例是奥地利的格拉茨市,该市的区域供热网络由基于化石燃料的热电联产提供热能。格拉茨考虑的

一种方案是将太阳热能与约 $1,800,000 \text{ m}^3$ 的季节性储能相结合,通过利用 $450,000 \text{ m}^3$ 的太阳能集热器满足约 20% 的供热需求 (Reiter, Poier 和 Holter, 2016 年)。城市供热网络中,高昂的投资成本构成了季节性储能系统发展的主要挑战之一,同时还伴随着投资回收期延长带来的相关风险。在这种情况下,针对多个供应装置提供生产调度补贴有助于提高储能利用率,并最大程度地减少投资和运营成本 (Köfing 等人, 2018 年)。

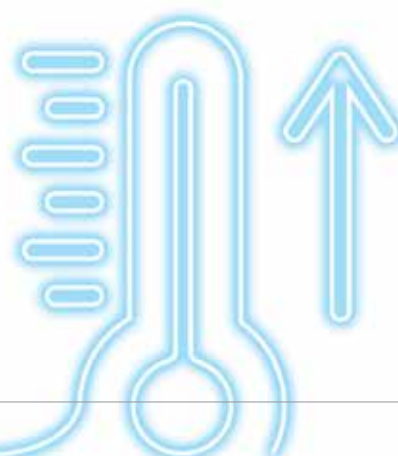
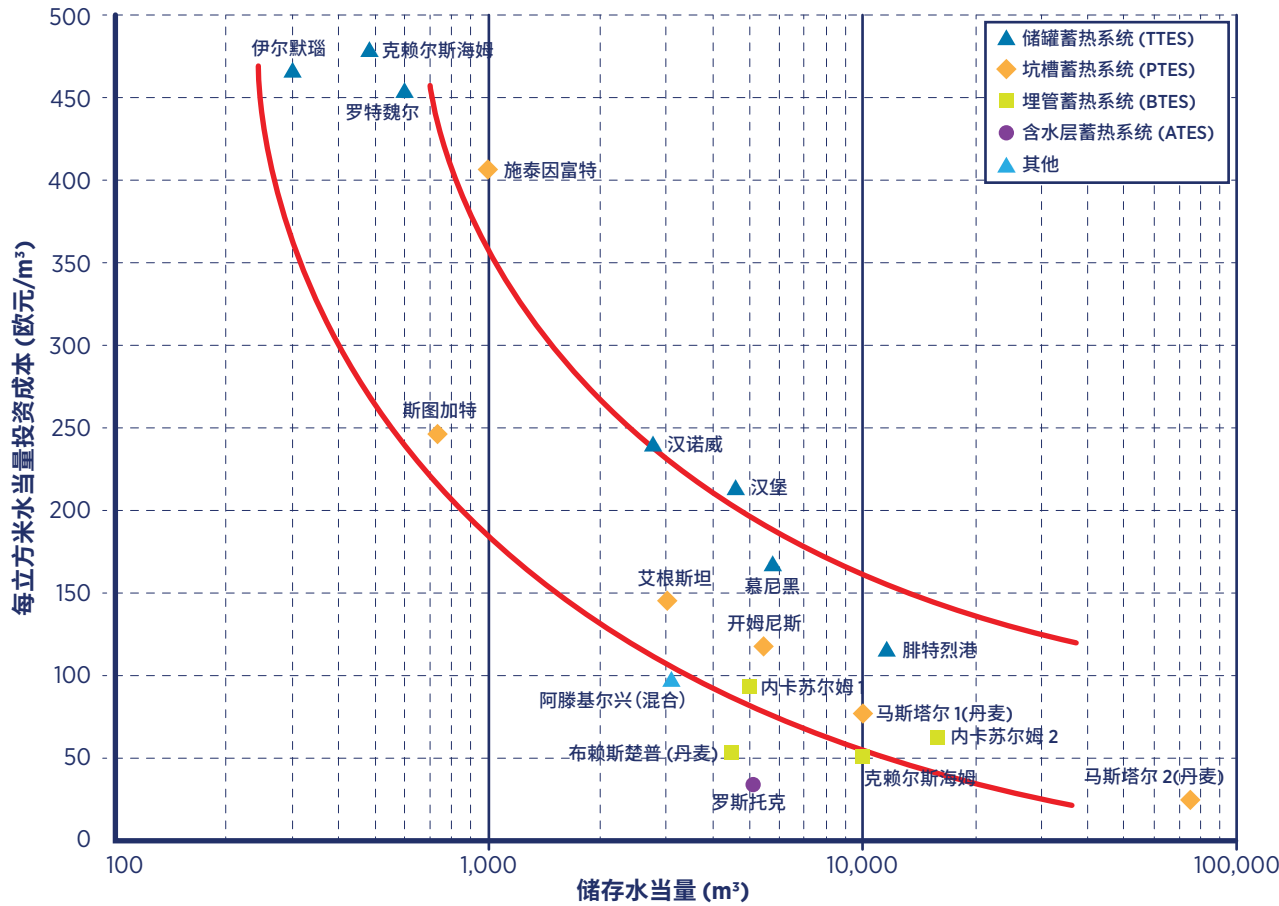


图 19: 季节性储能成本



来源: Schmidt 和 Miedaner (2012 年)

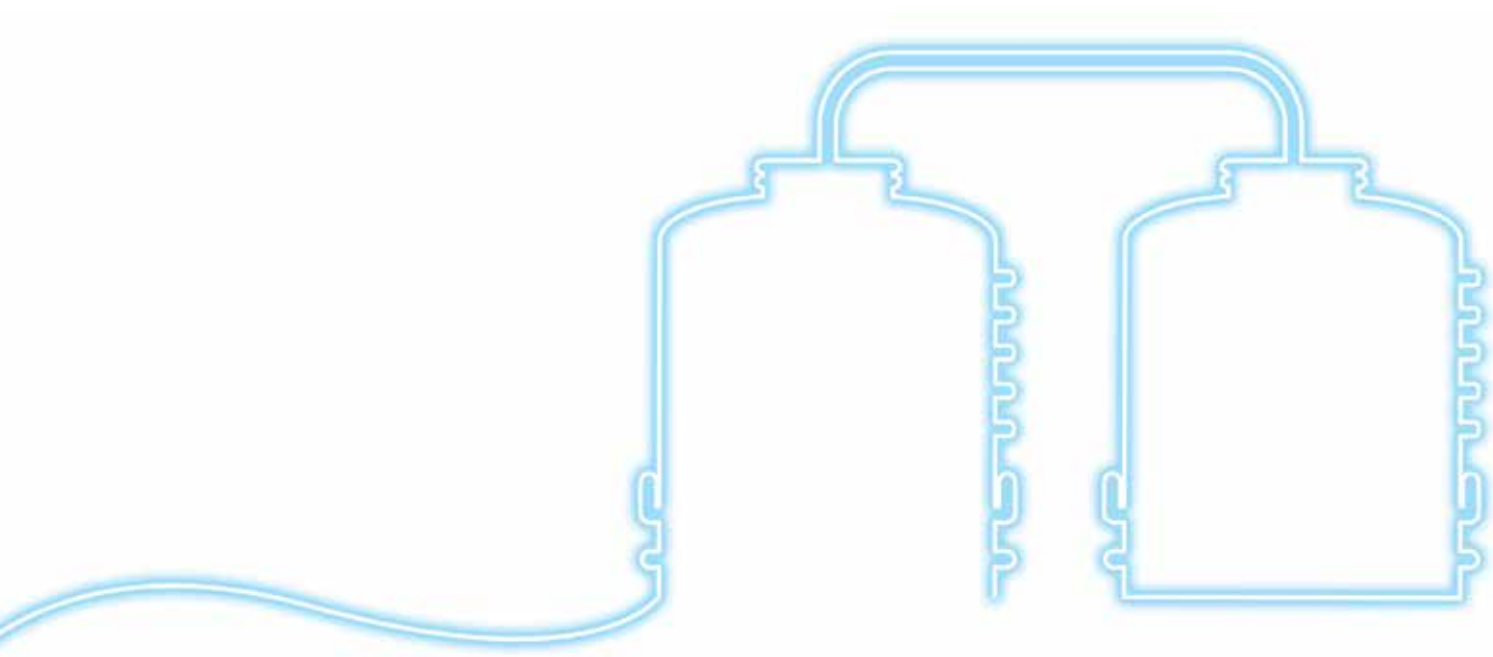


表 1 总结了智能能源系统中主要低碳热源以及使能技术的优势和作用。

表 1：能源系统中可再生能源、余热源和使能技术的主要优势和作用

		优点	潜力	在能源系统中的作用
来 源	地热	持续可用，不依赖于天气条件 运营维护 (O&M) 成本极低	数量大，尤其是浅层和低温地热资源 (可在不同深度获得不同温度的资源)	可用于集中开发大型区域供热或供冷系统
	太阳热能	可持续资源 运营维护 (O&M) 成本极低 使用寿命极长	几乎随处可获得	可覆盖区域供热系统中的夏季负荷 夏季可提供供冷 可与季节性储能结合使用
	生物能	某些地区有丰富可持续的资源	几乎随处可获得	可与太阳热能结合用于区域供热 可与其他部门用途（运输或其他目的）竞争
	自然冷却	丰富 运营维护 (O&M) 成本极低	数量大	可减少电力消耗并在未使用制冷装置的情况下获得冷冻水
	余热	使用如不加以利用就会损失的资源 成本优势	工业和商业地区	可以减少供热供冷替代来源的能源消耗
使 能 技 术	热泵	利用空气、水或地面的可再生能源以及建筑和工艺产生的余热提供供热供冷能力	随处可获得	可作为电力和供热部门之间的转换技术 可将低温热源升级到更高的温度水平或生产冷能
	蓄热	与电力存储相比，每单位储存容量的投资成本降低 100 倍 规模经济	空间及地质条件有利之处即可实现	整合波动性可再生能源生产

B 部分：

决策者指南

B.1 制定战略性供热供冷规划

B.1.1 需要相互促进的国家、地区和地方行动

解决能源相关的问题要做到协调有序、了解知情和高瞻远瞩，就应做好战略能源规划工作。（SEP）。SEP 主要旨在解决当前能源供应问题，能源转型的长远战略和规划。必须要对技术、经济、环境和社会背景进行评估（Krog 和 Sperling，2019 年）。

SEP 可在不同政府层面和不同地理区域或根据不同的技术重心进行。同时，SEP 应考虑上述不同领域，以避免某些领域不够最优。

由于供热供冷资源的本地性，战略性供热供冷规划（SHCP）与针对其他能源载体的规划确实有所不同。因此，本指南将针对这一问题进行研究，并讨论地方相关部门在 SHCP 活动中的参与情况。

超国家、国家或地区能源和气候目标只有根据当地情况进行调整 and 适应后才能实现。反之，地方目标必须从国家 / 地区角度出发，且需要有利的立法框架才能取得成功。

此外，必须从系统角度进行 SHCP，在可再生能源系统中这一点尤为重要。从系统角度来看，电力供热供冷部门的技术协同效应在理想情况下也必须反映在政策和法规中，正如 Hotmaps 项目所强调的那样（该项目考虑了如何在欧盟成员国范围内开展 SHCP 活动）（Hotmaps Project，2020 年）。

按照这种考虑，在启动 SHCP 过程之前，公共政策与监管框架之间的相互配合至关重要，以确保其能够融入并与各级治理以及能源相关的所有政策领域保持协调（Djørup 等人，2019a）。表 2 给出了一种矩阵模型可用来分析这种匹配度。

另一方面，既有 DHC 系统辖区的地方政府具有强大的行动影响力。SHCP 能够从长期、整体能源的角度评估项目实施。

地方政府对于 DHC 发展所起的作用是多方面的，涉及民间社会的各个层面：能源和城市规划、通过提供基础设施和服务建立财务和技术支持机制、提供部署区域能源系统的法律许可甚至将公共建筑连接到 DHC 网络。所有公共机构都可在其中发挥重要作用。例如，作为监管者，市政府可以发布强制接入 DHC 的地方分区政策（IRENA，2016 年）。部分国家 / 地区的地方政府认为自己无法进行能源规划或建立支持机制等；因此，他们认为直接影响 DHC 的实施不在其职权范围之内。但是，即使监管权力集中，其在该地区作为召集者、促进者和知识库对于 DHC 的发展可能也起到非常重要的作用。

“地方能源和气候规划必须符合国家目标，并考虑整个城市的能源系统的整合情况。”

表 2：用于匹配供热规划公共监管框架的矩阵模型

	项目法规	供热和建筑法规	能源系统法规
地方法规	☑	☑	
地区法规	☑	☑	
国家法规	☑	☑	☑
超国家法规	☑	☑	☑



来源：欧洲太阳能热能协会

B.1.2 通过战略性供热供冷规划建立可持续能源供应

SHCP 不仅是工程、经济或政治活动，本质上还是跨学科的。第一步是（政治上）评估供热供冷系统需要实现的战略目标；即需要解决什么问题？许多情况下，启动 SHCP 的催化剂是能源系统脱碳或减少颗粒物的目标需求。但通常潜在目标还包括希望拥有经济实惠的供热供冷系统，并进一步通过稳定价格防止能源贫困；与能源系统中其他部门保持一致并为之提供便利；通过发展当地市场支持当地经济。从政治和社会层面开始 SHCP 流程之前建立这些战略能源目标有助于制定一项能够满足长期需求和愿景的规划，并使每个（可再生）供热项目更好地与规划过程保持一致。

要制定规划，接下来就必须考虑可用资源、能源需求、技术潜力、现行立法、能源部门组织以及相关参与者和政治驱动等相关因素。所有这些都会影响到可能的解决方案，同时有助于找出障碍。低碳能源供应相关的挑战可能同样具有技术、经济、政治或社会性质，且通常分布在这些因素中。重要的是，开展 SHCP 的能源规划部门必须保持开放态度并考虑以上所有不同因素的重要性（Mirakyan 和 De Guio，2013 年）。

制定 SHCP 是开发具有成本效益的区域能源的最佳方式。规划可找出机会和协同作用，并在城市不同地区采用量身定制的政策或经济激励措施（UNEP，2015 年）。本指南旨在解决以上方面的问题，并提供执行 SHCP 流程的模型。因此，对于读者而言，最重要的是考虑针对当地环境调整必要步骤、关注重点或方法。

由于 SHCP 涉及诸多不同专业领域，因此相关评估的难点在于如何利用正确的知识和技能。规划工作还涉及到建筑部门、可用资源、能源部门以及法律和商业方面的知识。这通常需要在某一地方市政当局跨不同专业领域和多个办公室，而此前这些部门或办公室可能不习惯以跨部门的方式工作。这是组织上的挑战，应从一开始便予以考虑。此外，取决于所需改变的大小，这些项目期限可能会很长，这不仅受到具体施工情况的影响，还受到政策变更或公众接受度的影响。

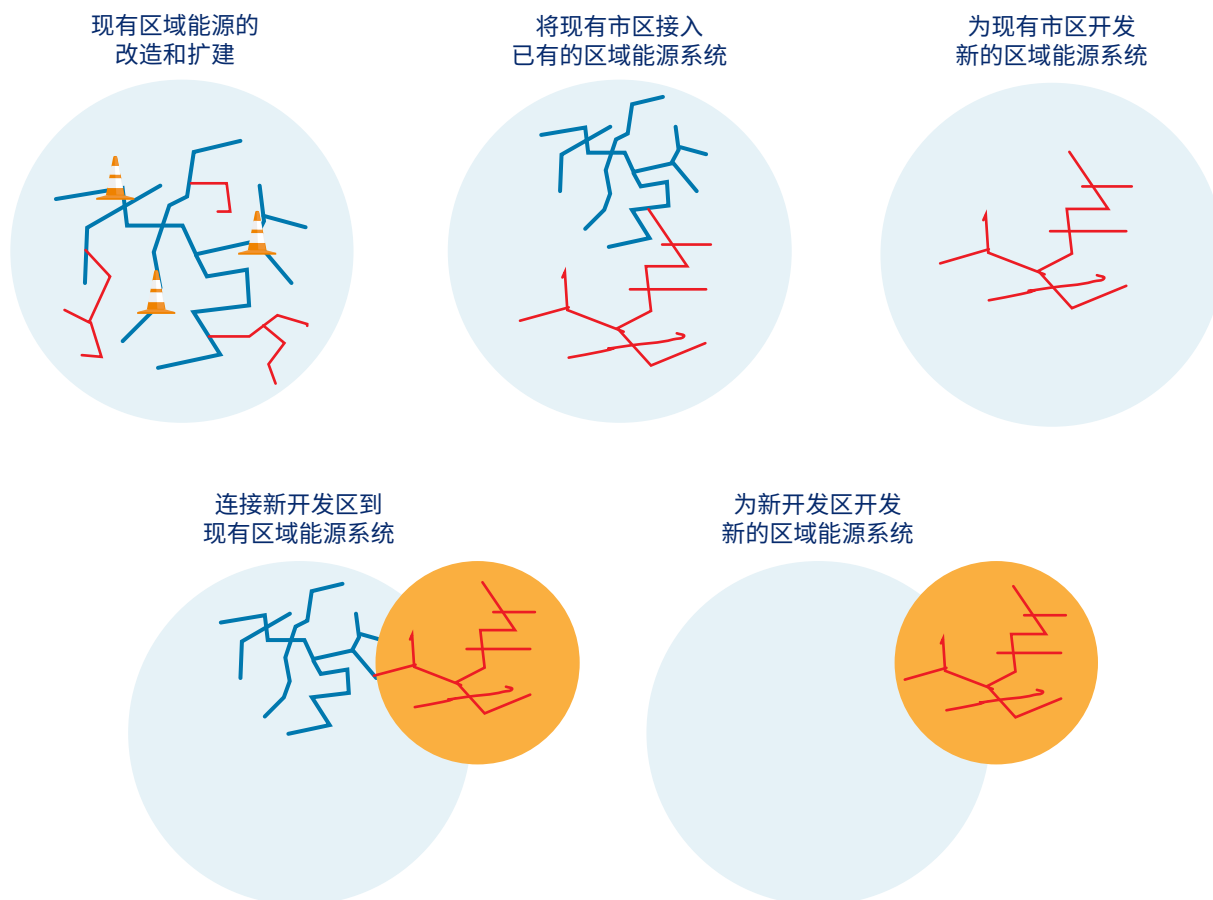
在评估区域能源系统在地方 SHCP 中所发挥的作用时，要回答的主要问题涉及到系统的可行规模及其组织和监管。本报告涉及 SHCP 流程的三个主要阶段：

- 提出规划要解决的战略目标范围、明确规划的目的，找出并归类各利益相关方
- 可用于寻找适合战略目标的系统的技术分析
- 评估关键体制、财务和组织要素并制定政策以促进转型。

整个流程及每一步骤都必须以迭代方式进行，各阶段之间都会相互影响。每次迭代将明确规划实施的详细信息。尤其是构建战略供热技术方案需要多次迭代。这是确定供热投资和热能节省之间的长期平衡，并确保目标与国家 / 地区或国际目标保持一致而必须采取的措施。SHCP 流程的第一步有助于确定区域能源项目的潜力和作用，决定哪些项目应优先考虑，以及现有系统中的燃料转换潜力。

这些阶段既可以应用于国家 / 地区层面，也可以应用于新领域规划以扩建当前系统或针对既有系统进行翻新和重新配置。地方层面则可以考虑不同情况，因为区域能源可以既向新建建筑也给现有建筑供热供冷，因此新建的和现有居民区都可以考虑建立这一能源系统。图 20 展示了部分应用示例。

图 20：各种城市环境中区域能源网的应用



依据：IRENA (2017b) 和 Olsen (2014 年)

“制定战略性供热供冷规划是开发具有成本效益的区域能源的最佳方式。规划可找出机会和协同作用，并在城市地区采用量身定制的政策或经济激励措施，

考虑到可能存在的不同应用，SHCP 流程的关注重点根据当地情况而有所不同。针对现有 DHC 系统，SHCP 应包括对当前系统的诊断及对所提供服务质量的评估。虽然“质量”是主观的，但应包括系统实现的温室气体减排、客户对服务的满意度以及替代燃料（碳氢化合物或煤炭）成本补偿等方面的核算。

尚未建立 DHC 系统的城市地区通常不存在热 / 冷网络的组织、所有权和监管原则，或者建立在其他类型的基础设施这上，而这些基础设施并非专门为 DHC 开发的。尤其是在这些情况下，必须先通过城市范围评估和区域能源战略研究不同供热供冷技术早期规划阶段的技术潜力，然后再考虑并制定这些原则（参阅 B 部分第 6 节）。由此一来，治理原则应根据全市的战略目标和 DHC 的潜力进行调整，从而使特定项目能够在该框架内实施，而不是根据项目挑战来调整，从而引发治理障碍。

B.1.3 定义战略性供热供冷规划的范围和目的

SHCP 流程第一部分的重点是确定改变供热和 / 或供冷供应思路的目的并确立战略目标。这第一步至关重要，因为它将影响 SHCP 流程的其余部分。该步骤中确定的目的将影响相关利益相关方群体、可能采用的技术以及应该部署的治理模型。这也是 SHCP 反馈渠道至关重要的原因，因为流程后期可能会出现全新的知识。

制定全新供热供冷规划可能的出发点包括减少碳排放、确保供应安全、提高能源效率、减少当地空气污染、利用现有资源以及只是为了符合监管任务（例如必须对 DHC 潜力进行强制性评估等）。许多这些出发点可能是一致的，但同时涉及不同参与者的轻重缓急。尽管中央政府可能设定了限制气候变化的供热脱碳目标，但地方政府可以推动改变以减少局部污染或推动地方层面可能采用的其他“绿色”倡议。城市越来越多地承担起降低能源消耗和 / 或供应方面碳排放

相关的责任，并要求使用治理和监管工具实施他们自己的解决方案。一旦确定目的，这些目标便应专注于供热供冷规划要解决的问题，而非着眼于支持任何特定技术。因此，这种目的可能涉及到做出一些改变，这些改变可能不容易实施，也可能要求组织和监管方面做出很多改变。

包括城市在内的地方政府可以参与推动能源转型，并规划社区能源解决方案以帮助实现特定的目标和指标（IRENA，2016 年）。鉴于各种相互矛盾的目标，能源战略应设定一个明确针对供热 / 供冷部门的可再生能源官方目标。官方目标对于成功实现能源转型至关重要。该目标应描绘出不同的技术（包括区域能源）在满足更广泛的社会、经济和环境目标方面的主要优势。

考虑区域能源在向低碳能源组成的综合能源系统转型中的作用非常关键。在此背景下，重点可能是供热供冷，但同时也要考虑 DHC 系统与其他能源部门（如电力、天然气和运输）的关系（部门耦合）（参阅 A 部分第 1.2 节）。

具体的供热供冷规划通常落实到城市的地方项目。但好的 SHCP 不仅关注眼下的 HHC 项目，还必须体现并协调好全市范围能源系统的长期发展潜力。例如，要避免建立 5 年后发现不易扩展或不能与系统其余部分互连的 DHC 项目。此外，由于各部门之间的潜在协同作用，SHCP 必须在所有能源相关政策领域中与各个治理层级保持一致。地方规划流程中若未在更大范围内（例如跨项目、地区或国家和国际层面）实现协调，则存在次优化风险。

丹麦奥尔堡的 SHCP 就是采用综合能源系统方法对现有区域供热系统进行规划的示例之一。“奥尔堡 2050 年能源愿景”的主要目标（见文本框 1）旨在提出奥尔堡能源供应的设计方案，以帮助实现丹麦的长远目标，即到 2050 年实现 100% 无化石燃料。郑州案例阐明了新开发区的 SHCP 流程（文本框 2）。

文本框 1

奥尔堡（丹麦）： 奥尔堡 2050 年能源愿景



奥尔堡市政府、环境与能源管理局、城市与景观管理局以及奥尔堡区域供热（公用事业）代表定期讨论 SEP 流程。此外还与当地工商业利益相关者进行了商谈。利益相关者之间的信息流构成了 SEP 流程的指导原则。同时，这是当局可应用于未来能源系统规划的一种方法，以使利益相关者的参与和购买行为在国家 / 地区和全球性工作中起到协调作用（Thellufsen 等人，2019 年）。

奥尔堡案例充分展示了综合能源系统规划的特征。“奥尔堡能源愿景”是对整个能源系统的研究，包括区域供热的作用及各方面的分析，并从国家层面考虑了 2050 年实现 100% 无化石燃料的长期目标。

“奥尔堡 2050 年能源愿景”的制定流程考虑了几种方案。这样做的部分原因是为了证明节省热能和进行低温区域供热的需要，部分是为了表明奥尔堡的供热系统对工业余热的依赖程度。另外一种替代方案是使用单体热泵代替区域供热。

结果表明成本最低的方案是通过热泵利用电力为区域能源系统生产热能，并与蓄热装置结合应用。该情况下的单体供热量约为 0.2 太瓦时 (Twh)，而供热需求约为 1.9 TWh。1.65 TWh 的区域供热需求中，工业余热的贡献约为 0.9 TWh。其余需求将通过地热源、热泵和天然气 CHP 厂产生的热能满足。



来源：Shutterstock

奥尔堡市中心和 NørreSundby 滨水景观

文本框 2

郑州（中国）： 新区的战略性供热规划



中国郑州市龙湖金融中心是郑东新区中央商务区的扩建项目。该项目旨在容纳总建筑面积约为 310 万 m² 的高层办公楼和住宅。

郑州是一个非常有趣的案例，其 SHCP 已应用于新建的区域能源系统，从一开始就将供热供冷视为城市基础设施的组成部分。在城市规划阶段，数个公共服务和市政（废水和供热 / 供冷、水电供应、互联网电缆、运输）部门互相合作，共同起草城市整体规划文件。

热网得以连到新区的每个位置，从而使区域能源系统以具有成本效益的方式应用于所有建筑。此外，区域供热网络和市政设施的联合规划有助于利用废水中的余热作为热网的热源。

城市规划过程中及完成后，地方政府帮助协调了必要的法规、政策和设计准则以支持该项目的开发。作为战略方法的一部分，法规包括强制所有全新建筑与区域能源网连接（Riahi 等人，2017 年）。



来源：Shutterstock

中国郑州市郑东新区城市景观。

从这两个例子可以看出，地方和国家 / 地区各级政府在战略规划以及最终落实发展规划中都发挥着重要作用。地方政府应负责协调利益相关者以及建设供热供冷基础设施。国家或地区政府必须确保适当的法规以指导地方政府采取行动，并设定适当的边界条件，以协调方式指导地方行动（参阅 B 部分第 6.3 节）。如果没有明确目标（例如脱碳目标、污染目标、客户保护法规和能源供应），就会出现地方政府各自为政以不同的方式解决相关问题的风险，即使是相邻辖区也会有所不同。因此，可以制定包括利用低温资源（包括地热资源）在内的供热供冷规划，并列明确目标。

最后，SHCP 的时间框架应尽可能考虑长远的社会目标，而非仅仅是短期投资期限（例如 10 年）。考虑较长的时间框架有助于分析如何实现不同的社会目标。如果不考虑这点，那么今天看来有利的投资可能因无法适应未来的能源供应而成为搁置资产。

“地方和国家 / 地区各级政府在战略性供热供冷规划以及最终实施发展规划中都发挥着重要作用”

关于制定战略性供热供冷规划 (SHCP) 的建议摘要

在新的和现有的 DHC 系统中开发和利用低温可再生能源的第一步便是制定 SHCP。SHCP 进程的关键成功因素可以概括为：

确定 SHCP 的范围和目的。

- ➔ 明确 SHCP 的战略目标。可以出于多种目的执行 SHCP 流程（例如脱碳、减少污染、提供经济实惠的供热供冷等）。这种战略目标应指导其余流程的实施。
- ➔ 确保地方供热供冷目标与国家 / 地区脱碳策略（如果有）保持一致。由于热能利用的地方性，供热规划通常在城市或市政层面进行。但是，国家和地区层面需要针对地方规划进行调整并加以指导。

制定长远的转型战略和规划来解决当前的能源供应问题。

- ➔ 地方当局参与 SHCP。地方当局在 SHCP 流程中起着至关重要的作用，例如能源和城市规划、提供供热供冷基础设施、法规和融资等。
- ➔ 确保将 SHCP 嵌入各级治理层面以及能源相关的所有政策领域并与之协调。特别是要将 SHCP 与节能建筑存量规划整合，其中可能包括一些只适用于连片建筑群（区域）而不适用于单体建筑的技术。

SHCP 流程具有迭代性、多学科性和连续性的特点，因此适用于各个层面和各种环境。

- ➔ 借助多维度和经过反复论证的方法不断优化流程。为了实现利益最大化的目标，首先应从长远的角度实施 SHCP 流程，其次应考虑该规划与其他能源系统的协同作用，（如电网），还应采取包括经济、环境和技术方面在内的多学科方法。
- ➔ 因地制宜，调整 SHCP 流程的侧重点。无论如何，请记住，管理原则应适应于战略目标而非项目挑战。SHCP 的主要三阶段：i) 确定范围、目标和利益相关者参与计划；ii) 反复论证可持续能源供应技术方案的可行性；iii) 确定 DHC 管理计划。

B.2 利益相关者参与

B.2.1 利益相关者的识别和协调

供热和供冷部门涉及到众多利益相关者，他们都有自己考虑的重点。这些利益相关者可能是来自具有高能源需求行业的消费群体，如工业、医院、废水处理厂或温室。这些行业的能源消耗量巨大，但同时也会产生可观的余热能源。关键的利益相关者可能与能源部门直接相关，如发电厂、能源传输公司（如现有的区域能源供应商）或开采业公司。然而，如果利益相关者认为自己并非某个活动的主要当事方，便会置身事外。

由于供热供冷具有地方性，向低碳供热和供冷技术转型的过程中，必须确定地方利益相关者并与之达成合作关系。在组织流程和确定参与的利益相关者的过程当中，地方政府将发挥主要作用。

由于必须排除不符合既定范围的利益相关者，必须要弄清楚哪些是领导这一过程的主要参与者，以及由谁来负责指定和召集其他的利益相关单位。而且并非所有的热源都符合既定目的，国家和地方的规划也可能与某些既定行为者的规划背道而驰。

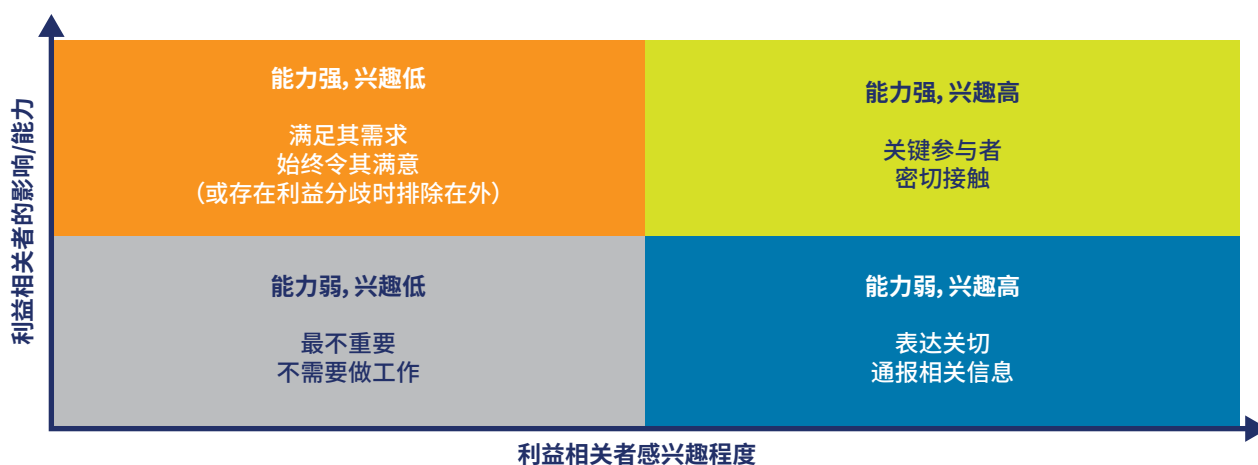
因此需要：

- 确定机会，让利益相关者参与该流程，让他们在供热供冷规划的实施过程中发挥建设性作用
- 确定协同作用，建设有成本效益的区域能源系统。

建议利益相关者尽早参与和管理该流程，这很大原因是为了促进公众的接受程度。明确规划的每个部分的主要利益相关主体也很关键。有些可能是长期规划的利益相关者，有些可能是特定部分（例如开发特定可再生资源）的利益相关者，而其他的则可能是诸如既有区域网络开发中的利益相关者。这意味着，尽管某些利益相关者可能是开发 DHC 系统某些部分的关键，但他们也可能与其他部分无关。

将打着不同算盘的利益相关者协调在一起，尤其是在职能和目标相悖的情况下，会给政府带来不小的困难。必须积极鼓励许多潜在利益相关者参与其中，以增加他们的兴趣和参与度，或者直接将其排除在外。例如，一家医院可能认为自己不是主要参与者 - 因为他们的活动是提供医疗保健服务，而供热和供冷只是所有这些活动的极小部分，因此最初他们对该流程的兴趣可能不高。因此，有必要根据项目的影响力和感兴趣程度对利益相关者进行分类，以制定参与策略，如图 21 所示。

图 21：基于影响和感兴趣程度的利益相关者分类



来源：日内瓦大学 (UNIGE)；基于 Mendelow (1981 年)

可通过其影响力和感兴趣程度评估利益相关者在 SHCP 或项目开发中的作用。对 SHCP 具备高度影响力和浓厚兴趣的利益相关者对于战略或项目的成功至关重要，应尽早确定相关主体并使其并密切参与其中，而影响力极小和缺乏兴趣的利益相关者所需的参与程度也可能极低。

供热供冷规划活动的范围和目的对于确定流程应包括的参与者和利益相关者至关重要。如表 3 所示，应确定可能参与项目的利益相关者，并制定参与策略确保项目成功。Čížman 和 Bugarova（2019 年）中列出了重要的利益相关者及其在中欧和东欧区域供热系统改造过程中起到重要作用的参与者清单。

表 3：可能涉及的利益相关者在 SHCP 中扮演的角色及其参与策略

利益相关者	角色 / 影响 / 利益	参与策略
国家政府、州政府或省级政府 ⁶	提供与法规、工具和命令相关的框架条件。 一般会发放允许项目开展的许可证和执照。 可以为项目提供资金。	基于国家能源政策参与规划。如能源安全、健康、脱碳等方面。
地方（市政 / 公民）当局 ⁶	一般负责监督法规的实施情况。 项目所有者和主要推动者。 掌握涉及特定项目情况的重要的地方性知识。 能够提供允许项目开展的许可证。 保护消费者的利益。 主要消费者（公共建筑）。	以 SHCP 的驱动力为基础参与流程。如与能源匮乏、空气污染和无法获取能源相关的地方需求。国家政府（或州 / 省）可以为地方政府提供有关 DHC 潜力和法规的义务性评估。
公用事业 / 开发公司	取决于所有权。 DHC 系统的利益应和战略目标一致。 确定与其他开发商的协同作用，并从中获益。	开发商业案例。
投资者和金融机构	为项目提供金融性投资资金，回收投资成本。	了解管理投资决策的评估标准和优先事项。
研究人员 / 学术界	提供与新兴技术、挑战和现象有关的（自主）知识。 能够独立评估潜在的发展途径。	研究 - 行动项目。

⁶ 由于政府制度具有多样性，上述国家政府和州、省或地方政府可能会通过其他方式实施相关政策（反之亦然）。

表 3：可能涉及的利益相关者在 SHCP 中扮演的角色及其参与策略 - 续

利益相关者	角色 / 影响 / 利益	参与策略
建筑开发商	开发允许采用低温供热供冷源的新楼盘。	遵循建筑规范或标准。 发布规定，要求建筑物与区域能源供应系统相连接。
建筑物业主	提供建筑物侧供热厂的信息。 允许进行安全检查，检测 / 纠正系统故障。 决定是否对系统进行优化。	遵循建筑规范或标准。 发布规定，要求将建筑物与区域能源供应系统相连接。
客户	提供与热需求相关的信息。 通过行为影响系统效率。 支付账单。 充当生产消费者的角色。	统一与客户的利益。 制定合同协议保护利益。
公民	公众接纳。 作为供热用户参与采用。 成为投资者。	应该加入该流程。 应了解该群体的愿望和驱动力。
地质调查	提供与地质条件和现有地热资源有关的重要信息。	评估资源潜力。
地热能和太阳能开发商	启动项目并提供更为详细的热资源指标。	需要确定投资和风险管理项目。 需要就勘探、测试和运行进行适当的招标活动。
余热能源供应商	可为网络运行提供实惠的供热价格。	需要了解有关回收热量的技术问题和潜在的商业影响。 参与制定“售热”合同协议的流程。
技术供应商	为当地创造附加值和就业机会。 支持提高 DHC 系统的灵活性。	需要确定投资和风险管理项目。 为研发供热供冷可持续技术提供资金。

确定利益相关者后，他们必须在流程中找到自己的位置并愿意参与其中。利益相关者应该从余热利用、可再生能源的转换以及全新能源系统的安装或旧区能源系统的翻新等过程中受益。这可以通过采取盈利

的商业案例、提高的环境影响、稳定的能源供应或其他形式实现。文本框 3 突出显示了主要利益相关者在丹麦两个不同案例中的作用。

文本框 3 主要利益相关者的作用

丹麦的两个不同案例突出了主要利益相关者的重要性及其对未来战略制定和实施的影响。

- 奥尔堡市议会在供热规划中设定了宏大目标，即到 2050 年彻底淘汰燃煤供热生产。作为主要利益相关者，奥尔堡市议会决定实施绿色能源战略供热规划，因此将私营供热企业（主要供热商）排除在该战略规划之外——因为其利益与该城市的预期目标不符。因此，市议会从私人能源公司购回当地 CHP DHC 厂，以避免实行热能生产变更并最终取代燃煤 CHP 作为热源时可能出现的利益冲突。

- 维堡的区域供热公司是消费者所有的合作公司，也是主要利益相关者。该公司根据客户意愿制定了一项策略。这些意愿包括稳定的价格、不依赖化石燃料且不受成本波动影响、提高需求侧能源效率以及向低温区域供热转型。该策略的实施与利用天然气为系统供热的市政 CHP 厂利益相反。因此，公用事业公司决定从市政当局购买热能生产装置，以此将该利益相关者排除在规划流程之外。

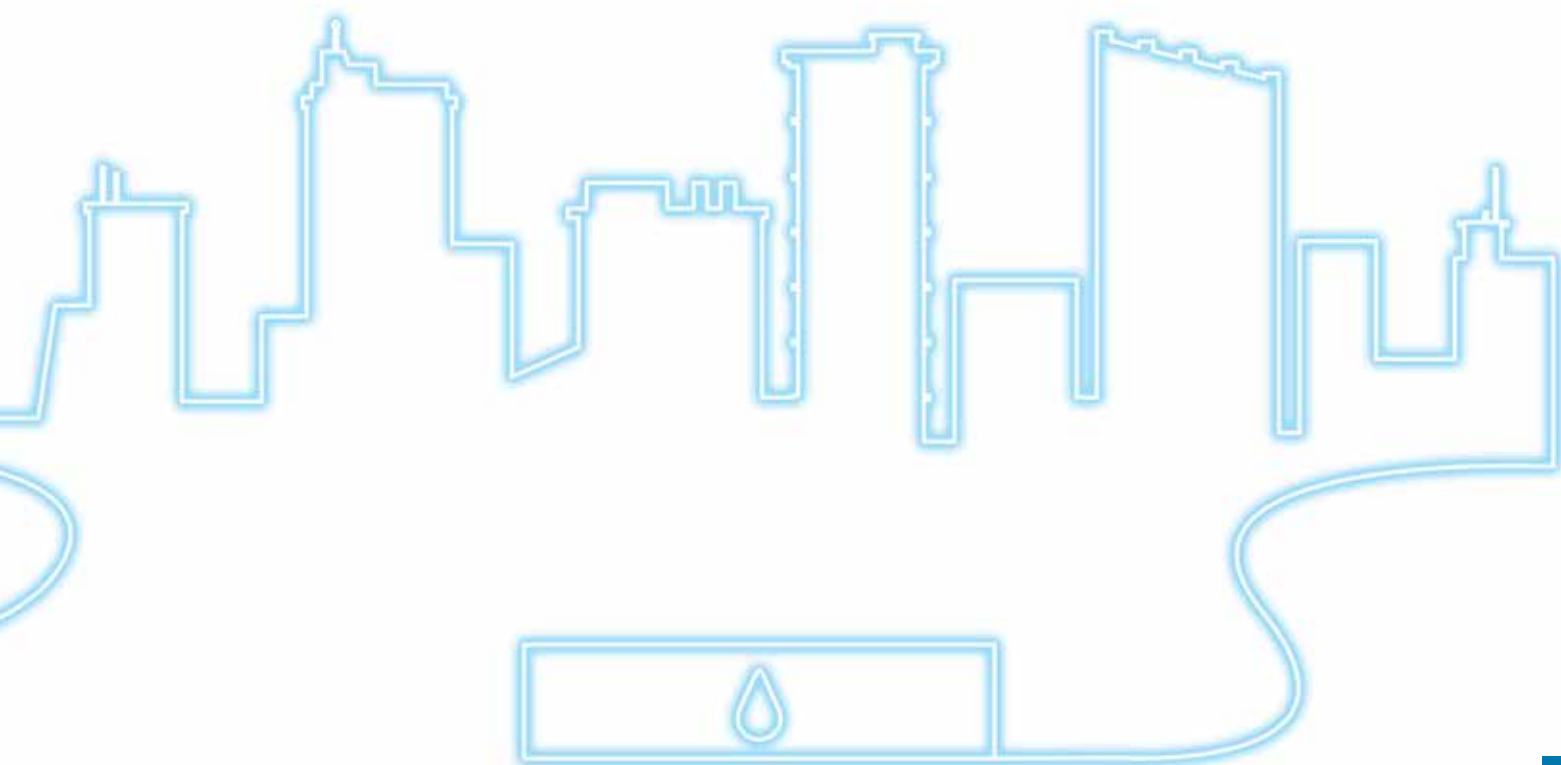
供热公司在这两个城市中均被确定为主要利益相关者，其目标是生产可持续热能并实施绿色供热战略。这两个案例都是 DHC 重要利益相关方之间产生利益冲突的示例，这可能会阻碍系统向更加可持续的运营转型。在需要更换技术或放弃化石燃料的情况下，控制热能生产更是至关重要。

应该解决城市中部分可再生能源发展相关的环境问题，以提高社会接纳度。为了使公众更加了解地热能并解决可能引发社会抵制的环境问题，GEOENVI 项目（GEOENVI，2019 年）建立了一个数据库，其中包括地热项目环境方面相关的影响、风险及缓解措施。此外，自 2020 年 4 月起，该项目便开始开发一种统一方法以评估地热项目的环境影响以及协调生命周期分析。目的是通过可公开访问的数据库提供地热项目的相关信息，从而提高决策者和公众对地热能的认识。

对于直接或间接受到能源项目实施影响的利益相关者，其参与过程应该妥善组织并细化，以确保通过项目消除他们的担忧及满足他们的期望。例如，地热资源的使用需要从地下提取能源。这将涉及住宅物业和建成区域内部或附近地热井的钻探和测试工作。这可能会引发社会对该项目的抵制，因为它包括动用重型设备、钻井过程产生噪音，还可能引起微震

（Popovski，2003 年）。如德国大盖劳案例所示（文本框 4），要解决这一问题，非常重要的一点是，项目一开始便共享相关信息并鼓励包括公民在内的利益相关者参与其中。尽管该项利益相关者参与策略已在项目层面实施，但类似原则也可在 SHCP 开发过程中应用于战略层面（国家或地方政府层面）。

“利益相关者必须尽早参与解决公众关注的问题，确保公众能够广泛接受新的可再生能源技术。”



文本框 4

大盖劳（德国）： 成功的利益相关者参与策略



如德国大盖劳的公用事业公司 ÜberlandwerkGroß-GerauGmbH (ÜWG) 所示，利益相关者的参与确保了当地社区与地热开发商之间的透明和互信，进而促进公众对该项目的认可。将参与过程结构化旨在从政治角度而言创建一个稳定项目。

参与第一阶段是社交网站征求意见，需要收集公众对该项目的看法，例如希望、期待、担忧及看法。这通过采访和持续的媒体分析完成。

在第二阶段，即利益相关者对话中，咨询小组讨论了社交网站征求意见期间发现的问题，吸引了不同的利益相关者成员。之后，咨询小组向项目开发商提出环境、成本、收益、项目风险以及沟通等方面的相关要求。最后阶段是公众（其中包括一般公众）参与，向公众提供信息，并针对具有争议的问题进行详细讨论和解答。这通过会议形式完成。

该流程结束时，一项调查表明，受到项目影响地区的大多数居民都对该项目呈支持态度，并倾向于优先开发地热而非其他能源（Wallquist 和 Holenstein, 2015 年；Allansdottir, Pellizzone 和 Sciallo, 2019 年）。



来源：Shutterstock

德国黑森法兰克福附近大盖劳镇的鸟瞰图。

这种高度透明再加上地方的大力参与增加了公众对区域能源和可再生能源项目的理解度和接受度。

总结利益相关者分析和参与所面临的挑战和建议

利益相关者的确定和参与。

- ➡ 确定 SHCP 的利益相关者，了解他们对供热供冷项目的兴趣和影响程度。地方当局通常会担任 SHCP 的领导者，他们需明确政治驱动力和目标：如某些与总体目标不一致的利益相关者，便不必参与这一流程。
- ➡ 提高公众对于 DHC 的认识和接纳度，这是实现特定社会和环境目标的一种可行方式。应尽早提高决策者和公众的参与度以提高公众对供热规划过程和区域能源的接纳度。

就推广 DHC 系统具体使用的能源以及开发具体的项目而言，项目运营方可以让利益相关者参与其中，具体如下。

- ➡ 开发工具和方法，用来评估供热供冷对环境的影响，并游说决策者针对各种能源出台适当的环境法规。借助简单的工具评估能源项目可能造成的环境影响，然后与其他类似项目进行比较，并明确阐述其缓解措施。这些措施对于地热能来说尤其实用，这样不仅可以提高地热开发的透明度，还能提高相关人员对地热项目的风险和相关缓解措施的认识。
- ➡ 提高透明度，让利益相关者参与开发流程，以了解项目的利弊。对于某些可再生能源技术，公众和决策者掌握的信息并不全面，可能因为无法预见的环境和社会风险而产生抵触情绪。

B.3 供热（供冷）需求与能源资源的评估与匹配

在许多国家、地区和城市，供热（和供冷）过去并不是政府管理的对象。能源政策最常出现在部门政策中，集中于供应侧的电力和天然气方面及需求侧的建筑效率方面。因此通常缺乏对供热供冷部门基本运营状况的了解。电力和天然气的供应量也许可以测量，但得出的数据也仅仅是混合了烹饪、照明、供热和其他终端用途需求的能源供应总量。未配置控制系统和电能计量系统的区域能源系统也常常缺乏消费者层面的实际能源需求知识。因此，供热供冷需求可能是未知的，难以用于战略规划目的。

为了执行 SHCP 流程或可行性研究，有必要收集和利用相关知识和数据，以了解实际需要的供热供冷位置及数量、潜在供应方案以及建筑存量状态。在分析中纳入其他能源部门、以捕捉如波动性可再生能源发电量的增长、能源需求增加等更广泛的变化也是至关重要的。应充分利用显著的跨部门协同效应并避免能源领域内的次优化。所收集的数据是技术方案（在

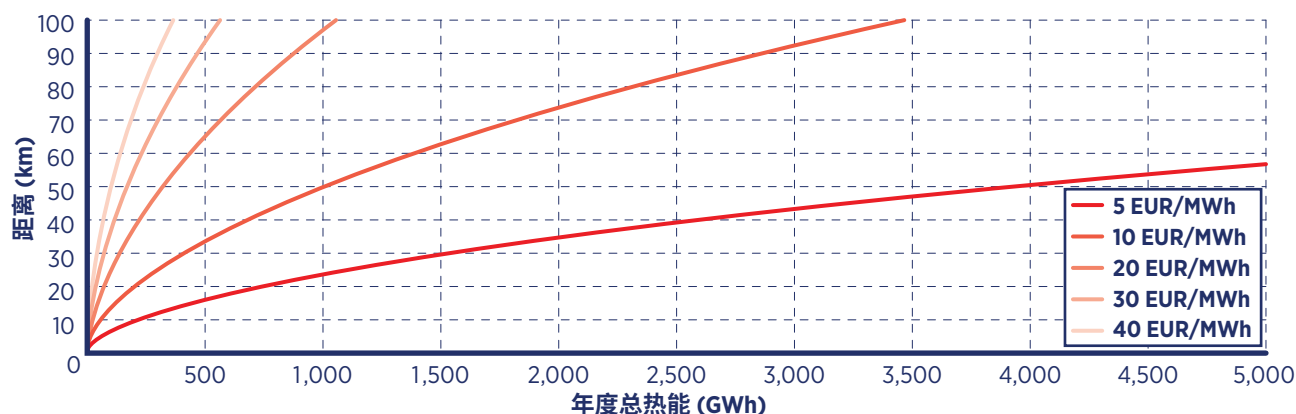
开发战略规划中发挥关键作用）必不可少的因素。技术绘制步骤需要量化热需求，识别和量化潜在的热能资源，并评估和识别建筑的热能节省潜力。

供热规划与其他类型能源规划之间的显著区别在于其供需位置非常重要。对供热资源位置以及现有供热供冷需求的了解可以将两者结合并评估供应方案是否可行。因此，绘制供热供冷需求的位置图并将需求量化是 SHCP 的重要组成部分，这对于推动投资者支持可再生能源和余热资源组成的区域能源项目至关重要。

而对于 DHC 规划者而言，这一点更为关键，因其需要估计网络和装机容量规模。从投资者的角度来说，由于区域能源网是资本密集型投资，因此有必要了解潜在的市场规模、供应量和潜在客户。

以极具成本效益的方式传输热能的距离取决于要传输的能量。图 22 描绘了单位成本可传输热能的最长距离。例如，2,500 吉瓦时 (GWh) 可以传输的距离为 40 千米 (km)，成本仅为 5.50 美元 / 兆瓦时 (MWh)。但是，如果生产地与消费地之间的距离为 50 km，则必须输送 4,000 GWh 才能保证相同的单位成本。

图 22：输热成本



注：供热成本包括建设成本和输送成本。区域供热管道的建设成本来自 Svensk Fjärrvärme AB（2007 年），根据 Sánchez-García（2017 年）进行更新，并按 30 年 5% 的利率摊销。输送成本基于电价为 11 美元 / MWh 的假设得出。此外，还假定通过管道输送的能量在一年中呈正弦变化（Phetteplace, 1995 年）。

此外，应在技术上避免管道距离过长。即使目前管道已经具备良好的保温性，但仍会发生热量损失（通过使用较低运行温度减少热量损失）。

B.3.1 供热供冷需求的匹配

此处介绍了开始开发供热需求相关信息的主要方法：测量实际需求、在建筑层面进行需求建模并汇总、以及通过空间建模进行分解。

i. 通过对实际需求进行测量，可了解消费的实际状况。这显然是供热评估的最准确依据。应尽可能采用较高的时间分辨率，例如 1 小时的间隔。由此为输配和生产公司提供与预期需求负荷波动性相关的宝贵知识。根据需求优化生产并增进供热系统与波动性电力生产来源之间的合作，使生产装置得以更好地运行。计量（以及适当的控制系统）还允许进行个人用量计费，从而激励降低能耗。

ii. 自下而上的建筑能源性能和能耗建模可以估算预期热需求。针对建筑需求进行建模或估算并汇总，也是为决策提供进一步建议的方式之一。部分城市例如瑞士的日内瓦，已强制要求房主报告其热需求。他们为房主提供了工具和指南，也会聘请经认可的人员帮助他们计算热需求。建模或估算需要建筑存量相关的数据集（位置、表面积、年限、主要能源等）。这些数据集可由国家 / 地方机构为城市提供，就像瑞士一样（见文本框 5）。其他国家可以推广这一方案。若不存在这些类型的数据集，则需要进行相关调查和现场工作才能建立足够精细的数据对供热需求进行建模，而这可能会导致高昂的成本。

iii. 对供热需求的空间分布进行自上而下的建模，以识别重点区域。PETA 4 或 Hotmaps 工具箱等项目提供了欧洲供热需求图集的建模示例（参阅文本框 6）。这些工具不仅要考虑当地政策（公共建

筑的热能管理），还要考虑最终用户热能或冷能的本地行为以及温度需求。（近来应用地板辐射采暖建筑的供热需求将约为 30°C；而应用铸铁散热器则约为 80°C 至 90°C。）这些模型使用来自国家、地区或城市的能源统计数据，将这些需求进行空间分解以估算热能分配成本，并根据密度及与热源的邻近程度确定发展区域供热的高潜力区域。这得出的是三种方法中最不准确的结果，但是可在数据或资源稀情况下应用 SHCP。

对于全新开发区域，热需求建模对于未来的 DHC 系统设计也将是必要的。

需要保持谨慎以确保非常保守的需求计算。同时还应进行敏感性分析。

供热需求的这种理解和量化还应包括供冷和当地供冷产生的电力消耗等数据。这有助于推动城市识别和应对本地电力需求挑战，而非仅仅依靠国家 / 地区电网的改进和发展（UNEP，2015 年）。

“通过计算实际需求、实行自下而上的建筑能耗建模及自上而下的供热需求建模推算出城市建筑的供热供冷需求，

文本框 5

用于初步研究的公开数据：瑞士案例

- 公开数据来源可为 DHC 小水电工程 (SHP) 能源需求的初步评估做出重要贡献。瑞士的公开数据门户综合了联邦、各州和市镇是各种可自由访问的数据。其中包括来自瑞士全国建筑物登记表 (GWR) 的数据，这些数据描述了该国领土约 200 万栋建筑的基本属性，例如位置、表面积和主要能源等。本地数据集也利用特定地点信息为其提供补充：例如日内瓦州国土信息系统 (SITG) 的门户网站详细介绍了多户家庭和公用事业建筑的供热能耗。

<https://opendata.swiss/en/>

<https://ge.ch/sitg/>

- 如此一来，这些数据集可通过估算能源需求的空间分布及其在未来条件下的演变，支持规划和开发整合低温可再生能源的 DHC 系统初步情景。因此，Chambers 等人（2019 年）利用公开数据帮助绘制了瑞士未来区域供热系统的本地潜力，并指出，与传统 DHC 相比，高能效情景将显著提高较低温度下 DHC 系统运行的相对潜力，但同时这些情景也会改变建筑能

源需求的空间分布。对于规划者和政策制定者而言，这突出了协调供热规划的重要性，避免了不同政策目标下当地基础设施容量与实际能源需求密度之间出现不匹配。

- 因此，对供热需求的空间评估应包括对可再生或余热的可能来源（例如地热能或工业余热）的类似评估。日内瓦地域内的此类活动在 2020 年 Geothermie 项目框架下进行，由日内瓦州领导、并由日内瓦工业服务公司提供资金并推动实施。该项目以目前对地下结构的了解为基础，更好地了解当地地热能潜力，并与诸如 DHC 之类的补充基础设施共同协调开发这一潜力。该项目的初步结果振奋人心：如 Versoix 镇的钻探已证明浅层含水层极具潜力。这些含水层最终可能有助于向当地 DHC 网络提供可再生热能。项目结果将补充对日内瓦地下条件的现有认识——例如热导率和热容量相关的明确空间数据集，目前这些数据已经可以通过日内瓦工业服务门户网站获得。

www.geothermie2020.ch/



来源：Freepik

文本框 6 供热和供冷需求绘图工具

PETA 4

PETA 4 是泛欧热图集 (Peta) 的最新版本，是一种用于区域能源规划的交互式地图。PETA 4 可以将热需求建模至公顷水平。它还可以确定具有区域能源潜力的供热供冷需求地区。该地图包括具有（多余）热能潜力的工业或装置、未来的区域供热网络以及可再生能源（包括太阳辐射、地热和生物质）的可用性。“欧洲供热路线图”项目系列已使用 PETA 4 绘制和量化了构成欧洲供热供冷市场重要能源的空间分布。

右边的示例显示了匈牙利布达佩斯市的供热需求、过剩的热能潜力（上）和地热潜力（下）。

<https://heatroadmap.eu/peta4/>

Hotmaps 工具箱

由欧盟地平线 2020 计划资助的 Hotmaps 项目中的开发数据和工具帮助欧洲公共当局识别、分析、建模和绘制资源和解决方案。以极具成本效益的方式满足辖区的能源需求。

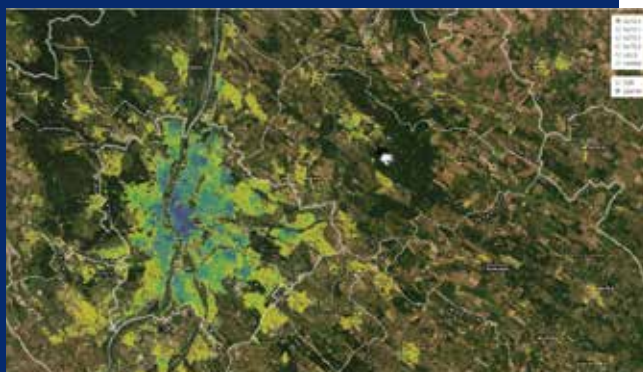
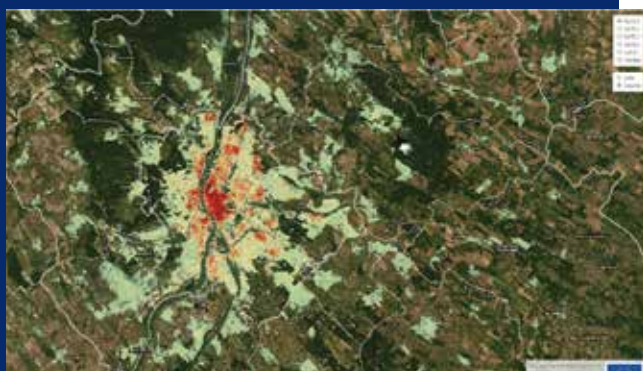
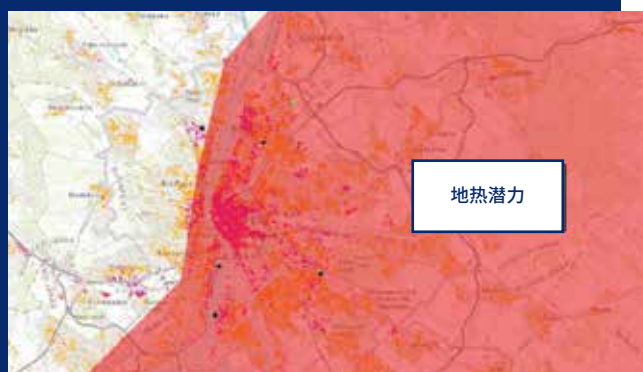
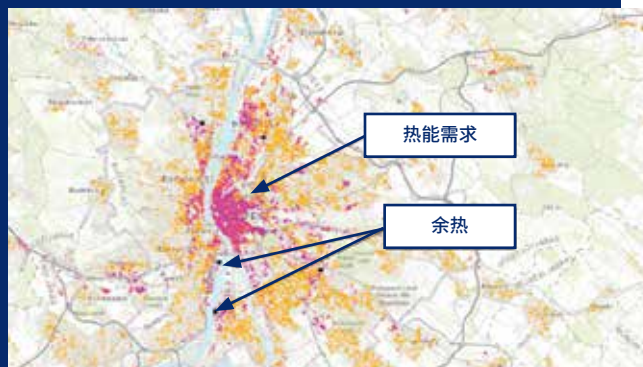
对面的例子则显示了匈牙利布达佩斯市的供热（上）和供冷（下）需求。

www.hotmaps.hevs.ch/map

Thermos

Thermos（热能资源建模与优化系统）是一个基于 Web 的开源软件包，旨在优化本地区域能源网络规划流程，同时支持可持续能源总体规划。为欧洲城市提供地图和内置能源需求估算。

www.thermos-project.eu/resources/thermos-tool/



B.3.2 确定当地供热资源

了解供热需求至关重要，掌握已有的热源数据也很关键。如 A 部分第 2 节所述，战略性热源通常为余热或可再生资源。这些来源通常分布于广阔的区域中，但需要诸如区域能源分配网络等基础设施才能加以利用。它们通常也是低温资源，因此对网络提出了一些要求。现代区域能源系统更适合利用多种热源方案（应用或不应用热泵），并充分利用蓄热系统（参阅 A 部分第 2.3 节“关键使能技术”和图 23）。因此，战略性热源可能包括低温分布式可再生能源，例如：

- 地热
- 太阳热能
- 余热：传统和从工业流程或空间供冷（例如超级市场和数据中心）中回收的余热。

还要评估生物能源资源，因为联产或互补系统也可能是一个相关的解决方案。考虑到特定供热需求，通常连续使用一个或多个主要供热源，供热需求较高时则动用备用供热源 - 大多数系统中这种情况每年仅持续几天。使用蓄热的混合区域能源系统甚至无需连续使用一种能源：根据资源情况和生产成本使用最合适的能源（参阅图 24）。最合适的解决方案取决于当地情况。大型系统则需要多种能源，其蓄热技术还可利用波动性可再生能源。

图 23：多能源区域能源系统示意图

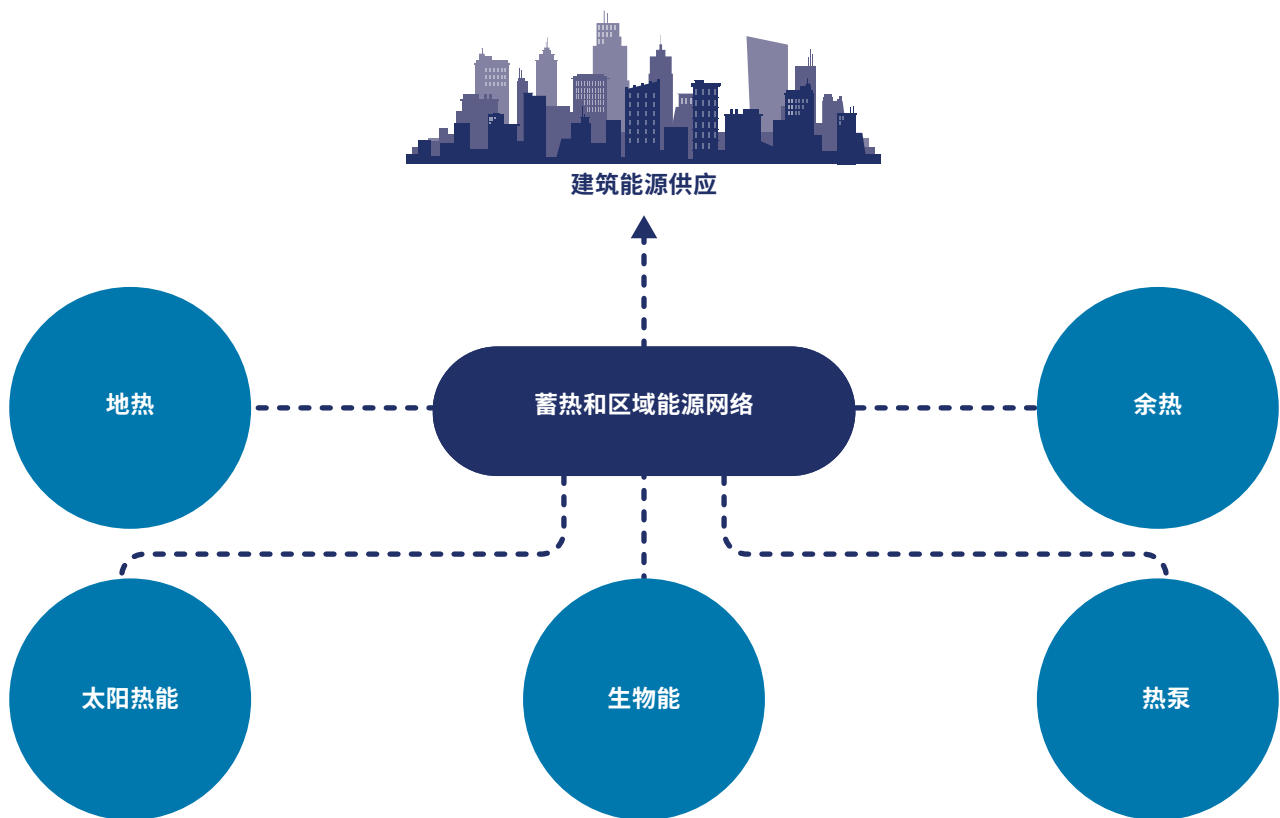
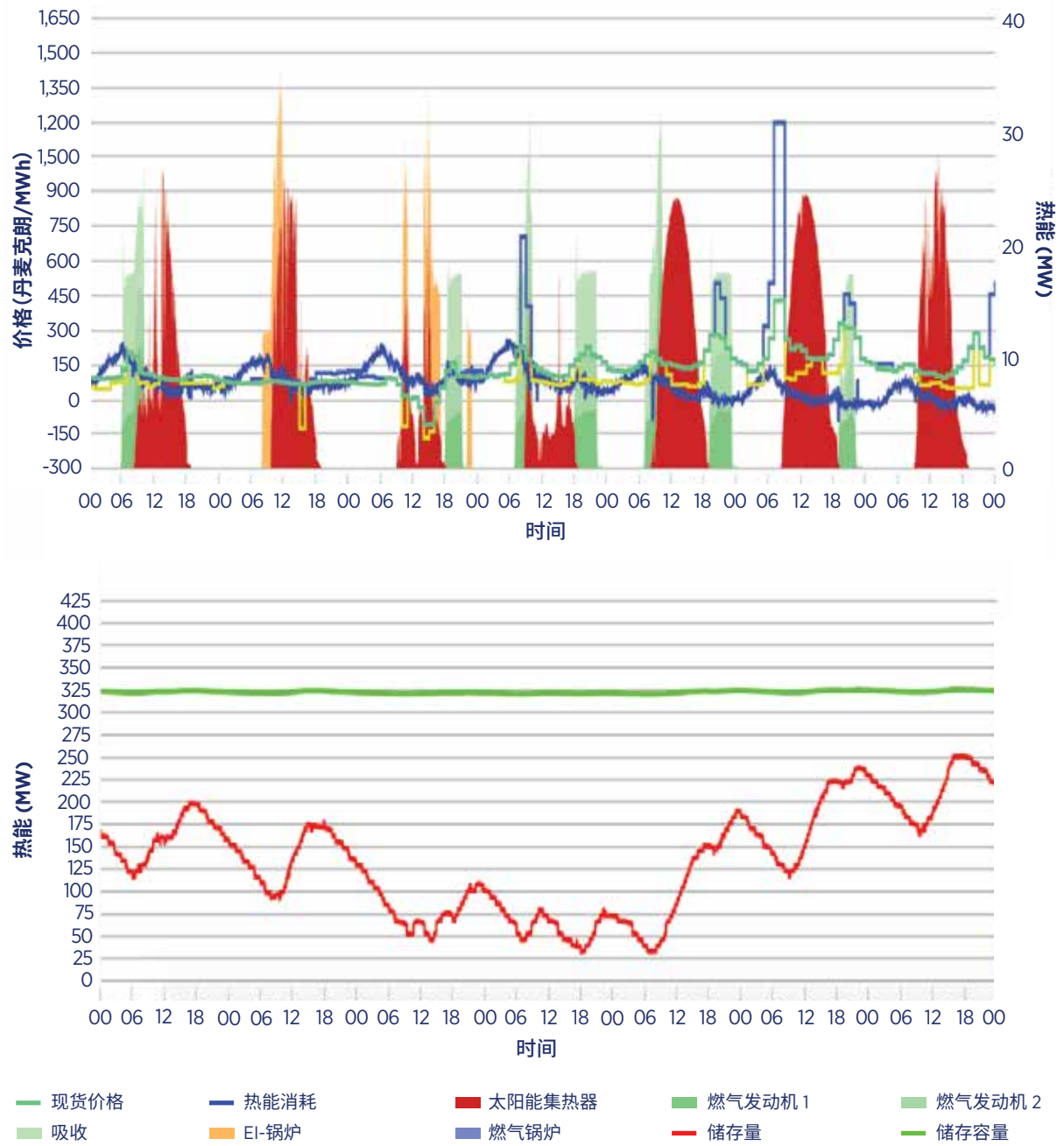


图 24：使用蓄热的混合式区域供热系统每日产热示例



丹麦克朗 (DKK): 丹麦克朗

来源: EMD 国际 (www.energyweb.dk/saebj/?english&history)

应估算潜在热源与需求中心的接近程度，并在地图上标记。还应调查项目开发土地可用性、土地使用权的相关信息以及与使用相关的潜在冲突。此外，在进行更详细的资源评估之前，可根据现有的文献和数据估算出资源满足供热需求的确定性水平（Lund 和 Lienau，2009 年）。

利用热源进行供热供冷的可能性取决于位置、温度和时间等资源特性：

- 鉴于城区地理范围有限，资源的可获取性可能受到限制（因此供热需求也受到限制），因为长距离运输少量热能经济上通常是不可行的。因此，位置（热源到供热 / 供冷网络的距离和土地可利用性）至关重要。如果热源不靠近区域能源网络，需要投资新建管道连接，这将不利于实现解决方案的成本效益，并成为区域能源系统不使用该热源的原因（KøhlerPedersen 和 Holm Christiansen，2019 年）。另外，管道越长，热量损失就越大。地热则需要建立相关法规要求，例如允许土地用途变化或能源勘探。
- 低温资源的特性根据不同的热源性质而异，因此可以归类为独立的参数（KøhlerPedersen 和 Holm Christiansen，2019 年）：
 - 温度等级：取决于热源温度水平和区域能源系统的运行温度以及热能是否注入区域能源系统的回流或供应管道中，可能需要使用热泵提高温度水平，从而与实际系统温度保持一致。

- 温度波动性：工业应用中以波动温度输出的余热是可用的。这可以通过组合连接实现，例如在高温水平下输送到供应管道或在余热温度水平低时输送到回流管道。

- 热能输出和年度运营的时间波动性：相较于诸如空调系统（主要在系统产生余热），恒定热能输出和基本负荷可再生资源应用产生的余热等更易于整合到 DHC 系统中。

- 资源的可持续性：随着时间推移，某些热源可能会减少甚至消失。这一问题涉及地热，但主要是余热。热能潜力可以利用多长时间？某些数据中心可能仅持续几年时间。这种情况下，与运营人员讨论供热的合同期限至关重要。

“分布式可再生能源和余热资源要求建设符合低温特性的区域能源网络”

地热

用于区域供热供冷 (DHC) 的地热能可以从为利用热液中的热量而钻探的深井中获得，也可以从利用地下水或浅层土壤 / 岩石中的热量的浅井中获得。在已知有地热资源的地区，利用已有数据可以大大降低勘探成本。即使在已经开始油气开采但地热开发可能受到限制的地区也是如此。油气勘探与开采过程中所获得的数据可以降低传统地热勘探成本。法国巴黎附近的法兰西岛大区便是如此：由于之前开展过石油钻探测试，法国公共地热机构绘制了精确的地质层公共地图，并测量了温度梯度。此外，如果闲置矿井附近存在可能的供热需求，则应调研联产方案（或在闲置矿井中使用热交换器的可能性），作为降低成本的可能性方案（Hickson 等人，2020b）。此外，还可以调研通过热电联产利用现有地热发电厂的余热用于 DHC。

已经开发的一些工具可以帮助地方和国家级的决策者规划地热潜力的利用。其中一些工具（例如在线地理信息系统 (GIS)）可以根据现有数据估计地热资源的潜力。它们还可以通过定义其他相关参数（例如最合适的技术、现有人口聚集区、经济可行性和现有的支持性基础设施（例如区域供热网络））来估计资源的利用潜力。文本框 7 列举了一些利用这些工具促进有关地热资源利用的决策的示例。

在项目层面，要勘探和证明地热资源的存在，不仅技术要求高，而且需要大量资金。地热勘探包括探测地下是否存在合适的地热资源，确定其空间范围，计算其能量含量，探索其化学性质。这可以在国家、地区、储层或项目一级完成。确定是否存在地热资源的标准技术包括地质测绘、物探测量（例如电阻率、重力和地震评估）、地球化学分析和热流测量。

这些技术得出的数据可用于推测地下地热条件、建立地热概念模型并估计资源潜力，然后开始钻探。市政当局可能不具备相应的技术能力来完成这些任务，因此在确定技术潜力，以及向决策者、民间团体和公众明确说明风险和潜力时，应注意与有能力的高效伙伴合作。有时，在省 / 州或国家地质调查中也可发现一些勘探方面的专业知识。

不过，可以利用州 / 省、国家和国际机构（这些机构可以提供专业知识来分析资源估算所需的地热数据，促进技术转让）提供的技术援助方案来获取和分析地热数据。此外，国际地热协会发布的《地热勘探最佳实践指南》为地热开发商提出了确定地热资源的位置、估计地热潜力和预测其生产特征时应使用的最合适的工具和技术（IGA 和 IFC，2014）。



文本框 7

地热资源利用潜力评估工具

[www.darlinge.eu/#:~:text=Welcome%20to%20the%20Danube%20Region%20Geothermal%20Information%20Platform%20\(DRGIP\)&text=DRGIP%20has%20two%20main%20parts,information%20on%20some%20selected%20topics](http://www.darlinge.eu/#:~:text=Welcome%20to%20the%20Danube%20Region%20Geothermal%20Information%20Platform%20(DRGIP)&text=DRGIP%20has%20two%20main%20parts,information%20on%20some%20selected%20topics).

- **多瑙河地区地热信息平台 (DRGIP)**。DARLINGe 项目制定了一套方法，专门研究多瑙河地区六国（波斯尼亚和黑塞哥维那、克罗地亚、匈牙利、罗马尼亚、塞尔维亚和斯洛文尼亚）的地热资源。合作国家为该项目提供了大量地热数据，数据的内容、格式及知识密度和层次均丰富多样。他们使用这些数据来确定潘诺尼亚盆地（地壳延伸后由沉积物填充而成）的总体区域地质。热液系统由基岩和沉积层中的裂缝组成，地热条件的特征是温度梯度为正，平均温度为 45°C/km。他们还开发了一个潘诺尼亚盆地的概念模型，确定了上层沉积层以及基岩的岩性和孔隙度、地下温度分布和储层范围。根据这些信息，在地区层面评估了该区域约 100 000 km² 范围内的地热资源（Nador, A. 等人，2019 年）。

- **关于日内瓦钻井的数据库**。钻井公司有责任向相关主管机构登记地下特征。

www.etat.ge.ch/geoportail/pro/?mapresources=GEOTHERMIE%2C%20GEOLOGIE%20GEOLOGIE&hidden=GEOTHERMIE%2C%20GEOLOGIE%20GEOLOGIE

- **区域供热发展行动计划**。匈牙利根据《国家能源战略》框架制定了《区域供热发展行动计划》，评估了地热区域供热的潜力。该行动计划着眼于地热资源的开发，其中包括两个潜在开发地点列表：第一个列表包括现已配有区域供热系统且可用地热能替代现有热源的居住区。第二个列表列出了地热能可以满足供热需求、能够开发基于地热资源的区域供热系统的地点。这两个列表虽只是初步研究的结果，但可用作进一步评估该地区潜力的指南。

- **煤炭管理局的交互式查看器和网络服务** - 英国地质调查局和煤炭管理局的网络地图显示了废弃矿井的位置及其温度梯度。

<https://mapapps2.bgs.ac.uk/coalauthority/home.html>

文本框 8 太阳热能资源利用潜力评估工具

- 太阳辐射数据可以使用 **Meteonorm** 软件获得。
<https://meteonorm.com/en/>
- 光伏地理信息系统 (**PV GIS**) 在线平台提供可用于评估太阳热能发电厂的太阳辐射数据。该平台虽是为光伏而创建，但可用于计算倾斜面上的太阳辐射。
https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html
- 国家太阳能地图（例如由国家气象机构制作的太阳能地图）可以用作评估工具。澳大利亚气象局提供的数据就是很好的示例。
www.bom.gov.au/climate/data-services/solar/index.shtml
- **IRENA** 的可再生能源全球数据库在网络平台上显示了各种能源资源分布地图，让用户可以查看不同位置的资源地图，包括太阳辐射地图。
<https://irena.masdar.ac.ae/gallery/#gallery>
- **电力数据访问查看器 (Power Data Access Viewer)** 是一个网络制图应用程序，可提供美国国家航空航天局 (NASA) 兰利研究中心提供的可视化、数据子集和制图工具。
<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>

太阳热能

为评估太阳能区域供热（和 / 或供冷）厂的可行性，首先要考虑的就是可用的太阳能资源。可使用各种工具和软件来获得这些数据。文本框 8 中列出了其中的一些工具。系统设计师和安装企业可以估算这些区域可以利用的能量，确定合适的安装技术，但还需要确定集热器（和储罐）的可用位置。可以考虑安装以下两种集热器：屋顶集热器和地面集热器。除非土地价格高昂，否则地面集热器通常是最便宜的解决方案。

此外，通往热源出水口的管道长度应经济合理，以确保成本低廉（Schmidt 和 Miedaner，2012 年）。关于屋顶集热器，国家、地区或地方各级均可编制本地太阳能资源情况。这些都是在线门户网站，反映了大小城市中屋顶的太阳能潜力，让人们能够判断某栋建筑是否适合安装太阳能系统。例如，《洛杉矶县太阳能地图》显示了加利福尼亚州洛杉矶县的建筑屋顶的潜在太阳能容量，以及现有太阳能装置的安装位置和太阳能供应商的位置（图 25）。

图 25：美国洛杉矶县屋顶太阳能地图应用程序



来源：洛杉矶县（未注明日期）；<https://apps.gis.lacounty.gov/solar/m/?viewer=solarmap>

余热

DHC 的余热潜力取决于供热需求和余热的热源位置。丹麦的一项案例研究表明，通过评估每个生产装置的余热（结合特定行业的温度曲线和建筑空间分析），其潜力并不稳定。具体而言，中等城市附近的工业区潜力较高（Bühler 等人，2017）。预计在其他国家 /

地区也是如此，工业园区、大型建筑或其他基础设施附近更容易获得余热。

评估余热潜力的方法是调研，包括问卷调查、报告和数据库以及自上而下 / 自下而上估算或综合估算。文本框 9 列出了一些可用的研究和工具。

文本框 9 余热资源利用潜力评估工具

- 通过各种研究收集了有关工业余热的数据，并在国家层面和各个部门估算了余热潜力，这有助于进一步利用余热，并在国家或地区层面调整战略政策。但是，他们缺乏当地数据——这对识别 DHC 中余热利用的现实 / 可行案例至关重要（Brückner 等人，2014；Miró、Brückner 和 Cabeza，2015；Papapetrou 等人，2018）。
- 欧盟资助的 **Waste Heat** 项目提供了一份余热潜力评估手册和一个包括投资、融资和许可的工具箱。
www.waste-heat.eu/
- 欧盟资助的 **ReUseHeat** 项目从四个热源（数据中心、地铁站、服务业建筑和废水处理厂）评估了欧洲可获得的余热潜力。
www.reuseheat.eu/
- 欧盟资助的欧洲供热路线图项目制作了泛欧热图集 (**Pan-European Thermal Atlas**) (Peta 4.3)，提供了有关余热源和热协同地区的空间数据。
<https://heatroadmap.eu/peta4/>
- 美国能源部能源效率和可再生能源办公室推荐的工具和软件。
www.energy.gov/eere/amo/articles/waste-heat-recovery-resource-page
- **Project Memphis** 项目提供了一种工具，可以使用开源数据来匹配和评估各种热源的余热潜力。这对识别规模较小、等级较低的余热源尤其有用。
<http://blogs.hawk-hhg.de/memphis/> 和
<http://cities.ait.ac.at/uilab/udb/home/memphis/>
- **HotCity** 项目使用游戏化方法来确定余热潜力。在该项目中，公民通过拍摄烟囱和再冷却系统、开展互联网研究、完成现场调查和使用在线地图等方式，收集绘制余热资源地图所需的数据。
<https://cities.ait.ac.at/projects/hotcity/> (德文)

B.3.3 量化和评估热能节能潜力与可持续供应

节能是完成战略性供热供冷规划 (SHCP) 分析时必须考虑的重要因素。节省 1 kWh 能源可能比供应 1 kWh 能源成本更低。其中一种方法是评估不同节能措施的边际成本，并实施比可持续能源供应成本更低的措施。图 26 描绘了这种方法。可以在国家、地区或地方层面使用该方法。

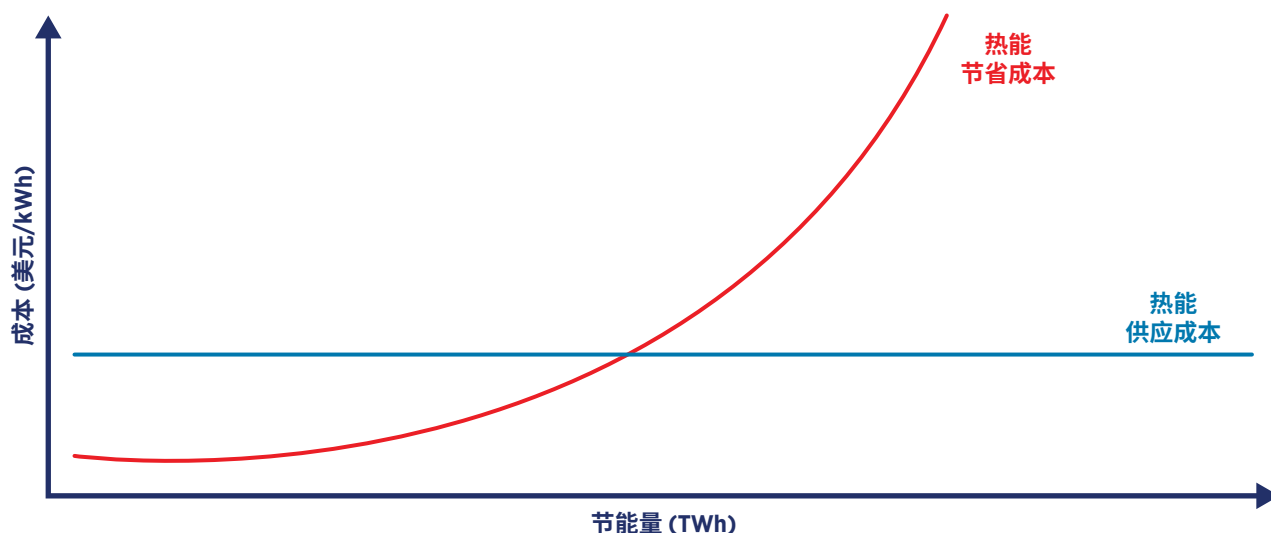
能效措施会对供应链产生影响（见图 27）。降低能源需求也意味着能源系统输配和生产侧所需的容量减少。对于新的区域能源系统规划或改造项目，这是一个非常重要的概念，因为可以根据新的需求水平调整新设施。降低能源需求还可转化为提高可再生能源比例，从第三代向第四代区域能源系统过渡。

由于前期投资成本高昂，建筑节能改造通常需要很长时间，而且不一定能够在实现一定的能效潜力之后才开始建设区域能源项目。一些面向未来的节能措施（例如供热控制系统和供热计量）可以实现按用量计费。这是吸引客户参与的有效工具。

即便采用了节能措施，DHC 仍然可以取得节能效果。无论是现有网络还是新网络，节能建筑都可以有效降低高峰需求，并大幅提高整个区域能源网络的性能和可行性。可以为新建或改造的节能建筑设计一个新的低温网络，将更多消费者连入该网络，并降低现有网络的高峰需求。就运营支出和 / 或资本支出而言，每年的高峰需求时间段虽然较短，但通常是区域供热成本最高的一段时间。这是因为所需产能每年可能只在很短时间内全负荷运行（Trier 等人，2018 年）。

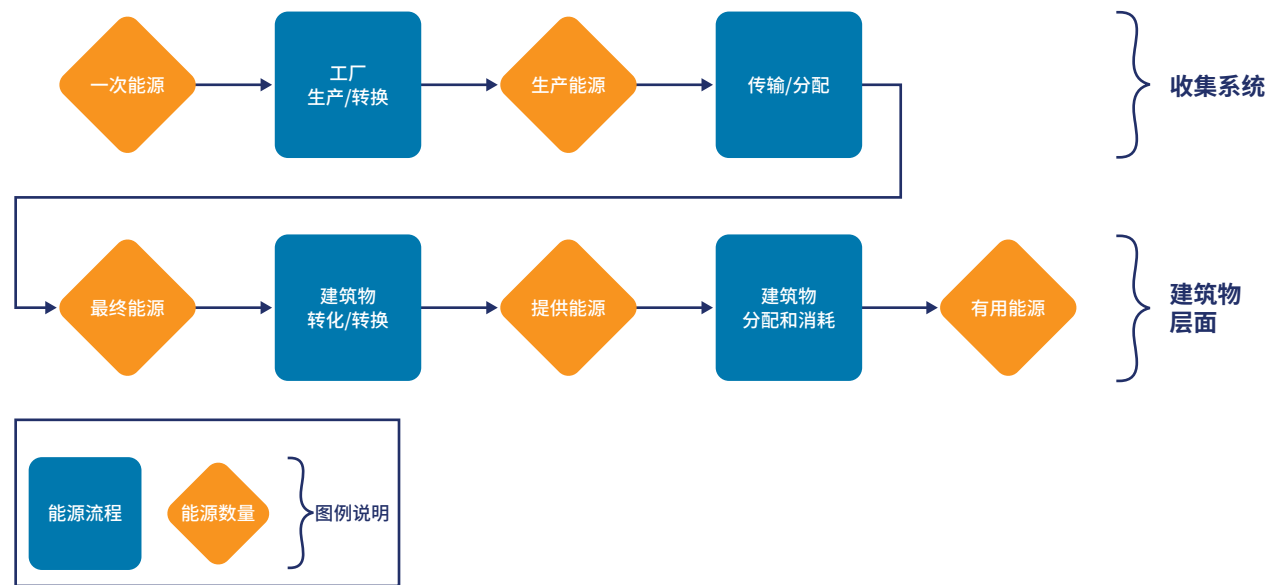
高效且良好运行的供热系统将有助于整合低温能源。这类供热系统需要精心设计且良好运营的区域供热网络，以及完善的用户连接和功能良好的生活热水与空间供热室内装置（Olsen，2014 年）。

图 26：可行的节能水平评估方法



依据：Paardekooper 等人（2018 年）

图 27：从一次能源到有用能源的能效价值链



来源：Mathiesen 等人（2019 年）

过渡到新一代区域供热系统确实需要“适当调整规模”，以与现有建筑群相兼容，并合理设计网络和用户连接。在建有低能耗建筑的新开发地区开发第四代区域供热系统尤其合适。而在已配有区域能源系统的城市中，这可能意味着需要调整装置，还可能需要改造建筑。

预期存在三种主要情况：改造现有区域能源系统、在现有地区开发新的区域能源系统和在具有某些共同特征的新开发地区建设新的区域能源系统（如表 4 所示）。

如表 4 所示，改造现有区域供热系统将是最困难的，因为建筑和网络都是为其他条件设计的。事实上，针对新城市地区的方案将是最容易实现的，因为网络 and 消费者内部系统均可规划为在低温下运行。在现有地区建设新的网络将是中间方案，因为可以设计低温网络，但要更改现有建筑中消费者的装置将较为困难。

B 部分第 4 节介绍了评估和提高现有建筑与低温供热网络的相容性时应考虑的主要元素。

表 4：新一代区域供热开发方案以及系统要素的潜在修改需求

	现有区域供热系统	新的区域供热系统
既有区域	调整消费者连接、换热站和空间供热与生活热水供应室内装置。 如果网络规模不大，可能需要改造网络。	调整消费者连接、换热站和空间供热与生活热水供应设备。
新开发地区	低温供应特别适合具有低温供热装置（例如地板采暖或低温供应的采暖散热器）的新型低能耗建筑。	

B.3.4 建立供热情景

估算需求、供应和节能潜力旨在建立一个既能满足这些区域的需求、又能利用本地可用资源的情景。建立情景时，需要牢记下列元素：

- 能源系统分析的范围
- 能源系统分析的视角
- 能源系统分析的期限。

考虑范围颇为重要，因为供热和供冷并非系统的独立组成部分，应与其他能源领域（例如电力或天然气的供应与运输需求）结合考虑。应考虑供应潜力，全面考虑所有能源需求，因为稀缺资源将存在竞争。文本框 10 列出了 IEA DHC Annex TS1 中评估的一些规划工具，包括已开发的 DHC 简化规划工具。

考虑分析视角至关重要，因为不同的方法可能会产生截然不同的结果。区分从社会角度的分析和从商业角度的分析非常重要，因为从商业角度的分析仅基于市场价格，并未全面考虑社会的所有相关方面。

从社会角度分析则应考虑气候变化、空气污染和创造就业机会等各个方面（Djörup 等人，2019b）。这些方面可以标记为外部因素。很难对外部因素进行评估和量化（特别是确定其金钱价值），而且根据定义，外部因素不包含在市场价格中，因此市场价格通常不足以全面分析社会经济潜力。

囊括所有外部因素仅在理论上有可能，实践中不可能做到。此类评估很可能会受地方事务、会计方法、紧急冲击等因素的影响。解决该问题有以下两种方法：

- 在评估中使用清晰可用的假设。这将可实现透明度，并就评估是否合理进行民主辩论。若不陈述清楚，将不可能做到这些。
- 分步骤进行技术和经济评估。这也突出了外部因素的重要性，并将在分析中显示外部因素会在哪些方面产生影响。

社会经济评估应从社会的角度评估可能的供应方案，并为地方和国家当局提供指导，使其技术方案与 SHCP（见 B 部分第 1 节）的目标和范围相符。对可能的供热方案进行社会经济评估后，可以与商业经济评估进行比较。如果这两项评估相符、结果相似，则投资者可以继续推进，选择投资社会可行性最高的方案。如果两者不相符，得出了不同的结果（这是常态），政策制定者应评估冲突之处以及两种分析不能得出相同结论的原因。可能的原因将是外部因素——对内化市场价格或阻碍部署新的可持续技术的其他障碍非常重要的外部因素。

“供热情景反映了其隐含的分析范围和时间范围”

文本框 10

区域供热供冷规划工具

- 能源系统模型模拟了能源从其最初来源到转化为有用能源并传输到最终利用的过程。

EnergyPLAN: 一个广泛使用的模型，模拟国家能源系统中各部门的运行。

<https://energyplan.eu>

EnergyPRO: 一个从环境和财务角度分析能源项目的工具，可以促进有关新能源工厂开发的决策。

www.emd.dk/energypro/

KOPTI: 一个用于估算将要实施区域供热之处的能源生产的模型。

TIMES Local: 一个为长期能源项目准备过程提供解决方案的模型。帮助经济高效地规划可持续能源系统。

<https://iea-etsap.org/>

- 供热网络的热力学建模，其水力学和热力学特性以及注入供热网络所需的可再生能源的不同温度水平是对能源系统建模的补充。

Termis: 一种根据实时网络数据模拟运行状况来为区域供热系统运行建模的工具。

<https://it.kelvin.pl/en/termis-district-heating-network-management-system>

- 其他有用的工具包括 **District Energy Concept Adviser**，用于对各种能源概念（例如本地区域供热和燃气冷凝锅炉）进行对比；**EME Forecast**，一个预测供热和电力负荷的时间序列模型；和 **Exergy Pass Online**，一个分析建筑资源消耗的分析工具。

- IEA DHC Annex TS1 开发了 **Easy District Analysis (EDA- 工具)**。根据对 12 种工具的评估，EDA- 工具专供城市规划人员和公用事业企业使用。它可用于分析低温能源系统的能量、经济和生态方面，以便与其他供热系统进行比较。EDA- 工具也可用于评估整个区域。

- **Thermos** 工具仍处于开发阶段，它将最新的能源系统数据和模型集成在一个易于使用、以地图为导向的开源网络应用程序中。

www.thermos-project.eu/

欧盟资助的 **INDIGO** 项目开发了一个开源的独立规划工具，用于评估区域供冷系统的性能、收益和潜力。该工具可以分析由一组建筑物群组成的指定区域的供冷系统。

www.indigo-project.eu/

- **INDIGO 规划工具 (IndPT)**：一个评估区域供冷系统的财务和环境影响的模型。

<https://zenodo.org/record/3891384>

供热（和供冷）需求和能源资源评估与匹配所面临的挑战和建议概述

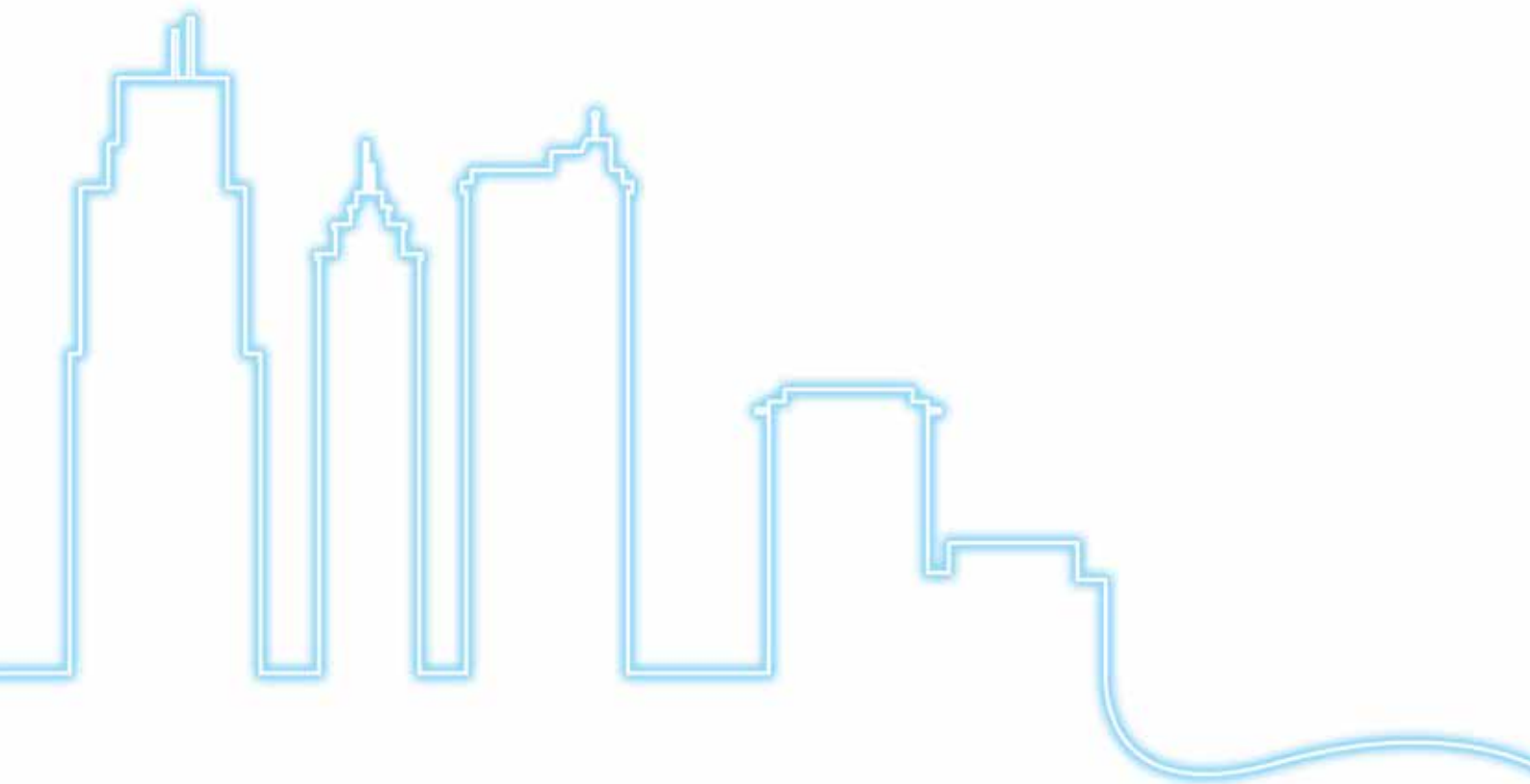
本步骤概述的方法能够对供热供冷进行技术性评估。获得与需求、供应和节能潜力相关的信息以及平衡这些要素十分重要。政府可以开展这些活动促进区域能源系统的发展。

➔ 测量人们对供热供冷的实际需求，了解能耗的空间和时间分布。这将增强人们支持资本成本高的区域能源项目投资的确定性和信心，并允许单独计量和计费，也是减少能耗（特别是在高峰时段或季节）和提高消费者参与率的鼓励措施。如果没有实际测量数据，则应通过建模或估计需求为决策提供参考。应推广适用于评估供热需求（包括温度水平）、可用的基础设施和可用的热资源三者之间的相互作用的现成工具，如地理信息系统（GIS），如果缺乏这些工具，则应进行创建。

➔ 确定并量化当地可用于供热供冷系统的可再生能源。可使用已开发出的多种工具量化当地的能源，并通过匹配资源与需求来支持决策。

➔ 在开发新的供应基础设施之前，应考虑现有能源系统的节能潜力。如果实施节能措施的边际成本低于开发新的供应能力，则应实施节能方案。然而，节能措施无法替代 DHC 系统，但从长远来看，它们是相辅相成的。

➔ 在决定实施何种供热供冷技术方案时，考虑商业经济因素的同时务必记住更重要的是社会经济因素。这能够确保项目解决的社会目标更广，如实现脱碳、创造就业机会和减少空气污染。对于像地热这样高度专业化的能源，地方当局的工作人员可能缺乏进行评估和量化的专门知识，因此，可借鉴行业最佳实践并借助专业公司或机构的技术援助服务来分析数据、估算资源潜力，并在必要时进行技能和技术转移，以开展进一步的资源评估。



B.4 将低温供应技术整合到现有建筑和区域供热网络中

从技术角度来看，运行系统设计温度和热源之间的温差会在很大程度上影响将新的热源整合到现有区域能源系统中。例如，中高温地热资源并不影响将其整合到现有系统和建筑中。但是，如果热源温度低于网络的运行温度，则可能需要进行调整。

第四代区域供热系统（见 A 部分第 1.2 节）的输配温度比前几代要低（第一代至第三代都在 70°C 以上），部署第四代区域供热系统时的技术挑战可能源自管道网络，也可能源自建筑群，取决于其计划涵盖的应用范围（Volkova、Mašatin 和 Siirde，2018）。

要过渡到新一代区域供热系统，首先需要分析与消费者连接的相容性。此外，还需要考虑建筑群、适当的网络设计以及与向低温可持续供应过渡策略相符的建筑改造策略。所有这些策略都将确保高效经济地实现脱碳，并避免与长期目标不相符的解决方案（例如燃气冷凝锅炉）产生锁定效应。该评估也是一个让我们考虑如何在现有区域供热系统中整合供冷的机会。

下面各节详细介绍了评估这些相容性所需考虑的技术问题以及可能的解决方案。

B.4.1 评估与现有建筑群的相容性

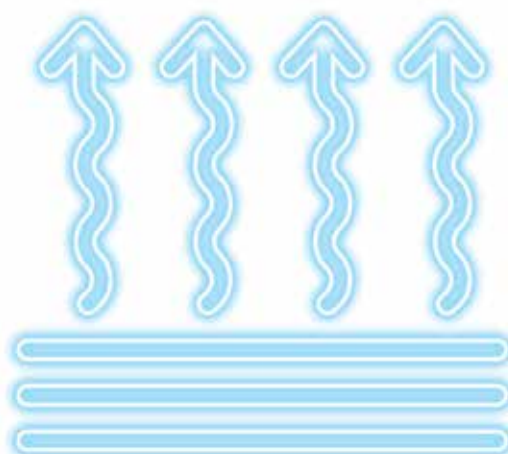
区域换热站

区域换热站（或能量中转站）将区域供热网络与消费者的装置相连。其功能是通过为建筑供热系统供热和制备生活热水 (DHW)，在两者之间传递热能。

换热站的性能对于维持较低的系统温度至关重要，但它们经常发生故障。这些故障迫使区域供热运营商将供应温度维持在所需水平之上，并导致回流温度高于必要水平。如要降低温度，则必须首先解决这些故障。为了快速检测温度故障，应安装允许连续监控换热站的自动计量系统（Frederiksen 和 Werner，2013；Gadd 和 Werner，2014）。换热站监控的另一优势是可以按用量计费（世界银行，2012 年；欧洲复兴开发银行，2018 年）。

与中央化石燃料锅炉相比，区域换热站的一项主要优势是所需的建筑空间要小得多（如照片 5 所示）。

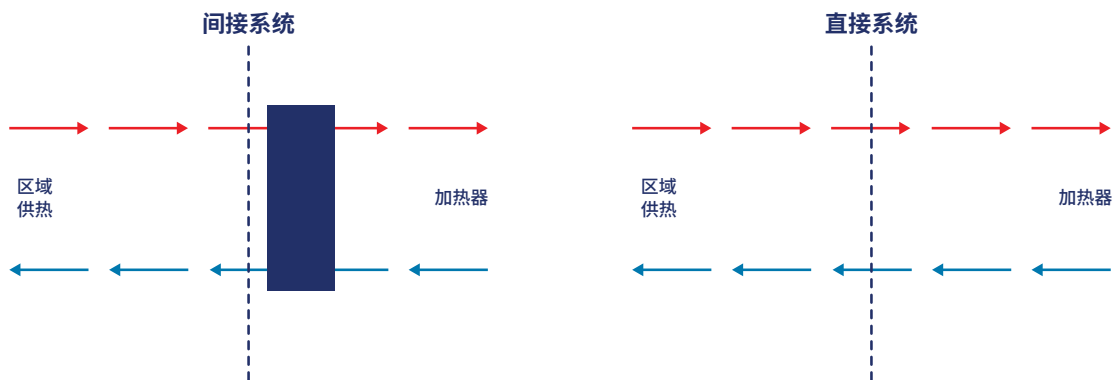
区域换热站有多种变体（例如，见 Frederiksen 和 Werner，2013 年）。本报告仅介绍最常见的两种：直接连接和间接连接（如图 28 所示）。表 5 列出了它们各自的优缺点。显然，只有消费者依靠水暖供热系统时，才可使用直接系统。对于空气供热系统，例如在加拿大德雷克 Landing 社区（Dalla Rosa 等人，2014 年）中，则只能使用间接连接。



照片 5：燃气锅炉房中的燃气锅炉（左）和比利时某建筑中的换热站（右）



图 28：直接和间接空间供热系统示意图



来源：Frederiksen 和 Werner（2013 年）

表 5：直接和间接换热站的优缺点

换热站类型	优点	缺点
直接	• 由于没有热交换器，因而可以在较低温度下运行，不会受温度影响。 • 非常简单，不易出错。 • 结构相对简单，价格相对便宜。	• 区域供热网络中的压力不得大于消费者的供热系统所承受的最大压力。 • 泄漏的危害性更大，因为网络中的水供应可谓源源不断。
间接	• 区域供热装置和消费者的供热装置之间存在明确分界。 • 能承受更高的网络压力。 • 网络向用户房屋泄漏的可能性较小。	• 结构相对复杂，价格相对昂贵：需要泵、膨胀箱和控制系统。 • 更易出错。

来源：Frederiksen 和 Werner（2013 年）

空间供热

为住宅或第三产业（商业和服务业）建筑提供空间供热所需的温度取决于一系列因素：建筑保温层、供热设备、控制系统和消费者行为。在水暖系统中，液压平衡也是一个重要因素。因此，降低建筑供热系统的供应温度将需要解决所有这些问题。

首先，如果建筑物保温性能不佳，不仅需要消耗更多能源来供热供冷，而且由于其热惯性较低，还会拉高峰值负荷（Frederiksen 和 Werner，2013 年）。热惯性在系统的瞬时负荷中起着重要作用，因为如果建筑物的保温性能不佳，室外温度下降后，其能源需求很快就会增长，而保温良好的建筑则需要更长的反应时间。

改造建筑群可以降低能源需求，显著降低峰值负荷。得益于需求响应管理，还可进一步降低峰值负荷（Pedersen、Hedegaard 和 Petersen，2017；Johra、Heiselberg 和 Dréau，2019）。在后一种情况下，可以对建筑物进行预热以避免出现需求高峰，从而降低全年温度。在这种情况下，政策制定者在实施建筑改造政策时，应优先考虑改造保温不佳的建筑和消费量最大的用户。在区域层面优先考虑耗能大户（例如社会福利住房和公共建筑）的建筑改造方法也可能有机会获得大量新的区域供热和 / 或供冷系统需求。

建筑改造后供热负荷降低的另一个好处是降低了供热设备所需的温度，因为对于相同散热器而言，供热负荷越高，要求散热器的温度也就越高。

其次，加热设备可能已设计用于化石燃料实现的高温，因为较高的温度会使加热设备的尺寸更小，从而降低了投资成本。不管为建筑供暖的特定供热设备如何（无论是水暖还是空气系统），都会出现这一问题。无论哪种系统，区域供热网络和室内空气之间都需要一种热交换器，例如，水暖系统中的散热器。例如，瑞典直到 20 世纪 80 年代才设计了适用 60°C 至 80°C 的散热器（Frederiksen 和 Werner，2013 年）。

供热设备尺寸过小的后果是，只能在供热季节需求不高的时段使用低温流体（Østergaard 和 Svendsen，2016a；Tunzi 等人，2016 年；Østergaard 和 Svendsen，2016b）。有关新建和改造建筑的法规应促进加大供热设备的尺寸，以便可以使用温度更低的流体。例如，西班牙有关供热装置的新法规（仍在讨论中）将要求最高供应温度为 60°C（西班牙，2020）。

可以采取许多措施来解决供热设备尺寸不足的问题。其中包括改造，例如上文所述的建筑改造，通过改造降低供热负荷，从而直接实现较低的使用温度。此外，不论是否改造建筑，都可以更改供热设备。最后，不仅可以更改控制设备或消费者模式，还可以更换设备本身，详见下文。

地板采暖非常适合低温供暖（Averfalk 和 Werner，2017；Schmidt 等人，2017）。但它需要大量成本高昂的改造，而且如果控制设备不适合，回流温度可能高于预期。安装较大的散热器也可以实现较低的运行温度，而且获得同等收益的成本更低。这些设备可以在任意低温下运行，并且还能让区域供热系统的回流温度略高于室温。但是，散热器方面必须注意：应避免使用对流式散热器，需要采用高板式散热器，以便能在水中充分冷却（Svendsen、Østergaard 和 Yang，2017）。

另一种选择是使用空气供热，因为它通常以略高于设定温度供热。但由于室内温度状况不同，空气采暖的舒适性低于散热器或地板采暖（Nilsson，2003 年）。

控制设备对供热系统的正常运行至关重要。恒温阀和自动平衡阀可充分实现此功能。它们可以调节通过散热器的流量，提供所需的供热功率，从而维持设定的室内温度，同时还可以将区域供热系统的回流温度降至最低（Tunzi 等人，2016 年；Zhang 等人，2017 年）。没有它们则会引起不适，因为室内温度可能过低或过高，而且回流水的冷却效果可能会很差。后者可能会对区域供热系统的性能产生严重影响，因为供热网络可能无法应对增加的流量。

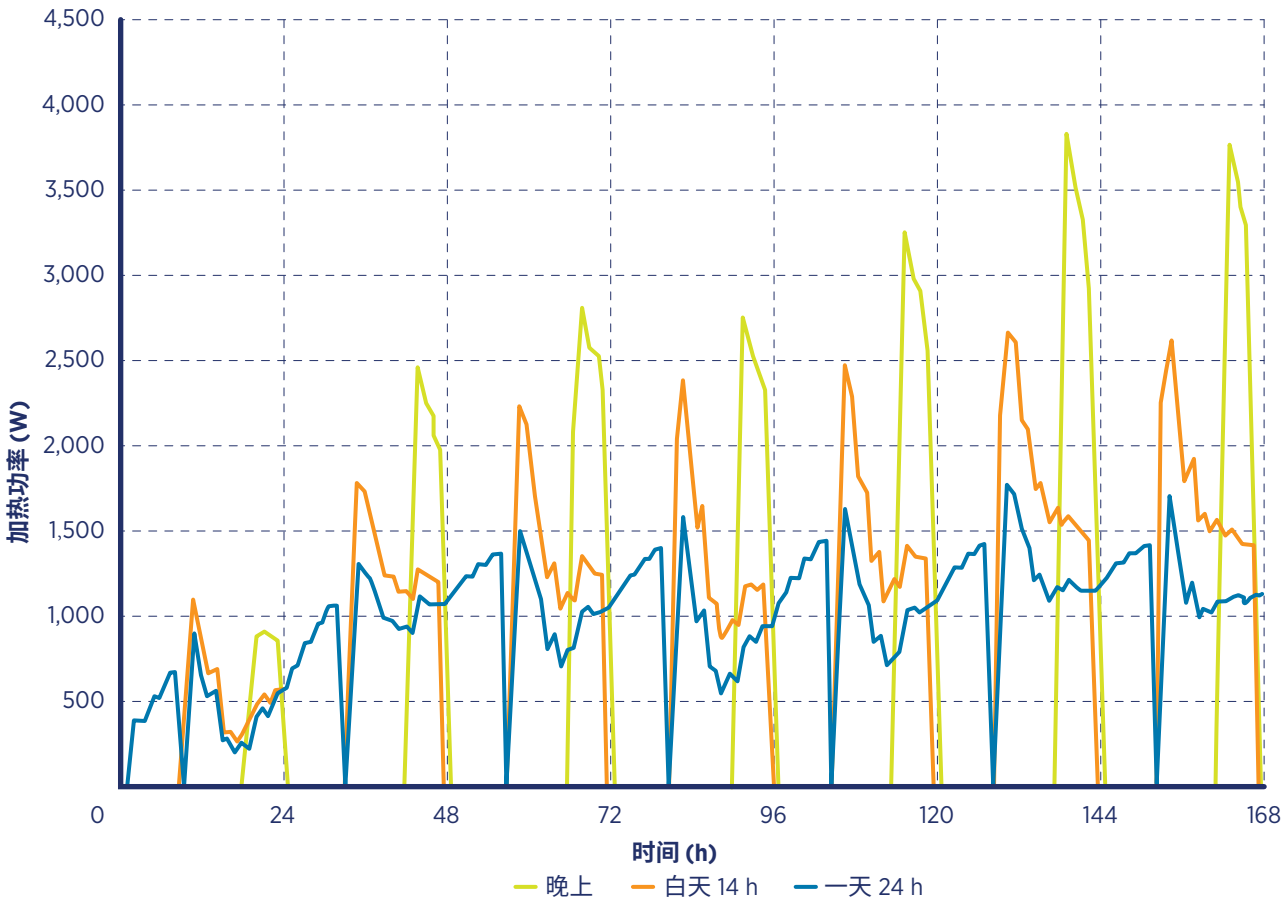
消费者行为也可能阻碍低温系统的部署。其中一个常见问题是如何利用停暖时段。这些时段减少了能耗（能耗大小受保温层的影响较大），但一旦重新连接，供热系统将承受更高的负荷（Frederiksen 和 Werner，2013 年）。意大利的区域供热网络（Noussan、Jarre 和 Poggio，2017；Manente 等人，2019）或比利时家庭（Jebamalai、Marlein 和 Laverge，2020）中均看到这类行为的例子。在这种情况下，散热器需要的温度将比其他情况下的必要温度更高，从而降低了网络效率和灵活性（或为确保所需的灵活性而提高了基础设施成本）。

供热系统开启后，系统不仅需要克服热量损失，还需要给建筑物升温。如果供热系统按照 14 小时和 24 小时制的时间表运行更长时间，则供热设备仅需要补偿热量损失。

例如斯洛文尼亚的拉夫内纳科罗什凯姆市，他们通过更改利用时间降低了供热温度。通过增加供热系统的工作时间，该市已将供应温度从 130°C 降至 80°C。

图 29 描绘了供热时间表不同的住宅所需的供热功率，表明如果在温度降低时使用，供热功率会高得多（因而温度也更高）。例如，在夜间供热情况下，供热系统每天开启几个小时（5 小时）。

图 29：保温效果不佳的公寓在不同供热时间所需的供热功率



依据：Frederiksen 和 Werner（2013 年）

此外，区域供热系统还利用了附近钢铁厂的电弧炉冷却过程中产生的余热（以前是通过冷却塔排放到环境中）。该余热量约占该市分配给客户的所有热量的40%，预计这一比例将增加到总热量需求的一半以上（同时还使用热管技术回收工业过程中的热量）。在比利时安特卫普市，区域供热运营商希望以70°C的温度为建筑供热。但在与区域供热网络连接之前，燃气锅炉的供应温度通常为90°C。这是通过取消停暖时段来实现的。

研究强调的另一个问题是散热器恒温阀（TRV）的不当使用。大多数消费者忽略了TRV的使用方式（Liao、Swainson 和 Dexter，2005 年）。用户往往会不断修改设定温度，从而导致供冷（和 / 或供热）效果不好和不适感。解决此问题的方法有两种：使用电子TRV（用户只需要在其上设定所需的室温）和在散热器出口处安装温控限制器。

上文详述的各种技术挑战大多已分别进行了分析。尽管如此，它们之间还是存在重要的协同作用，因为改善保温层便可降低散热器的温度，而无需采取其他措施。

“政策制定者应将建筑改造、改变供热方案和网络现代化规划方案结合在一起，以实现最佳性能水平，”

生活热水制备

提供生活用水（DHW）的方式多种多样，例如，有些换热站将多个热交换器串联起来，以利用供热系统回流的热水（Frederiksen 和 Werner，2013 年）。为简单起见，本报告重点介绍最常见的几种。

不论具体的 DHW 制备方式如何，均可归类为：瞬时制备和边储存边制备。在第一类方式中，热水的生产和消耗几乎是同时进行的，而在第二类方式中，生产和消耗是分开的。两种比较常见的方案是，使用板式热交换器瞬时制备和使用水箱边储存边制备（照片 6）。

在水箱中，区域热水通常沿内部盘管循环，将储存在其中的水加热，当然使用外部板式热交换器也可能实现（Christiansen 等人，2012 年）。照片 6 展示的两个换热站分别使用热水箱和板式热交换器制备生活热水。

在低温系统中，水箱存在两大问题。首先，如果不采取其他措施，水箱需要高温（60°C 以上）来防止细菌（如军团菌）繁殖（Yang，2016 年）。此项要求使得难以利用 65-70°C 以下的温度。而同时，从水箱流出的回水很少低于 30°C（Thorsen 和 Kristjansson，2006 年）。

在区域能源系统中，特定时刻提供的能量是网络中循环的流量与进水和回水的温差的乘积。对于给定数量的能量，温差越大，流量越低，反之亦然。因此，必须维持较低的回水温度，以降低进水温度，而又不致流量过高。

水箱回水温度相对较高会导致区域供热网络的温差较小。因此，这将需要更高的流量、更大的泵，并消耗更多电力进行泵送（Thorsen 和 Kristjansson，2006），可能会损害网络满足消费者冬季高峰需求的能力。

照片 6：制备 DHW 的水箱（左）和板式热交换器（右）示例

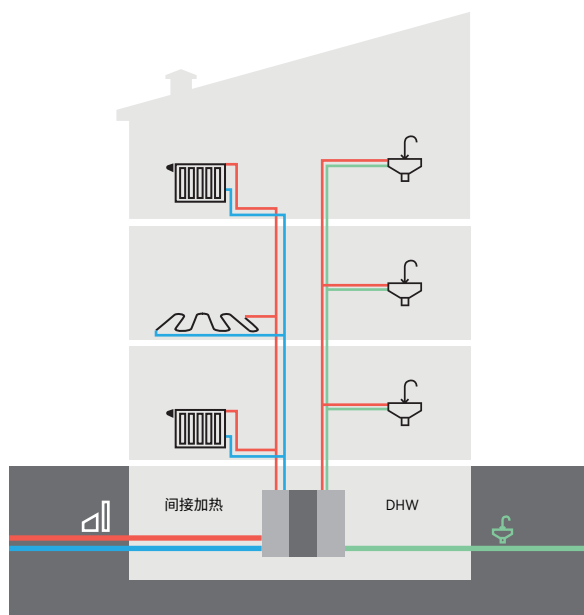


来源：Shutterstock

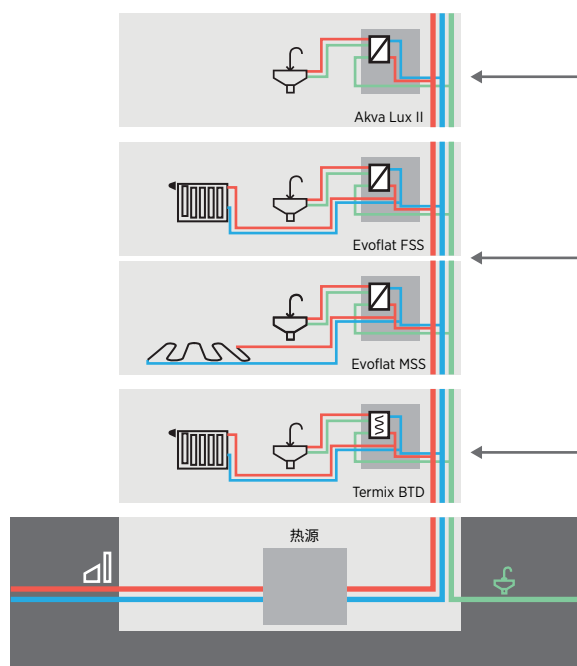


来源：Luis Sánchez-García

图 30：整栋建筑（左）和单套公寓（右）的 DHW 制备



来源：丹佛斯 (www.danfoss.com/)



相反，DHW 瞬时制备非常适合于低温网络，因为板式热交换器可以在进水温度低至 50°C 的条件下运行，但换热站设备和水龙头之间的体积应小于 3 升（Brand，2014），并且以非常接近进水温度的温度同时返回区域供热系统中的水（Thorsen 和 Kristjansson，2006）。

但是，瞬时制备要求输配网络和消费者之间的连接管⁷中的流量更高，因而要求的直径更大。

⁷ 这些连接管道通常称为输送管。

关于制备，DHW 可以在整栋建筑或单套公寓 / 房屋中集中制备和储存，如图 30 所示。在第一种情况下，必须有一个循环系统才能在消耗高峰时维持足够高的温度。然而，这类系统也有类似于水箱的缺点：为防止细菌在循环管中大量繁殖，必需维持高温，因而也丧失了使用板式热交换器制备 DHW 的一些潜在优点。此外，其效率也要低得多，因为循环系统中损失了相当一部分能量（Bøhm，2013 年）。公寓换热站的分布式制备不需要循环系统。

因此，要在区域能源系统中实现低温供热的最大优势，首选方法是采用板式热交换器进行分布式制备（Lund 等人，2017 年）。

上文提出的解决方案需要对 DHW 系统进行改造，这可能并不可行。还可以使用其他技术替代方案。一种可能的方法是，使用化学（例如氯化）或物理（紫外线辐射）手段来防止细菌繁殖（Yang，2016）。另一种方法是利用电锅炉或热泵提高的温度，因此区域供热不需要提供如此高的温度（Elmegaard 等人，2016）。

B.4.2 评估与现有供热网络的相容性

如果不对消费者的设备采取任何措施，则降低进水温度后，回水温度也会同时提高（Averfalk 等人，2017 年），因此，进水和回水之间的温差较小。温差较小反过来又会导致网络中水流速加快。如果管道尺寸不是太大，则压力损失可能过大，可能高于管道承受的最大压力和 / 或高于泵所能输送的最大压力。

因此，降低回水温度至关重要，这将有利于降低进水温度。即使将回水温度降低到 20-30°C，同时将进水温度维持在 50-60°C，温差也比传统的区域供热系统（40-80°C）略小。因此，在配有空间供热低温资源的系统中，在最寒冷的时日，可能需要提高进水温度（Tol 和 Svendsen，2015）。

丹麦维堡的区域供热系统便是一例，他们通过降低回水温度，降低了进水温度。该网络在 14 年内（2002 年——2016 年）将回水温度从 50°C 降低到 40°C（Diget，2019 年）。

在某些情况下，仅降低指定区域的系统温度，而网络的其他区域则继续在较高温度下运行，也是可能实现的。例如在一个新建区域，其建筑均已设计为在低温下运行时，或指定区域的建筑已经改造时，便会存在这种情况。在此类情况下，可安装混合分流器来降低该特定区域的进水温度（图 31）。丹麦的吕斯楚普、森讷比和齐尔斯特便采取了这种做法（Olsen，2014 年）。

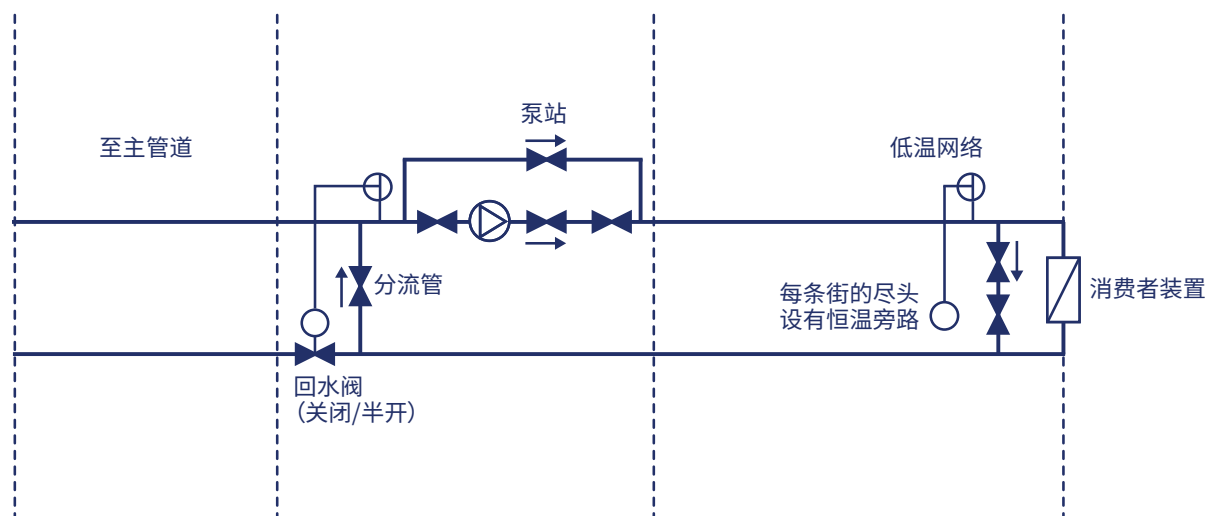
这一策略可以减少该特定区域的热量损失，但由于生产温度保持不变，故而无法实现低温区域供热的最大优势。其解决办法是并行运行多个不同温度水平的网络，每个网络根据消费者需求为不同消费者服务。

例如，法国巴黎郊区的一个网络（文本框 11）和西班牙马耶雷斯（HUNOSA，2019）均采用了这一策略。该解决方案让部分生产环节享受到了低温的经济效益。

区域供热系统的一个常见问题是夏季回水温度升高。为设计为全年以较低进水温度运行的建筑供热的新网络中也会发生这种不利现象。这是因为热水从进水管分流到回水管，这在低能耗期间尤为必要。如果不这样做，则进水温度最终会下降过多，以至于消费者再次需要热水时，将要等上很长时间，让人无法接受。

尽管回水温度升高的原因不尽相同，但后果与前文所述相似：热量损失增多、生产效率降低、储存容量下降。

图 31：将低温网络整合到传统网络中的混合分流器示意图



来源：Olsen（2014 年）

为解决这一问题，有人提出了一些建议，包括 Yang 和 Svendsen（Yang，2016）提出的舒适浴室以及 Averfalk 和 Werner（Averfalk 和 Werner，2018）提出的三管系统。

舒适浴室的提议旨在冷却浴室地板采暖系统中分流的热热水。分流的热热水经冷却后，将通过与非分流的回水相同的回水管返回生产设备。该解决方案的问题在于，浴室可能加热过度，温度高到令人不适，特别是在气候比较温暖的国家 / 地区。此外，消费者不得不全年使用浴室地暖，但他们未必愿意。

三管系统不会将分流的热热水冷却，而是让其沿另一管道返回生产设备，从而可以将冷却的热热水（回水管）和分流的热热水（再循环管）分开。这样，DHW 生产过程中产生的冷却水不会被分流的热热水加热，使全年维持较低的回水温度成为可能。但是，这一新概念迄今尚未被证实。此外，修建第三根管道势必增加区域供热网络的建设成本。

管道的热性能也可能阻碍供热温度的降低。如果采用较低的温度，热量损失将会减少。但是，如果管道的保温性不够好，而且供热厂和消费者之间的温差很大，则当供热厂的供应温度降低时，用户端的温度可能下降至低于提供足够热量所需的最低温度。在这种情况下，升级管网成为必须。

此外，新的余热源可能需要新的网络概念，因为可用的温度并不适用于现有系统。为提高供应源的温度和 / 或在严寒季节提高网络中某些位置沿线的温度，热泵等升温技术可能变得非常重要。

现有供热网络与建筑物达成兼容所面临的技术挑战概述

新一代区域供热系统有望采用更广泛的能源和低温可再生能源。然而，从既有的区域供热系统过渡到现代系统还需对现行网络进行适当设计，并使该系统与消费者连接和建筑群供热系统相兼容。国家和地方当局可采纳以下建议，以评估最佳改造地点及改造程度，并确保纳入战略性规划。

整合建筑改造、供应变化和网络现代化规划，以达到最佳性能水平，并避免产生锁定效应和脱节的情况。

➔ 打造战略合作关系，实现区域能源和建筑节能目标。例如，考虑采取社区合作的方式，在需求侧和供应侧同时实施节能措施。

➔ 实施建筑改造政策时，应优先考虑改造保温性能不佳的建筑和能源需求较大的耗能大户。

➔ 对所有消费者实行按用量计费的方式，鼓励更加节能的做法。

此外，区域能源运营商可以采取以下措施，确保区域能源网络与低温供应技术相兼容：

评估已建成社区的现有和新建区域供热系统，并使其与现有建筑相兼容。

➔ 改造现有建筑物的围护结构，以改善建筑的能耗性能，降低能源系统的峰值负荷。这将整合低温本地能源，包括可再生能源。

➔ 当前已安装的供热设备（散热器）可能无法针对低温用途进行扩展。因此，需要重新设计和更换设备，还要改造建筑群。

➔ 可以安装一些控制设备（例如恒温阀）来调节流量，控制舒适度。

➔ 在热水系统中，低温会导致水箱中滋生细菌（例如军团菌）。安装瞬时 DHW 制备设备（例如板式热交换器）也是一种解决办法。但是，对于低得多的温度，请使用其他技术解决方案，例如使用化学 / 物理手段灭菌或整合热泵或电加热器来升温。

➔ 改变用户行为，遵循最佳实践，以管理建筑中的供热装置，确保能够转换为低温供热。这可能包括避免采用停暖时段。

➔ 推广新的换热站概念。

评估现有供热网络并与其兼容。

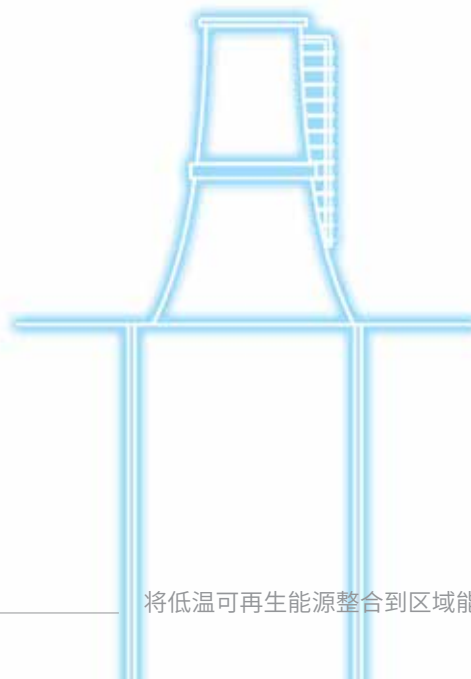
➔ 改为较低的进水温度可能会导致流速加快，可能损坏网络。为避免这种结果，请确保同时降低建筑到网络的回水温度（例如采用舒适浴室概念）。

➔ 万一进水温度过低，无法满足供热需求，可结合使用升温技术（热泵），以提高供应源的温度，或在严寒季节提高网络中特定位置的温度，或满足高峰需求。

➔ 减少网络中的余热损失，以防建筑供热不足。这可通过为管道包裹充足的保温材料来实现。

培养地方能力，以应对将低温热源整合到现有网络和建筑群中的技术挑战。

➔ 由于区域能源和建筑节能的技术挑战性，政府需致力于提高当地的专业知识水平。



B.5 应对低温能源开发中的技术挑战

区域能源网络中的每种低温热源都可能存在特定挑战。因此，需要根据当地情况研究解决具体问题。这些问题可能会影响技术方案的结果，下文将针对每种热源讨论各种解决方案建议。

解决低温能源利用相关的技术挑战的一个关键要素是培养当地员工的能力。如 B 部分第 3.2 节所述，国家和地方当局均可利用现有技术援助计划实现知识转移。此外，当局可以为区域能源系统开发商提供研发支持，开发商又将反过来投资创新。采用行业最佳实践、参加经验分享论坛，可以进一步培养能力。

B.5.1 地热能

地方决策者在考虑将地热能用于 DHC 时，必须要了解地热能的优势和潜力。应充分评估地热能的潜力，确保满足供热供冷需求。然而，随着时间的推移，储层中的压力和体积会发生变化，储层中抽取出的地热流体的生产率将会下降。要解决储层生产率下降的问题，可以将流体回注到储层中，以确保通过区域供热或其他应用利用地热能的可持续性。

回注对于确保地热能的可持续性至关重要。有些项目是全部回注，有些项目没有回注，还有些项目是部分回注（比例各不相同）。实地经验表明，几乎全部回注是地热资源寿命的重要决定因素。因此，大多数现代地热开发项目都采用全部回注或几乎全部回注。

带有回注的地热区域供热系统中，最常见的设计是双井系统，即钻探两口井：一口生产井和一口回注井。如上所述，大多数现代地热开发项目采用全部回注，这不仅是出于资源可持续性，还考虑了环境因素——避免因地表排放使用过的热水而产生热负荷和化学污染。世界上很少有地方在考虑了环境因素后，还允许在地表排放大量非饮用水。对双井系统进行改进，便得到了三井系统——现有双井系统中有一口井生产率大幅下降时，将钻探第三口井。然后将现有的两口井改造为回注井，而将新钻的井作为生产井。三井系统可以延长地热项目的经济寿命（Sigfusson 和 Uihlein, 2015 年）。

世界上大多数地热系统属于中低温类型，例如沉积盆地中的系统。这些盆地中的岩层通常位置较深，而且非常坚硬（已固结），但在某些情况下，例如中欧的潘诺尼亚盆地，储层的上部是由未固结或半固结的沙子或砂岩组成。回注到这类储层中则存在独特挑战。这些挑战包括可能损坏半固结地层、地层塌陷井中或释放颗粒进入生产或注入流体中。回注的水流经储层时，会带走一些疏松的沙粒，堵塞孔隙，使得渗透率降低，进而导致井的生产率下降。此外，由于流体可以速度穿过储层，储层流体可能大幅降温。如果回注到生产井中的水流动太快，则必须密切监控储层温度，检测热突破。

地热储层管理和回注需要了解此类系统的水文和地质情况。适当的储层管理将有助于合理确定将流体回注到储层中应使用的压力，以最大程度减少对地层的损害。同时，所选的回注压力和按井的过滤间隔适当放置的滤水管应确保将储层中的沙粒迁移率保持在

最低水平，以免堵塞可渗透区。此外，应谨慎选择生产井与回注井的间距，以确保回注后的流体经足够长时间加热后才到达生产井，以免热突破（可能导致储层明显降温）迅速进展（GeoCom，2013 年）。项目开发和长期生产通常需要调整注入方法，以防系统冷却。监控资源是系统可持续性长期管理的组成部分。

当溶解在地热流体中的物质因流体的热力学变化（压力和温度）而沉淀时，流体的化学性质会发生变化，矿物质会沉积在设备和井的表面，导致“结垢”。放任沉积和结垢可能导致设备（例如热交换器）效率显著降低，或使管道直径变窄，降低流速。

在地热井中或岩层上沉积也可能导致地热井生产率下降。同样，由于地热流体与地下化学元素的相互作用，其 pH 值也可能发生很大变化。酸性地热流体与设备结构中的金属材料发生反应，导致腐蚀（IRENA，2019a）。解决与地热流体有关的挑战会增加项目的运维（O&M）成本。

最大程度减少结垢的一种方法是严格控制流体的温度和压力。地热流体如果冷却到低于溶质的饱和温度（或压力），则会发生沉积。除极少数情况外，温度下降越多，沉积速度越快。建议始终确保地热流体处于加压状态，以免气体闪发。

压力下降会引起 pH 值变化，从而可能导致溶质沉淀。此外，不建议将特定地热储层的流体与其他储层的流体混合，众所周知，这会导致大量沉淀。

在沉积盆地的系统中抽取和注入流体时，这种可能性会更高。从化学角度而言，生产层上方和下方的地质构造截然不同，混合可能导致矿物质沉淀。

可以简单地按预定间隔清除热交换器表面上的任何沉积物，或使用化学品溶解水垢，以免影响设备的效率。此外，也可使用化学方法（例如调节地热流体的 pH 值和添加防垢剂）降低（包括地热井和地层中的）沉淀率和结垢率（Brown，2013 年）。如果是腐蚀性强的地热流体，则应选择由已知可抗腐蚀的材料（例如钛）制成的热交换器，甚至井壁管和井口也应如此。

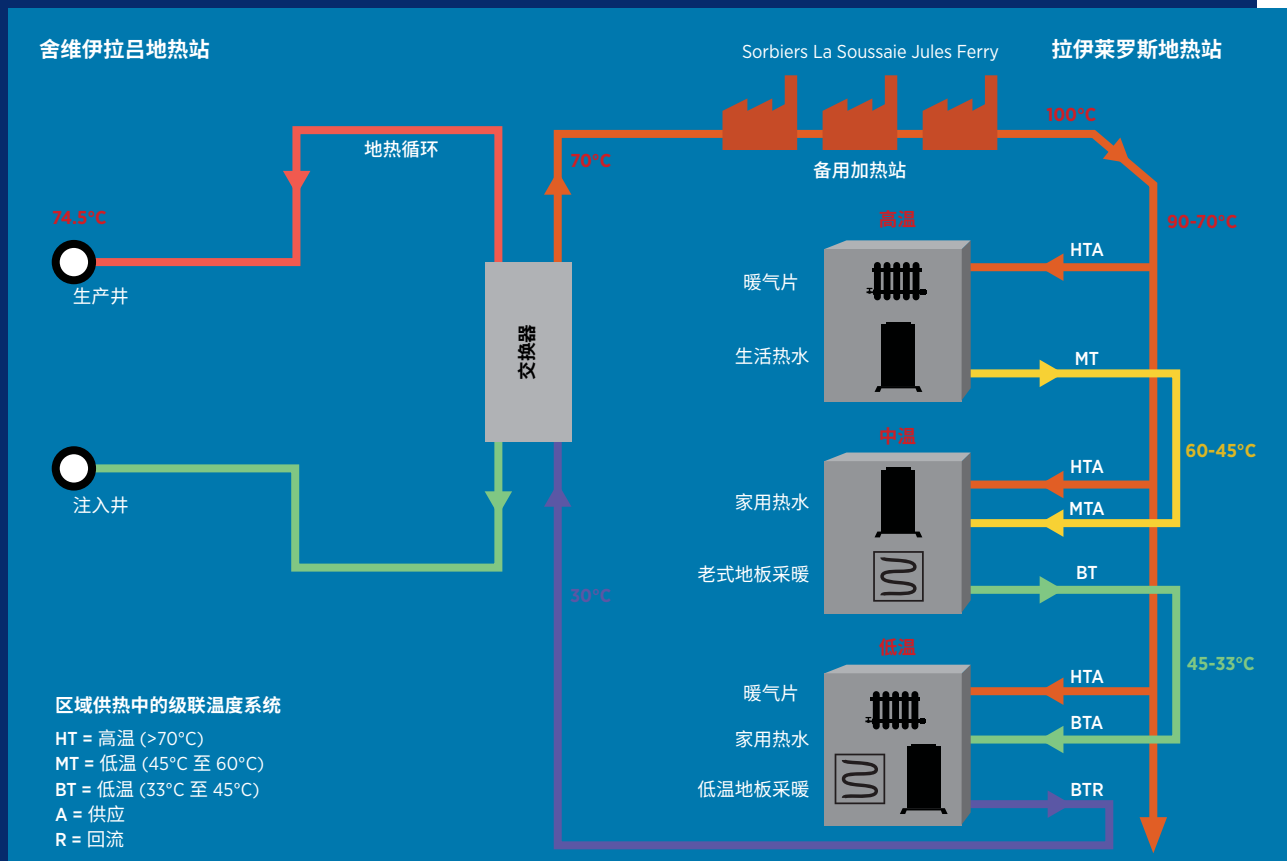
开发和利用地热能可能导致微地震，这是一个大问题，特别是建成区附近的项目。引发微地震的原因包括流体抽取与回注、储层刺激和钻井。加强对于储层（即岩石和流体）地质特性的了解可能有助于减少和管理微地震活动（GEOENVI，2020 年）。

为提高效率并从地热源回收尽可能多的热量，可以将地热区域供热网络设计成两级甚至三级并联。并联系统按优先顺序工作，热水首先供应给要求“温度较高”的工业流程或建筑，然后供应给要求“中等温度”的，最后再供应给所需温度最低的最近建筑。文本框 11 介绍了巴黎地区的一个示例。

全球地热联盟等国际合作和多边合作组织对促进知识转移、消除障碍和支持新兴市场发展至关重要。例如塞尔维亚地热供热供电试点项目（GOSPEL）。该项目由法国公共资金资助，利用法国的工业专业知识和塞尔维亚的当地知识确定了至少三个可行的地热能项目（Mouchot 等人，2019 年）。各国也可以利用开发机构提供的技术援助资金。例如 2006 年世界银行向欧洲和中亚提供的地热能开发计划（GeoFund）。该计划包括 2,500 万美元资金，其中 150 万美元用于亚美尼亚地热项目技术援助，81 万美元用于通过国际地热协会（IGA）提供区域技术援助（Wang 等人，2013 年）。

文本框 11

级联：巴黎（法国）的多温地热供热系统



法兰西岛的地下蕴藏着丰富的地热能。供热公司的业务区域包括 SEMHACH 在巴黎郊区的舍维伊拉吕、拉伊莱罗斯和犹太城，他们实施了梯级的多温区域供热系统，其中存在五种不同的温度水平，包括输配管道温度。

区域供热网络中的热水始于发电厂，收集锅炉中的热量，高温热水首先供应给要求温度较高的最老建筑的热交换器。中等温度的回流温度也足以其他老建筑供热，这些老建筑的供热需求比最老建筑要低，因而需要的温度更低。最后，温度更低的二次回水则为效率最高的建筑以及温室和游泳池（均为低温设施）服务。

因此，供热厂最终回水温度非常低，仅为 30°C。对于 DHW，所有建筑均以高温供应，并以低温或超低温返回网络。

这种级联系统提高了地热能的利用率，因为最终的回水温度（二次回水）足够低，可以从发电厂提取大量地热。不同的温度让客户可以根据需求选择最合适的温度（散热器、地热地板、散热板等）。最重要的是，这种网络结构最大程度提高了所生产热能的利用效率。

B.5.2 太阳热能

太阳热能天然具有季节性和波动性。冬天会出现太阳能供应不足而建筑空间供热需求高的情况。而夏天，区域供热负荷通常很低，太阳能发电厂的发电量却达到最高。但是，这一特性让太阳能热电厂适用于区域供冷。若要提高太阳能的比例，则可利用大型蓄热装置。为此，丹麦在德龙宁隆、马斯塔尔等地修建了多个储能坑。又如，加拿大阿尔伯塔省的德雷克 Landing 太阳能社区将夏季多余的太阳能储存在附近的地下岩石和土壤中，然后在冬季为房屋和企业供热（Drake Landing Solar Community, n.d.）。太阳热能可与其他能源结合使用，利用互补系统提供部分供热需求。例如，在拉脱维亚的萨拉斯皮尔斯，一座 5 MW 的太阳热能区域供热厂与一座 3 MW 的生物质锅炉相联合，提供了该镇 85% 的区域供热。

太阳热能面临的另一个挑战是，城市中缺少大片空地来建设大型地面太阳能供热厂。一种方法是将它们修建在城市周边地区，再将其与区域供热系统连接（Lund 等人，2018 年）。如果必须购买土地来修建太阳能区域供热系统，供求问题（例如当地土地所有者的土地规划）将会影响土地的价格。越靠近市区，土地成本可能越高，因此，必须估算集热器的最佳位置。对于大型项目，将需要对距离进行更深入的研究，而且可能更具意义（Trier 等人，2018 年）。

在城市中部署太阳能集热器和蓄热设施，其他可以选择的场地可能包括购物中心和停车场的大型屋顶（虽然这种方案很难整合到区域供热系统中，且应仅涉及找谁来首先安装的问题）、污地、路边地块和污水处理池等（Battisti，2018 年）（照片 7）。

在已配备区域供热的城市中启动太阳能区域供热项目存在两个主要问题。一是夏季负荷通常已被“占用”，因为 DHC 市政企业用了发电或其他余热源产生的热量，从而导致太阳热能成为过剩。二是寻找地方放置太阳能面板非常困难，而且成本高昂（Sørensen，2017 年）。为克服这些困难，蓄热通常是 DHC 系统的必要组成部分。在这种情况下，大规模使用太阳热能是最经济的解决方案，因为这是成本最低的供热技术之一。

太阳热能系统各组件可能存在较大的昼夜温差。运行温度越高，温差越大。系统中的所有组件和每个连接都必须能够应对热胀冷缩（Schmidt 和 Miedaner，2012 年）。此外，太阳热能系统必须能够应对最坏的情况——持续强烈的太阳辐射。为避免加热过度（导致损坏），集热器回路可在夜间运行，冷却水箱中的部分液体。这表明，可以重新考虑设计准则，将夜间冷却纳入其中。但这仅适用于配备了一定蓄热装置的工厂（Heller，2001 年）。

照片 7：美国亚利桑那州斯科茨代尔太阳能区域供冷厂（左）和奥地利格拉茨 Fernheizwerk 集热场一角（右）



来源：SOLID Solar Energy Systems GmbH

B.5.3 余热

根据一项近期研究（Schmidt、Geyer 和 Lucas，2020 年），可以识别出以下技术障碍：i) 余热供应和热需求的时间不匹配，包括夏季大多数可再生热源的供应竞争；ii) 质量不匹配。后者涉及一些余热源，它们存在以下一个或全部问题：温度水平低、总量相对小和 / 或不连续发生。使用蓄热和热泵技术通常可以解决这些技术问题；但是，它们都需要额外的投资成本，导致资金问题。

由于需要备用装机容量来管理随时可能出现的余热供应中断的风险，包括余热温度过低，需要使用热泵，因此运营复杂性也相应提高。标准化（合同和技术上）水平不够以及更多利益相关方的参与可能令情况更为复杂。

B.5.4 自然冷却

使用湖水、河水或海水自然冷却要解决的技术挑战主要涉及水生生物安全、水质、结垢和腐蚀（CELSIUS 项目，2019 年）。良好的过滤系统可以保护海洋生物，并减少结垢。其他防垢解决方案包括：i) 使用化学品，例如氯；ii) 高级氧化处理；iii) 非化学处理，例如热震。研究还表明，提高冷却水的流速可能会减缓热交换器内部沉积物的积聚。

评估最合适的防垢系统需要以环境考量和有关化学物质排放量的现行法规为基础。水中的有机物数量与季节相关，因此各个季节都应对防垢系统进行优化，以最大程度减少有机物排放（CELSIUS 项目，2019）。

低温能源开发面临的技术挑战和建议概述

下文总结了针对区域供热供冷系统向国家和地方政府以及运营商提出的主要建议，以应对低温能源开发中遇到的技术挑战。

进行能力建设，应对低温可再生能源或余热能源应用中的技术挑战。

- ➔ 培养可再生能源技术专家团队（包括政府部门的专家），例如地热能源专家团队和太阳热能专家团队。
- ➔ 投资提高当地劳动力的专业知识水平，以确保区域能源网络的平稳运营。这不仅有助于优化网络运营，还能确保在尽量降低能源供应中断风险的前提下解决技术问题。

为了确保区域能源系统平稳运营，运营商需要在项目中实施以下措施。

遵循地热能源系统运营的最佳实践。

- ➔ 遵守地热区域能源系统中热储管理以及设备运维相关的行业最佳实践。这些最佳实践包括为热储重新注入利用过的地热以保证热储的可持续性，以及管理结垢与腐蚀等工程策略。

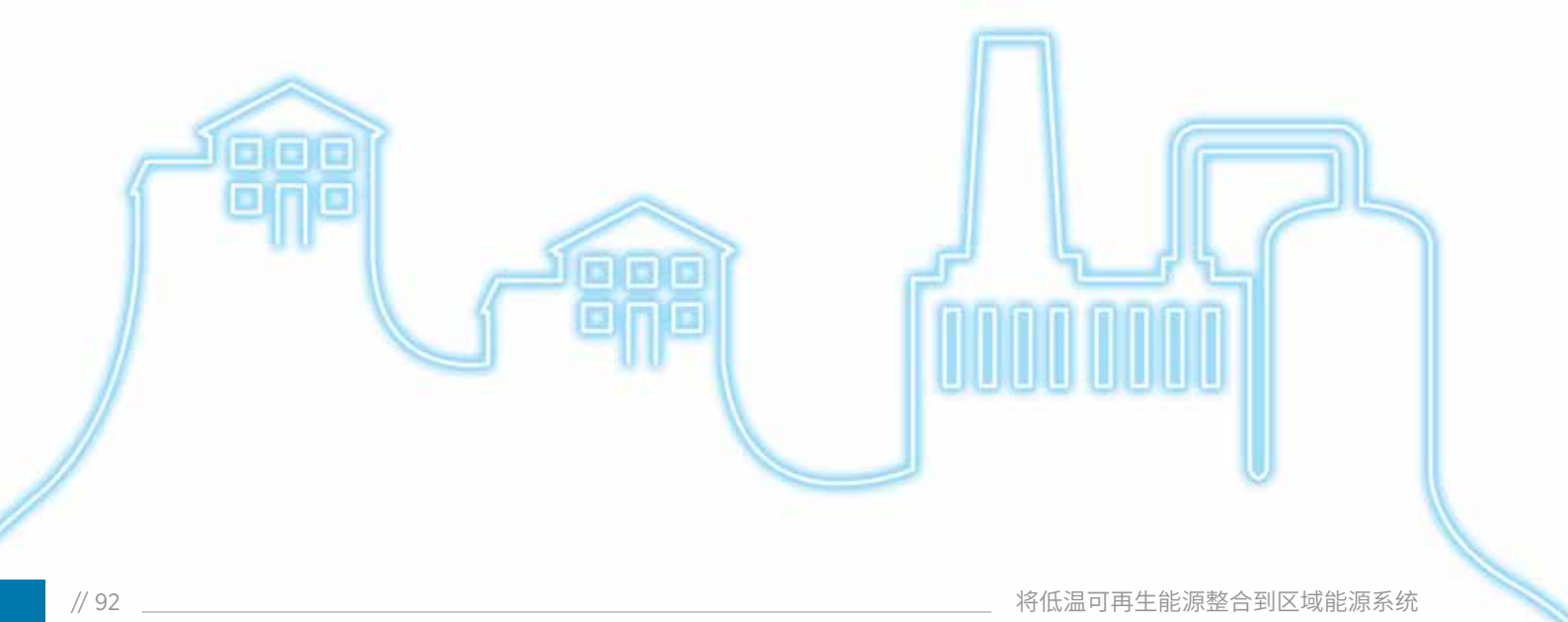
部署解决方案管理太阳热能和余热供应的波动性，以确保电网稳定运行。

- ➔ 在区域供热供冷网络中整合大规模蓄热装置来捕获余热，例如在需求较低时储存生产的太阳热能和余热，以备将来需求增加时使用。
- ➔ 制定策略以确保区域能源供应不会中断，例如实施为区域能源网络供应余热的长期合同。
- ➔ 使用本地低温能源极可能面临供给侧的输出和温度波动问题。在这种情况下，请利用热泵提高温度，确保满足客户的供热需求。

表 6 总结了地热、太阳热能和余热面临的主要技术挑战及解决方案。

表 6：DHC 系统中开发低温可再生能源或余热能源面临的主要挑战及潜在解决方案

来源	主要挑战	可能的解决方案
地热	投资成本高	制定地热资源风险防范和生产率保障方案
	钻井失败风险	广泛开展地学研究
	生产率随时间推移而降低的风险	储层监控及资源管理（尤其在注入过程中）
	结垢和腐蚀风险	在热交换过程中将地热流体的温度保持在溶质的饱和温度以上、定期维护热交换器和其他设备、使用化学方法（例如防垢剂）处理地热流体以减少沉淀和结垢
太阳热能	供应和需求存在季节性偏差	确保在有 DHW 需求的系统中使用
	投资成本高	供热供需不匹配时，可利用太阳热能供冷
	温度限制	整合蓄热装置以存储多余的太阳热能
	空间不足	利用其他空间，例如屋顶、污水池、曾经的垃圾填埋场等
余热	资源的可持续性	制定合同协议以确保供应需求
	供应波动状况	在网络中安装蓄热装置
		组合连接，将高温输送至供应管线、低温输送至回流管线
自然冷却	水质和水生生物的保护	过滤
	结垢和腐蚀风险	防垢工艺



B.6 推动实施监管条件、融资和商业模式

DHC 项目应遵守地方、国家或省 / 州各级制定和 / 或实施的法规。此外，特殊项目还应遵守一般供热与建筑法规以及与地下水资源开采（例如地热项目）、土地使用（特别是太阳热能项目）和能源系统相关的法规。区域供热供冷项目通常在多个专业领域有所交叉，例如建筑类型与改造、区域划分、能源供应、与管道铺设相关的道路养护等。所有这些措施也均受各级政府法规的影响，如图 32 所示。

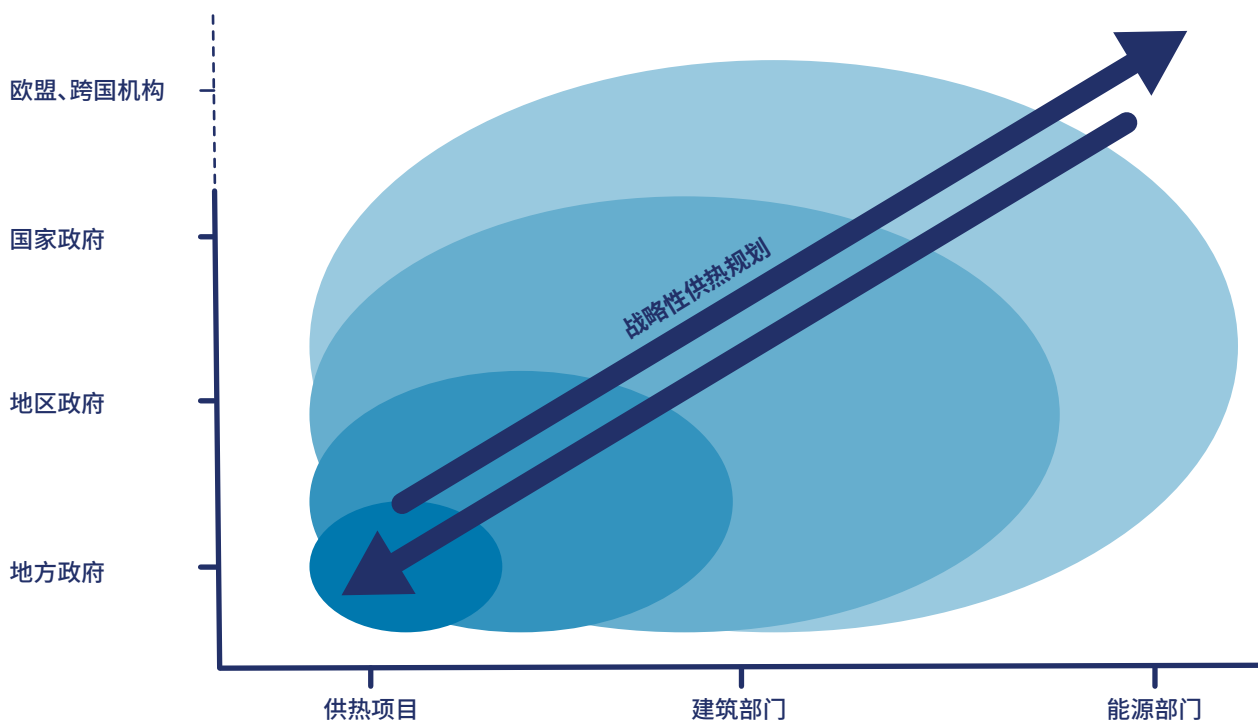
国家和地方政府需要制定财务和监管措施，确保制定的定价制度考虑了 DHC 系统的利益。同时，现有制度必须确保不会因对其他能源提供（直接或间接）补贴而损害 DHC 系统。

实施新的区域能源项目（或替代化石燃料）通常需要大笔投资且通常由单一投资者投资，而不是由很多消费者或投资商集资购买单个设备。相对于其他方案，采用余热源和可再生能源的区域能源系统可能会因能源定价制度、市场结构和高昂的前期资本成本而处于不利地位。因此评估区域能源项目时必须以长远眼光看待，因为它难以在短时间内实现收支平衡。

采用低温太阳热能、地热能或混合系统的区域能源系统需要为每个特定项目量身定制经营模式。这种经营模式应保障所有利益相关方的收益，并实现所追求的更大的社会经济效益。

为此，所有权结构和价格调控模式的选择会影响将低温能源整合到区域能源系统中可使用的方案。

图 32：在国家和国际法规背景下进行本地 / 战略供热规划并协调多种利益与需求



B.6.1 所有权结构

区域能源系统主要有四种所有权模式：消费者所有、公有、私有（商业）和公私合作（PPP）（Djorup 等人，2019a）。事实上还存在这四种形式的混合模式，特别是在公私混合结构中。这些所有权结构可存在于竞争市场，也可存在于垄断市场。所有权问题适用于区域能源系统的两个主要组成部分：输配网络和生产装置。

输配网络的所有权

图 33 说明了区域能源网络作为重要基础设施所发挥的作用，让 DHC 生产商能够将生产出的冷能和热能输送给消费者。这些网络是支撑系统运转的基础设施。

区域能源系统的核心问题与输配网络的所有权有关。这是导致垄断局面的主要原因，因为这控制了能量输送权限。有两个重要因素值得考虑：一、谁拥有多数股权；二、预期的投资回报率。需要关注的一个重要因素是，区域能量分配网络是公有还是私有、谁拥有多数股权。公有制通常可以确保将网络用作公共基础设施，而私有企业会将网络视为投资，要求获得回报。因此还需要考虑第二个方面：要求的投资回报率。区域能源网络需要大量资本且使用寿命长，

因而要求具有较高的内部收益率（IRR）⁸，这可能阻碍建设覆盖全市的区域能源网络。这将在 B 部分第 6.4 节进一步阐述。从社会经济的角度来看，私有企业的 IRR 约为 10%-15%，但公共投资的 IRR 可能仅为 3%-5%。这将显著影响区域能源网络扩建的可能性和商业案例。

如果由单一实体拥有供应网络（这是常态），为减轻垄断倾向，输配网络运营的治理是需要考虑的主要方面。基础设施垄断很常见，而且通常治理得很成功。例如电网、燃气网、供水和高速公路。关键是治理时要考虑的是共同利益，而非利润最大化。

生产装置的所有权

对于存在多个生产商的大型网络，在能让整个系统以最高效率运行的某些条件下可以确保竞争，但在只有一个生产商的小型网络中，这难以实现。因此，DHC 的生产通常也是垄断性的，在大多数市场上将面临单个供应源（例如热泵或 / 和单台锅炉）的竞争。在配有低温能源的 DHC 网络中，这种情况可能会有所不同。随着新的地热资源、热泵、太阳热能和余热的引入，可能会有更多生产商加入 DHC 网络，从而改变供应垄断的局面。

⁸ IRR 的计算旨在评估潜在投资的收益率。可以将其与最低预期回报率或折现率进行比较，且必须至少与加权平均资本成本持平——表明投资有可能会获利。

图 33：区域能源网络：连接供应装置与消费者的重要基础设施



合适的所有权类型

所有权模式会显著影响项目的实施，特别是消费者的购买动机。在启动、开发和融资方面，公有和私有 DHC 项目的动机通常存在本质区别。例如，与私有项目相比，公有 DHC 项目更可能追求更低的供热价格以及环境和社会经济效益，而私有项目则主要关注公司利润最大化。消费者所有的 DHC 项目通常谋求最低的供热价格。

如果可以确保利益一致，垄断结构并不一定会给公有制或消费者所有制造成问题。公有制或消费者所有制应该关注以尽可能经济的方式供热。为利润而提高供热价格不过是将利润返还给热能消费者（如果结合实际成本价格规范）。

对于公有制，利润可能会用于其他公共领域，例如学校、交通或医疗。可以说，热能消费者其实是通过支付供热费来补贴其他公共区域。这终究是一个政治问题，如果采取这一做法，若因其他公共支出而导致价格上涨，则可能引发对区域供热系统的负面看法。

无论选择哪种模式和类型，都必须确保资金、定价和融资透明。为培养并维持公众对垄断基础设施的信任，必须公开资金的使用方式。依据不同参数对公用事业企业进行比较的国家价格统计数据也很有帮助，因为这让消费者能够查看其公用事业企业相对于其他公用事业企业的定价。

私有企业管理价格的主要目标通常是利润最大化。这与关注最低价格的消费者存在冲突，这是一个典型的垄断问题。可以通过价格监管来控制公有开发商在其他公共区域的支出问题和私有开发商的利润最大化目标。

公有制

- **优势：**其利益通常与当地居民一致，但也可能关注其他方面，例如能源匮乏、脱碳或空气清洁。公有制的潜在优势是，公共利益与投资规划决策更容易保持一致。私有企业谋求利润最大化，而公有企业则可根据公共利益做出决策。
- **挑战：**地方政府可能存在谋求利润最大化的动机，因为供热收入可用于其他公共开支，例如教育、医疗或修路。还可能存在信任问题——人们认为当地政府没有能力管理区域供热项目。如果政府信任度低或政府机构效率低下，公有制显然会受阻。在任何公有制公用事业企业中，透明度、民主治理和问责制都是 DHC 有效运营的关键因素。

消费者所有制

- **优势：**由于消费者即所有者，二者利益一致，因此销售时没有理由考虑利润，毕竟利润也是直接返还给消费者本人。
- **挑战：**很难吸引足够多的本地消费者参与其中。消费者所有的区域供热系统也需要专业知识，才能确保系统的最佳运营与发展。

私有制

- **优势：**如果能确保充分竞争，私有企业将有动力追求系统的最佳运营、发展和投资。私有企业通常可以获得私有制或消费者所有制无法获得的资金。但这也与监管制度有关，有些国家/地区（例如丹麦）的公有制公用事业企业可以获得公共担保贷款。

- **挑战：**区域供热系统中难以确保充分竞争和类市场结构。因此，很可能必须有消费者保护法规来管控私有企业。但政府当局可能没法获得私有企业保管的运营信息，定价制度可能也难以监督实施。

PPPs

- **优势：**公共部门可以承担私人部门可能不愿意承担的风险，而私人部门能促进开发创新。这种项目还能吸引私人部门可能无法获得的资金来源，例如补助和优惠贷款。
- **挑战：**复杂的资金、定价、融资和治理协议可能导致人们不信任这种所有权结构。

文本框 12 列举了一些案例，分别介绍了不同的所有权类型。

文本框 12 所有权模式示例

- 在丹麦奥尔堡，区域供热设施属于市政府，市政府还拥有供热网络并负责输送热能。市政府下属的公用事业企业从一家私有能源公司购买了主要的产热设备，并已开始实施 2050 绿色能源战略。其中期目标是到 2028 年实现无化石燃料产热，实际上就是要替代燃煤热电联产机组。
- 德国汉堡决定收回对之前卖给私人能源公司的区域供热系统的控制权。作为一个市政问题，当地政府获得了公众支持，开始与私人供应商讨论，并最终买回了能源生产工厂和输配网络。这样做的主要原因是，该市要实现供热部门脱碳，为德国能量过渡计划 (Energiewende) 做出贡献。自 2019 年 9 月以来，新成立的市政企业一直负责区域供热系统，在市内供热部门控股近 80%。过渡目标包括替代煤炭，引入余热和可再生热源。
- 在有趣的消费者所有制案例中，丹麦维堡脱颖而出。该市的一家消费者所有的供热输配商积极使用新的节能技术为客户供热，逐步转向低温区域供热。其理由是，合并供热生产与输配将投资分布式可再生热源成为可能，否则将与单独实体的利益发生冲突。该公用事业企业说服了市议会出售其在市政府所有的热电联产 (CHP) DHC 工厂中的股份。
- 伦达瓦（斯洛文尼亚）的 DHC 系统由私营企业 (Petrol) 管理，该公司拥有其网络（管道）和地热能生产装置（地热生产井、回注井）以及应对峰值负荷的锅炉。该区域供热系统的管理模式是 PPP（签订了一份特许经营合同）。至于价格，斯洛文尼亚能源局制定了区域供热价格规范。该规范根据区域供热定价方法法案制定，为供热的起步价以及因合理成本的变动引起的价格变化确定了标准和依据。

B.6.2 DHC 供应的定价

大多数区域能源供应系统都需要某种形式的价格监管，以保护消费者免受垄断局面的影响。定价必须反映所获得的效用，定价结构和价格水平必须透明。如果定价不透明，缺乏信任，消费者将对区域能源供应失去信心，区域能源供应便会经营不善，并可能陷入连接中断、价格上涨和不满意的恶性循环。

消费者支付的价格中应包含与供热和 / 或供冷有关的所有必要成本。因此，供热费应包括固定成本和可变成本。

固定成本：

- 生产设施投资
- DHC 网络投资
- 融资成本
- 设备折旧
- 行政成本

可变成本：

- 生产设施运维成本
- DHC 网络运维成本
- 燃料成本

生产设施效率、网络热量损失、燃料和电力价格、税金、融资支持和拨款均会影响供热成本。通常，成本结构中占比最大的是含税燃料费。因此，除产能或固定成本外，定价依据还应包括消费水平。为提高能源效率，满足能源需求，消费者应按能源用量付费（按消费计费），而不只是按固定费率（Djörup 等人，2020 年）。例如，欧盟《能源效率指令》（第 9-11 条）（欧洲议会，2018b）的一项核心要素是，在经济上有条件的地方推广能量计。

一般主要有三种价格监管模式：实际成本、价格上限和无价格监管（Djörup 等人，2019a）。

“定价机制必须确保透明，以赢得客户信任，”

实际成本定价

例如，丹麦的区域供热部门便采用了该定价法。规定只有生产和供热输配相关的成本可以计入供热价格中。这包括资产折旧和融资成本，以确保区域供热公司能够在短期及长期内存续和发展。

- **优势：**如果保持低价符合其利益，此定价模式则非常有效。此做法可以阻止政府当局将区域能源供应所得利润用于其他公共领域。
- **挑战：**此模式无法控制支出增长（例如运维）、折旧时间增加或薪资增长。这些方面可以实行利润最大化。实际成本定价的成功取决于能公平获取价格定价信息，如果公共监管机构无法获得定价结构相关的所有必要信息，则可能出现問題。

价格上限

荷兰的区域供热系统利用的是价格上限原则。其规定了允许的最高供热价格，通常以供热类型中的另一基准为参照。在荷兰，价格上限是根据天然气供热的成本设定的。规定区域供热价格不得超过基准供热的成本。价格上限的另一种形式是允许所有者获得一定比例的收益。

- **优势：**这种模式非常简单，可确保价格保持在政府设定值以下。还可以提高 DHC 公司的成本效率，因为投资或支出若会使供热价格提高到限值以上，这部分投资或支出将无法收回。
- **挑战：**此模式相当僵化，通常没有空间考虑当地条件，也没有考虑国际天然气价格的影响，以及项目资本支出和运营支出的成本较高时，价格下跌对供热成本有何负面影响。这可以通过制定具体法规来管理。此模式还涉及一个问题——可行的基准价格是多少。在全球市场，天然气是一个有用的基准吗？有没有一种机制可以纳入碳价？价格可以设定为单台可再生供热装置或热泵的成本吗？其也包括鼓励将 DHC 价格设为略低于基准价格以实现收益最大化的激励措施。价格上限定价法有赖于公平获取定价方式的相关信息，如果企业比政府当局了解的信息更多，则可能出现問題。

无价格监管

无价格监管的模式通常与没有强制连接的法规有关。因此，如果客户在一个 DHC 网络中支付的费用较高，则可自由选择其他供应方案，包括独立系统。DHC 公司必须说服消费者相信其产品物美价廉，客户才会接入。瑞典哥德堡就是这种情况。

- **优势：**这种方法很简单，不需要详细的法规，如果有适当的（竞争）机制，则可能定出有效的价格。
- **挑战：**此模式未充分考虑开发商或与 DHC 系统连接的客户的沉没成本。供热系统转换通常并非易事，而且需要经过很长时间才能获利。这也给 DHC 公司带来了巨大的风险，因为他们不能确切知晓自己的市场规模。这还存在无法有效处理 DHC 系统垄断局面的风险。

在没有区域能源供应系统利用传统的国家 / 地区，确定供热价格和供热采购协议可能极具挑战性。至关重要的是，这些价格和费用的设定必须透明，让消费者清楚其支付的所有费用。这包括详细说明成本、投资、运维、薪资等成本以及利润。拥有独立的基准价格管理机构也很重要，该机构会比较各公用事业企业的价格，指出或处罚价格过高或价格不合规行为。

确定价格监管的核心问题是有能力强制执行价格和获取信息。实际成本原则受生产、融资和运维成本等信息不对称的限制，独立的价格监管机构可能难以正确评估价格。因此，同时考虑所有权问题和价格监管非常重要。此外，获取价格统计信息也非常重要，因为这样才能对各公用事业企业进行比较。

最后，DHC 供应的定价还与当地条件、法规和惯例有关。政策制定者应选择能够反映生产和产能成本、有竞争力的价格机制，并保持透明度，为区域供应方案确立信心，这些通常也很重要。

B.6.3 监管

DHC 监管

DHC 法规与监管是一个很大的话题，本报告无法全面述及。此处仅简单介绍各种方法。

广而言之，区域供热（和供冷）治理存在三种类型（Werner，2004 年）：

- 具体的区域供热（和 / 或供冷）法规
- 没有具体的区域供热法规，但有一些财政杠杆
- 既没有具体的区域供热法规，也没有财政杠杆

一些区域供热历史悠久的国家（例如波兰、匈牙利或爱沙尼亚）已经制定了具体的区域供热法规（Werner，2004 年）。其他国家 / 地区通过一般供热（和 / 或供冷）法规或其他法规（例如能源效率、能源供应或环境法规）来监管区域供热（和 / 或供冷）部门。还有些国家 / 地区则完全没有供热监管。

监管应确保公平的竞争环境，保持长期稳定，确保系统设计和能源供应成本最低，并管理环境效益和危害。公平的竞争环境应处理不同供应类型的能源价格扭曲，例如居民天然气价格补贴。如前文所述，DHC 网络与电力、天然气或供水网络一样，应视为基础设施。

在有些国家 / 地区，申请要求非常复杂，评估和审批流程（包括现有系统改造）非常冗长。这给投资者增加了不确定性，可能推高成本。因此，国家和地方各级政策制定者应确保审批程序精简快捷。

政策制定者还可以考虑如何通过监管来提高透明度，鼓励向消费者提供正确的信息。例如，欧盟《可再生能源指令》修订版（指令 2018/2001/EU 第 24.1 条）要求欧盟的国家当局确保向最终能源消费者说明为其服务的 DHC 系统的效率和可再生能源比例等信息。这些信息应可轻松获取，例如展示在能源账单或供应商的网站上，或应要求提供。这项措施可以激励其他政策制定者（除欧盟外）帮助消费者增进对于可再生能源部署和能效提高的了解。

此外，监管应确保市场设计支持成本最低、具有社会经济性的能源系统设计。这项任务非常艰巨，必须不断重新审视。但是，市场设计在制定前几节所述的技术方案时，应推广大家认为具有社会可行性的技术。最后，监管和市场设计应管理和应对主要的外部因素。政策制定者必须制定能够反映重要社会目标（例如清洁空气、脱碳或能源获取）的市场设计。

地热能监管

在大多数国家 / 地区，供热（供冷）及供电用途的地热资源开发由采矿法、水法、环境保护法、地质法、可再生资源法或土地使用法进行监管。有些国家 / 地区也单独出台了地热法（Rupprecht 等人，2017 年）。

地热监管的一个关键要素是地热能的定义。在欧盟（指令 2009/28/EC 第 2 条），地热能的定义是“地表以下以热力形式存储的能量”。但在成员国一级，并没有标准的法律定义，因为不同主管部门有不同的定义方式。

有大多数地区，地热资源的所有权归国家或地方政府所有。

政府为监管地热能开发活动，最常颁发的地热许可证包括勘探许可证、开采许可证、钻探许可证和发电许可证。地热能监管包括获取地热能的权利、使用地热水（抽取和回注）的权利与义务、钻井和环境保护。

出于监管目的，地热资源有不同的分类方式，以确保适当的监管水平。分类方式考虑了地热能的以下方面：

- 地热水的热力学性质（温度、压力等）
- 钻取深度
- 最终用途（发电、供热和 / 或供冷）
- 供热厂和 / 或发电厂的装机容量

为促进从燃料向地热能的转变，规范地热（或矿物质或水）资源开采许可的法律法规起着关键作用。但是，这些有时被认为太薄弱或太复杂繁重，无法吸引投资。

许多国家 / 地区缺乏专门针对供热（和 / 或供冷）的地热利用政策，例如路线图或专门的许可规则。第一步是明确地热资源的定义和分类。

在这方面，意大利是一个很好的例子，他们区分了三类地热能系统——高温系统 (>150°C)、中温系统 (150-90°C) 和低温系统 (<90°C)。此外，所有容量低于 2 MWt、井深不超过 400m 的地热热泵系统均被视为“水资源”，不需要勘探和生产许可证（Angelino 等人，2016 年）。

这样分类是确保小型项目和浅井（例如深度不超过 400 m）受益于精简审批程序（相对于开采高焓资源的大型项目）的前提条件。

制定专门的精简版地热许可制度可以吸引更多的项目投资和开发。在此背景下，欧盟资助的 GeoDH 项目提出了一个理想的地热区域供热监管框架，可根据具体条件进行调整（见文本框 13）。

文本框 13

地热区域供热监管框架： GeoDH 项目的重要建议

- 国家和地方法规必须规定地热能资源和相关术语的定义。
- 应保证所有权。
- 地热许可行政程序必须与目的相符——应尽可能精简，申请人的负担应反映拟议地热能开发项目的复杂性、成本和潜在影响。
- 审批和许可程序相关规则必须合理精简，并适时移交地区（或地方）一级管理。
- 必须减化行政程序。
- 区域供热规则应尽可能分散化，以适应当地条件，并规定可再生资源的强制最低能量水平。
- 应设立唯一的地热许可机构。
- 适用于地热区域供热系统的地热资源信息应予以公开，且易于获取。
- 地热区域供热应纳入国家、地区和地方的能源规划与战略中。
- 应让政策制定者和公务员充分了解地热能。
- 应对技术人员和能源服务公司 (ESCO) 进行地热技术培训。
- 应向公众提供并征求有关地热区域供热项目开发的信息，以获得公众认可。
- 法规应旨在保护环境，并确定地下使用的优先顺序。

<http://geodh.eu/wp-content/uploads/2012/07/D-3.5-GEODH-Regulatory-Framework-17-02-2014.pdf>

来源：GeoDH（2014 年）

太阳热能监管

太阳能集热器的安装通常需要获得地方当局的许可。对于屋顶太阳能集热器，屋顶可能禁止安装（特别是老建筑和历史街区的屋顶）。通常需要审批的只是建筑使用许可证书（Sørensen 等人，2012 年）。

对于地面太阳能发电厂，由于景观特殊性以及有关视觉影响和视觉保护的限制性法律，视觉影响可能会是一个敏感问题。一种政策措施是，在地区一级对开发太阳能区域供热项目所需的审批程序进行标准化。当然，能否取得这一重大成果取决于地区与其市政当局的政治意愿、承诺和能力。通常，级别较低的政府颁布的法规不能违反国家有关视觉和景观保护的法律法规（Trier，2018 年）。

可以使用各种策略来避免或最大程度减少太阳能系统对土地的影响。例如利用退化土地、太阳能系统与农业土地的并用（Fritsche 等人，2017 年）。

太阳能区域供热系统工厂必须获得环境许可证，因为这些工厂通常含有乙二醇。必须确定国家当局拥有否决权的特殊条件，例如饮用水利益。如果系统需要长期储能（例如蓄热坑或钻孔），则还需要获得特别许可，以确保饮用水安全（Sørensen 等人，2012 年）。

余热监管

没有法规限制将余热整合到 DHC 网络中。但是，世界各地 DHC 的市场状况各不相同，因此根据当地情况提出了不同的政策建议。

例如，欧盟颁布法律激励成员国加快供热供冷部门的脱碳进程，并认识到余热的作用。但是，新的《可再生能源指令》（欧洲议会，2018a）规定，热源（例如隧道和地铁、电转气过程产生的余热）不能计入国家的可再生能源目标，否则可能导致处理不平衡。

此外，在余热的定义中，“不可避免”这一术语很难定义，因为它可能涉及经济或技术可行性。《建筑能源性能指令》（欧洲议会，2010）预测了新建和改造建筑的首要能量因数的最低要求。但各成员国设定了这个因数，有时对余热不利。

投资回收期较长，导致经济和融资困难。这是因为投资成本可能会增加，而且供热销售的收益较低，特别是夏季。缺乏对未来余热供应的长期保证，因而存在投资搁浅的风险。此外，工业企业的最长摊销期限为 2 到 3 年，而 DHC 公司定位于长期，通常可以接受长达 20 年的摊销期限。对于余热价值的看法也存在分歧，私营企业倾向于追求利润最大化。为确保余热源的长期供应，建议签订长期合同。供热招标也可能是确保在所有情况下都始终向网络供热的方法。

建筑监管

在许多国家 / 地区，建筑和能源效率监管包含在供热供冷监管里。通常，此类监管关注的是单幢建筑及其能耗，而非该建筑在更大能源系统中的作用；绿色建筑认证也是如此，例如能源与环境设计领导力（LEED）或建筑研究所环境评估法（BREEAM）。

为确保建筑监管也能促进区域能源供应，国家和地方各级政策制定者和监管机构必须站在能源系统的视角，不能仅仅关注一幢建筑。A 部分第 1.2 节介绍了智能能源系统的观点，B 部分第 3.3 节介绍了从系统角度评估能源效率的方法。

一个核心要素是，建筑最低节能绩效的相关法规和标准评估的是最终能源还是一次能源。在建筑层面评估的最终能耗并未考虑能源系统层面的效率提升。使用一次能源（作为评估）还考虑了生产装置等方面的效率提升（如果 DHC 生产装置提高了能源系统效率）。

此外，决策者可以确保最低节能绩效要求和节能证书不仅能稳定现场可再生能源的价格，而且还考虑了场外生产的和由 DHC 提供的可再生供热供冷的积极影响。节能证书还应能够稳定接入由可持续能源供热的 DHC 的建筑价值，应明确标明。

对于建筑本身，法规应要求建筑设备设计为低温运行，不论该地区目前是否存在区域能源系统。这将简化建筑与区域能源网络之间的内在连接。

此外，在 DHC 赢得了充分信任的成熟市场中，可能会强制要求连接义务。例如在意大利，新建建筑需要预留区域供热接入方式，如果建筑方圆 1 km 以内有区域供热系统，则必须与其连接（经济发展部，2015；Costanzo 等人，2018）。

B.6.4 融资

基于可再生能源的新型区域能源系统、改造现有系统和将燃料替换为低温可再生能源

DHC 网络及一些可再生能源供热项目的建设和改造的前期资本成本非常高昂。尽管 DHC 网络最终应该自己支付这些成本，但要收回最初的支出（例如设计和建设成本）并实现些许利润可能要十年甚至更长时间。因此，这类项目非常适合寻求相对安全的长期收益来源、不求快速获得投资回报的投资者。

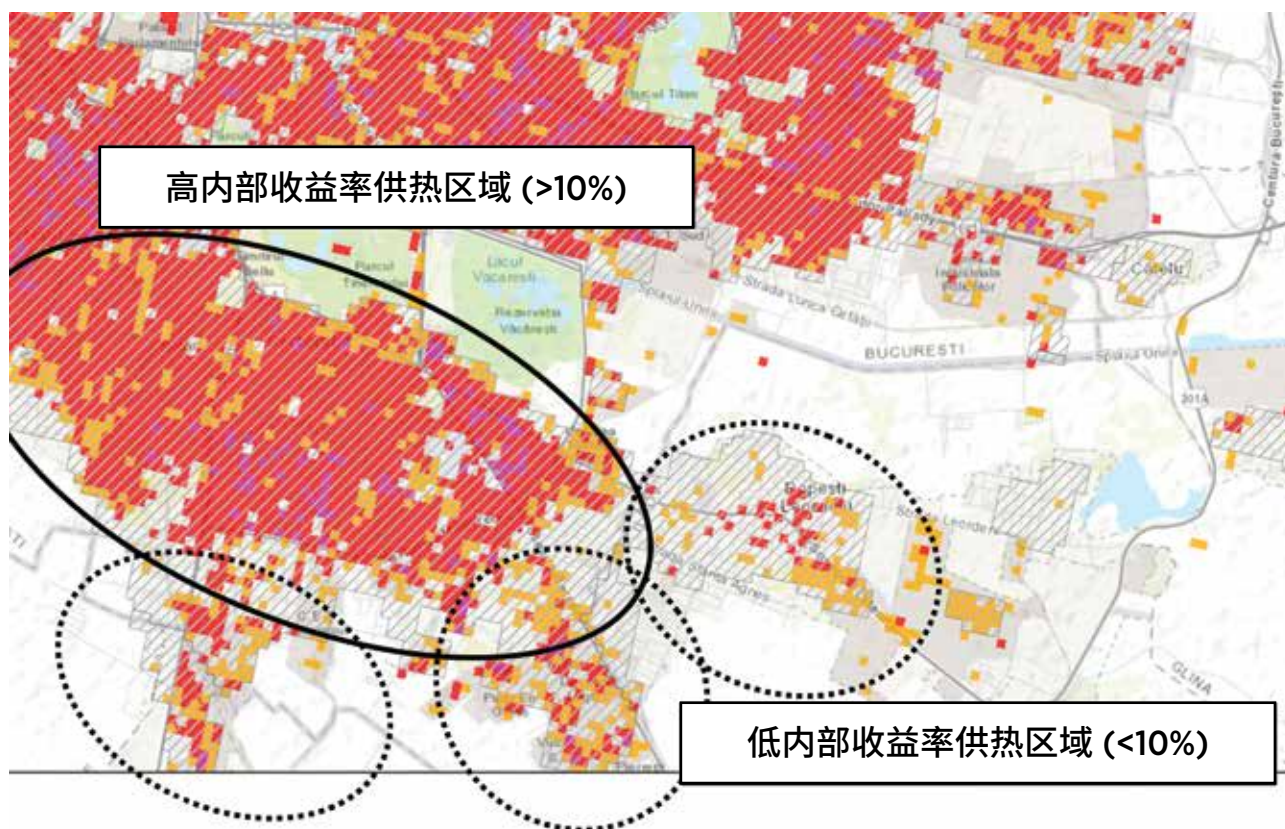
“区域能源项目非常适合寻求相对安全的长期收益来源、不求快速获得投资回报的投资者。”

DHC 系统投资的一个主要问题可能是关于供热需求、可再生或余热资源的潜力、潜在客户或连接率的不确定性。区域供热网络的投资期限较长，必须确保长期稳定性。这可通过特许经营合同、区域划分和强制连接或与公共用户及高需求量客户连接等方式来实现。

新开发项目风险管理可以从已知的高需求量客户入手，例如医院、工业行业、游泳池或已知供热需求密度高且稳定的其他区域。如果有高消费量客户同意签订长期合同，则可提高投资的确定性。这一策略也可称为“低果先摘”。

这些策略的优势是，从高价值区域入手，先铺设管道。有了这些客户，新的区域供热企业将能够掌握更多相关信息，然后扩大其覆盖范围。相较于 IRR 较低的案例，IRR 较高的案例通常有更多的学习空间。因此，从最有利可图的区域开始新的开发可能是新建系统的重要方式。

图 34：高 IRR 和低 IRR 下的区域供热开发示例



注：区域仅为示例，并不代表实际情况。DH：区域供热。

来源：AAU，基于 PETA 4 数据（未注明日期）

从利润最高的区域入手存在一个问题：开发商可能将利润较低的区域排除在外，永不接入该区域供热网络。相关区域示例如图 34 所示。图中标出了一个热量需求高的区域和三个热量需求低的已连接区域。根据 PETA 4 地图，所有四个区域均为潜在供应区，可以提供区域供热（弗伦斯堡大学、哈姆斯塔德大学和奥尔堡大学，2018）。如果首先开发了高需求区域而没有义务开发其他三个区域，则在利润最高的区域实施区域供热后，可能会放弃这些无利可图的区域。

DHC 规划者和决策者在规划新区域、开展新招标、实施新的 DHC 区域划分等工作时应考虑这一难题。他们应该确保，不仅着眼于具有商业经济效益的区域，具有社会效益的区域（见第 B.3.4 节“制定供热方案”）也应开发 DHC 供应方案。

一般认为，地热等低温资源的开发也有财务风险，特别是在开发初期地下相关信息有限时。地热开发早期涉及的地质风险包括由于渗透率低或无渗透而导致钻井失败。

确认钻井成功之前，地热项目可能面临融资困难。此外，开发地热区域供热系统所需的前期投资通常比其他能源要高得多。因为钻井阶段通常需要大量资本。此外，地热项目开发的准备期更长。

区域供热的传统资金来源是市政资源，以拨款和优惠贷款的形式提供支持。拨款和优惠贷款通常来自国际、国家或各省级资金，或市级项目（Leoni、Geyer 和 Schmidt，2020 年）。

政府采取行动在 DHC 系统中提高可再生能源的吸引力是合乎情理的。经济金融工具可能包括直接投资（政府采购、拨款），例如中国济南市获得的投资（见文本框 14）；财政或金融优惠政策（上网价、减税或免税）；或市场工具（绿色或白色证书、绿色债券）。

此外，开发银行的项目也有助于融资（以及可行性分析）。例如欧洲复兴开发银行的西巴尔干可再生区域能源 (ReDEWeB) 计划基金（欧洲复兴开发银行；未注明日期），其旨在促进西巴尔干可再生区域能源投资（见文本框 15）。

文本框 14 中国济南



自 20 世纪 80 年代以来，区域供热一直是济南政府为确保居民供热充足而采用的主要技术。但政策和国家投资一直都旨在通过扩大基于燃煤生产的系统网络、增加产能来满足不断增长的供热需求。

直到 2015 年，区域供热政策才进入一个新阶段，以加速从燃煤锅炉转向超低排放为目标。此后不久，监管框架变得更加具体全面，规定了使用“清洁取暖”替代燃煤供热的各项措施。融资也相应增长。

近年来，中国整体高度重视清洁供热并出台了一系列促进、支持和实施清洁取暖的政策。济南作为“冬季清洁取暖”的国家试点城市之一，已获得中央政府每年 1 亿美元（3 年共 3 亿美元）的专项资金支持。

在国家清洁取暖政策的推动下，济南制定了相关计划，即到 2020 年建成无污染的供热系统。除拆除或更换燃煤锅炉外，该计划还包括使用长距离余热和地热等替代热源，以及在建筑群中使用智能电表、实施节能措施来进行需求侧管理。

该案例表明，国家的能源政策和拨款会对地方的可再生区域能源项目产生影响。



中国山东省省会济南市。

文本框 15

欧洲复兴开发银行的西巴尔干 可再生区域能源计划

欧洲复兴开发银行推出了 ReDEWeB 计划，以支持在西巴尔干地区开发基于可再生能源的区域能源市场。该计划的受益国家包括阿尔巴尼亚、波斯尼亚和黑塞哥维那、* 科索沃、北马其顿、黑山和塞尔维亚。

该计划聚焦在西巴尔干地区的特定当地环境中开发可持续的城市能源系统，具体如下：

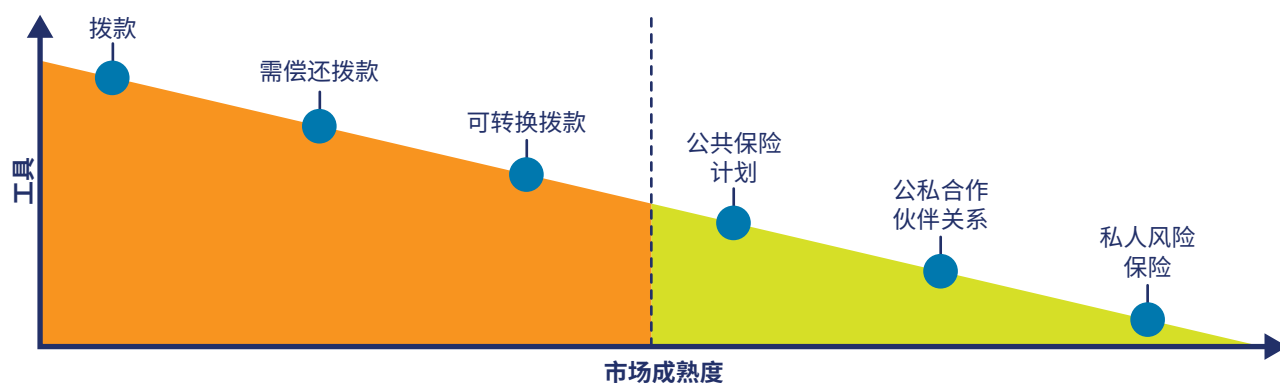
- 支持西巴尔干国家制定行动计划，建设基于可再生能源的 DHC，履行其可再生能源与能效合同义务
- 支持制定城市政策措施，鼓励生产、储存并在区域能源系统中利用可再生能源

* 科索沃这一称呼并不影响地位立场和联合国安全理事会第 1244 (1999) 号决议。

- 支持市政当局和私营部门编制区域能源投资建议、可行性和初步设计
- 组织交流活动，促进分享区域能源系统开发与运营方面的经验和最佳实践
- 为西巴尔干地区符合条件的区域能源项目融资或共同融资 (Lukic, 2018 年)

通过 ReDEWeB 计划，欧洲复兴开发银行为区域能源项目提供了以下金融支持：向各国政府提供主权担保贷款、向地方政府提供市政当局担保的市政或公用事业贷款、向公用企业提供的准法人公用事业贷款，以及向 PPP 或私营部门提供的贷款。

图 35：风险缓解方案与地热市场成熟度的关系



来源：Seyidov 和 Weimann (2020 年)

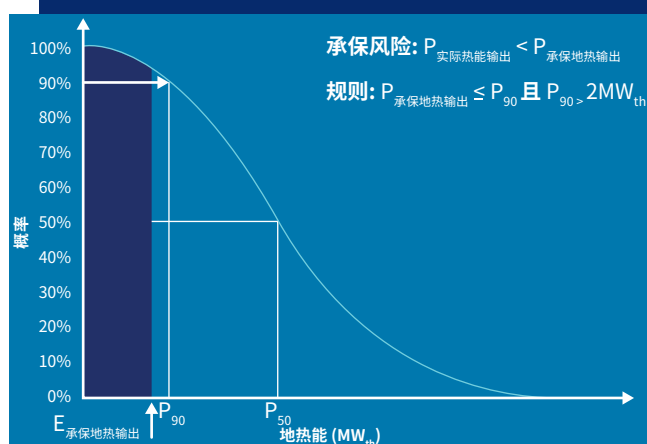
私营部门也可以为区域能源项目提供所需资金。但是，法律和监管框架的设计除透明和可预测外，还应允许私营部门参与。此外，供热价格的结构应让投资者可以覆盖所有运营成本，获得一定利润，激励他们提高供热效率。最后，上网价和财政刺激（例如免税、供热区域划分和优先入网）等政策措施可能会鼓励私营部门投资 DHC (IFC, 2014 年)。

具体而言，在地热能方面，公共支持和公私合营的钻井产能计划促进了地热供热在法国和荷兰等国家显著增长（见文本框 16）。如欧盟资助的 GeoRisk 项目所示，旨在降低地热项目风险的支持机制的类型可能取决于所在国家 / 地区的市场成熟度，如图 35 所示。

对于不成熟的市场，首选机制可能是基于项目的机制，例如拨款和可转换拨款。因为如果没有公共部门的干预，特别是以降低项目风险为目的的干预，可能很难吸引私人资本。拥有更多项目组合的较发达市场可以采用公共保险方案、公私方案和私人风险保险（Seyidov 和 Weimann，2020 年）。

“选择哪些降低地热项目风险的支持机制取决于市场成熟度，

文本框 16



来源：（Boissavy，2019 年）

荷兰

基于保险的地热风险缓解计划为所钻地热井的实际产能低于预期的开发商提供赔偿，为地热项目的地质风险提供了保障。根据该计划，如果钻井的实际地热功率输出低于预期的概率达到 90%（P90）时，被保险人将获得赔偿，如上图所示。

对于合格的项目，开发商应向该计划支付总钻井成本的 7% 作为保险费。万一项目彻底失败，开

地热风险缓解计划

发商将获得总成本的 85% 作为赔偿，浅层地热项目不超过 1,105 万欧元（1,326 万美元），深层地热项目不超过 1,870 万欧元。

自 2009 年该计划启动以来，已成功实施了 11 个项目（截至 2020 年 5 月），其中有四个项目获得了赔偿。迄今为止，该计划完成了九轮申请，累计拨款 1.46 亿欧元（Ramsak，2020 年）。

法国

2009 年，20 世纪 80 年代推出的风险缓解计划结束之后，法国成立了可再生供热基金。供热基金由两部分组成。一部分是短期基金，用于保障地质风险，对钻井失败的开发商进行赔偿。另一部分是长期基金，用于保障地热系统维修（例如在其他位置重新钻探注入井），以确保持续运营。该基金将保障在巴黎 Dogger Aquifer 以及阿尔萨斯、隆河走廊、地中海地区和阿基坦盆地等地区开发的项目。

自可再生供热基金成立以来，已开发了十个新项目（截至 2019 年）。此外，20 世纪 80 年代开发的地热项目也将有资格通过该基金进行进一步钻探，延长其使用寿命（Boissavy，2019 年）。

另一种融资方案可以加拿大为例。加拿大的许多地区都为蕴藏着低温地热资源的沉积盆地，但他们没有利用地热发电，也没有采取常规的直接利用深层地热。加拿大国家政府正在投资多个地热项目（常规、联产和非常规项目），资金达 7,500 万美元，以证明地热开发可以帮助加拿大减少碳排放，减少对碳氢化合物和煤炭的依赖（Hickson 等人，2020a）。

项目层面已经出现了为开发和扩建区域能源系统融资的创新方法。

例如，区域能源公司可以与能源服务公司 (ESCO) 合作，直接为消费者提供节能项目 (Leoni、Geyer 和 Schmidt, 2020 年)。例如塞尔维亚沙巴茨市的区域供热运营商 Toplana-Šabac (Jovanovi, 2019 年)。此类计划通常包括对房屋或建筑进行能源审查，向客户提供融资并通过公用事业账单进行偿还。投资回收期结束后，客户的能源费用减少，让公用事业企业可以留住客户。此外，随着效率大幅提升，追求可持续能源供应的方案（例如基于可再生能源或余热的 DHC）可以更具成本效益的方式满足高能源需求。这意味着有机会扩建区域能源网络，而无需增加供热装机容量，只需替换为低温能源。

通过建筑侧措施优化 DHC 系统的创新商业模式的提议构想旨在共同解决降低供应温度的关键经济、社会、技术和监管障碍 (Leoni、Geyer 和 Schmidt, 2020 年)。这些解决方案关注以下三点：

- 吸引客户参与，在建筑层面提高运营效率。这可以通过改进关系与沟通、添加新的资费结构以及提供个性化促销服务来实现。
- 为优化措施和故障检测提供资金。这可以通过战略伙伴关系和众筹平台来实现。

- 签订节能合同。这对解决与租赁房屋分散激励相关的问题至关重要。建筑节能可降低住户的能源费用。但是，如果居住人是租户，若建筑业主没有任何收益，他 / 她可能不愿意投资改善能源性能，因而便有“分散激励”的情况。

此外，在融资方面，与利益相关方的战略伙伴关系可能会因较低的运行温度而获得经济效益。根据 Leoni、Geyer 和 Schmidt (2020 年) 的研究，利益相关方包括：

- 可以向 DHC 系统提供低温能源（例如余热）的工业和商业活动，例如数据中心。
- 适用于以较低回流温度运行的 DHC（例如太阳能热系统和热泵）技术所有者。
- 在 DHC 系统中提供运营支持的信息和通信系统所有者。
- 支持建筑低温供热技术和设备的所有者。
- 根据需要提供优惠券供 DHC 公用企业购买并奖励“优质”客户的业务计划 (Leoni、Geyer 和 Schmidt, 2020 年)。

这些利益相关方可以提供资金实施 DHC 降温。此类投资的回报方式很多：为余热投资者出售余热，为技术开发商和供应商向公用事业企业或客户提供技术；以及为提供优惠券的商业计划投资者提供优惠券。其他可能的合作可能涉及合资。

DHC 项目通常吸引的是那些不只为获得最大回报，还要推动拥有道德、社会和环境目标的活动的投资者。关于这一点，区域能源融资的一种潜在可行的商业模式是通过众筹平台和退休基金为公民提供与 DHC 企业互动的机会 (Candelise, 2018 年；Leoni、Geyer 和 Schmidt, 2020 年)。

众筹是另一种融资方式，即很多人通过网络平台为项目提供相对少量的资金。除公共补贴外，法国大巴黎地区田野马恩河和努瓦谢勒的地热区域供热项目 GeoMarne 选择该解决方案来进行融资（Richter，2020 年）。项目总投资为 4,000 万欧元，通过这种方式向法兰西岛大区居民筹集了 100 万欧元。

缺乏常规的和专业技术知识（特别是在发展中国家）可能进一步阻碍融资。要提高可再生能源项目的可融资性，必须具备此类专业知识。为应对这一挑战，IRENA 开发了 Project Navigator（IRENA，未注明日期），该在线平台为开发可融资的可再生能源项目（包括区域能源项目）提供了逐步实践指南，如文本框 17 所示。

文本框 17

开发可融资的可再生能源项目： IRENA PROJECT NAVIGATOR



IRENA Project Navigator 指南提供了一些重要信息，帮助项目开发人员为可再生能源项目制定可融资的提议。该指南在典型的项目开发阶段全程指导项目开发人员。其介绍了每个阶段的不同步骤，包括每个开发阶段结束时需要完成的工作。

Project Navigator 介绍了项目开发整个生命周期中的主要阶段，从项目构思到施工、运维和退役，包括各项措施和可交付成果。

Project Navigator 还为每种技术提供了真实的案例研究、行业最佳实践和相关融资工具。此外，该指南还为开发人员提供了一个工作区和一些准备项目、跟踪项目进度和识别差距的工具。可以使用财务模式或检查清单等工具导出结果，以供进一步处理。

<https://navigator.irena.org/index.html>

落实监管条件、融资和商业模式的挑战和建议概述

本节介绍了与 DHC 系统的所有权、定价、融资和监管有关的各种模式和挑战。这些因素密切相关，通常也相互影响。因此，公共或私营开发商或 DHC 公司应同时考虑所有这些因素，以赢得公众对区域能源系统的信任。

这种相互联系表明，全面的 DHC 治理方案应结合使用多种措施。除图 36 所示的方面，还有更多因素会影响遵循治理方案的 DHC 系统的运营和运作，包括对当地情况的了解、对 DHC 的认识与认可、系统运营、工程知识与实践和资源获取。选择的治理方案应确保投资可获利，可为消费者提供有竞争力的价格，并提高定价透明度。

制定全面的区域能源治理方案。

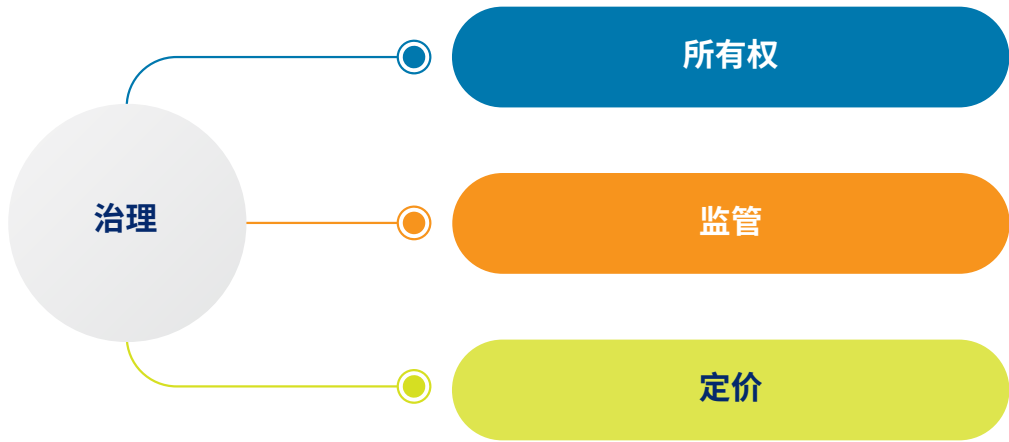
国家和地方政府可以在区域能源部门采取各种治理措施以实现特定的经济和社会目标。

- ➔ 确定并实施治理方案，以确保区域能源系统产生最大的社会效益。该方案可能需要考虑各个方面，例如价格监管、所有权结构和立法等。例如，在丹麦区域供热系统中，实际成本原则促成了与公有或集体所有制相结合的低价供热。

确保公平的竞争环境。

在可再生能源区域能源项目与其他现有供热供冷方案的竞争中，国家和地方当局可发挥关键作用。

图 36：形成区域供热治理方案的因素



- ➡ 将区域能源网络视为公共基础设施。一般建议政府至少对部分基础设施进行投资，因为成功建立区域能源公司及其相关基础设施通常需要大量投资。这确保了项目能够吸引低成本和长期的融资方案，从而帮助降低能源成本。
- ➡ 促进当地供热市场竞争，例如通过招标生产热能。多家热能生产商的价格竞争消除了自然垄断风险，同时能够鼓励创新及提高生产效率，从而生产出更便宜的能源。
- ➡ 国家和地方各级采取不同方法确保公平的竞争环境：供热价格、财政杠杆、简化 DHC 立法、价格监管和监控以及解决外部因素的工具，例如 CO₂ 定价。所有可持续系统开发方案应从整体角度考虑：例如建筑法规相关方面的考虑。
- ➡ 消除监管壁垒以及优化和简化地方和国家各级相关法规，为地热能和太阳热能等可再生能源开发提供有利的环境。这可能需要制定获取、勘探和开发地热资源的相关法规，以及太阳能热项目许可。

克服投资障碍，实现资本密集型转型。

为了支持区域能源运营商，国家和地方当局可通过最大程度减少与能源相关的特定风险以进一步吸引融资。

- ➡ 支持制定保险计划以降低地热能等可再生能源风险，例如为低生产率钻井和 / 或钻井产能下降的投资者提供赔偿。
- ➡ 公共部门提供直接资金或制定技术援助计划。这些资金可用于评估项目的可行性、开发新市场中的区域能源基础设施或评估可再生能源的供应方案。

在项目层面，可采用以下措施吸引融资。

- ➡ 评估易于实现的目标。从需求量大的消费者或公共建筑入手，同时确保充分利用所有能源潜力。该策略确保解决新开发项目在需求方面的不确定性，以便吸引融资。
- ➡ 探索需要合作伙伴关系的创新融资实践。通过与能源服务公司 (ESCO) 或技术供应商建立伙伴关系为建筑节能措施融资，同时可以探索众筹方式以充分利用低成本资金（例如养老金）以获得收益。

检查清单

在 DHC 中整合低温可再生能源

范围界定及利益相关方的确定和参与	技术方案和项目选定的需求和资源规划	应对建筑群、网络和能源资源方面的技术挑战	推动实施监管条件、融资和商业模式
☑ 明确主要驱动因素和目标 ☑ 明确利益相关方，并确定他们的利益 ☑ 制定包括居民在内的利益相关方参与策略 ☑ 实施参与过程	☑ 使用测量数据和 / 或通过空间分析工具建模 / 估算需求，确定供热和供冷需求 ☑ 明确能源并分析其区域能源潜力，同时要考虑利用现有最佳技术开发可用的低温能源 ☑ 平衡节热并重新规划供热量，以免产能过剩 ☑ 结合激励能源战略规划 (SEP) 流程的社会目标，建立具有决策所需的正确详细程度的情景 ☑ 采用迭代方式逐步转向更加具体的项目	☑ 针对已配有区域供热系统的区域，评估现有建筑群和网络的可兼容性 ☑ 如有必要，整合 DHC 现代化改造和建筑改造计划，例如改进控制系统、计量并按消费量计费以及给家庭用户的建议 ☑ 实施 DHW 制备和其他降低系统运行温度的相关辅助措施 ☑ 评估管道尺寸是否过大或现有 DHC 系统是否需要更换管道 ☑ 应对低温能源开发中的技术挑战 ☑ 地热能：评估钻探、结垢和注入风险、温度和流量 ☑ 太阳能：评估土地或屋顶的可用性和储存能力 ☑ 余热：确定温度和流量、随时间变化的可用性、位置及时间不匹配等问题	☑ 选择能够有效处理不同利益相关方利益的所有权模式 ☑ 选择正确的定价监管方案，确保在供热市场上保持极具竞争力的价格 ☑ 通过创新的融资 / 保险计划减轻风险，先处理容易实现的目标 ☑ 考虑外部因素，通过财政杠杆和立法确保公平的竞争环境

参考资料

Aalborg Varme A/S (2020), Årsrapport 2019 (2019 年度报告), Aalborg, Denmark, www.aalborgforsyning.dk/privat/arsrapporter/.

Allansdottir, A., A. Pellizzone and A. Sciuolo (2019), Geothermal Energy and Society, Lecture Notes in Energy, Vol. 67, A. Manzella, A. Allansdottir and A. Pellizzone (eds.), Springer International Publishing, <https://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-78286-7>.

Guan, D. et al. (2012), Background report on EU-27 district heating and cooling potentials, barriers, best practice and measures of promotion (关于欧盟 27 国区域供热供冷潜力、障碍、最佳实践和改进措施的背景报告), <https://setis.ec.europa.eu/system/files/1.DHCpotentials.pdf>.

Angelino, L. et al. (2016), “Regulatory frameworks for geothermal district heating: A review of existing practices” (地热区域供热的监管框架: 现有实践综述), European Geothermal Congress 2016 (2014), pp. 19-24.

Averfalk, H. et al. (2017), Transformation roadmap from high to low temperature district heating systems: Annex XI final report (高温向低温区域供热系统转型的路线图: 附件 11 最终报告).

Averfalk, H. and S. Werner (2020), “Economic benefits of fourth generation district heating” (第四代区域供热的经济效益), Energy, Vol. 193, Elsevier, article 116727, <https://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2019.116727>.

Averfalk, H. and S. Werner (2018), “Novel low temperature heat distribution technology” (新型低温供热输配技术), Energy, Vol. 145, pp. 526-539, <https://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2017.12.157>.

Averfalk, H. and S. Werner (2017), “Essential improvements in future district heating systems” (未来区域供热系统的关键改进), Energy Procedia, Vol. 116, pp. 217-225, <https://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2017.05.069>.

Battisti, R. (2018), “How to identify suitable areas for SDH” (如何为 SDH 确定合适的区域), Solar thermal world.

Belot, C. and J.-M. Juilhard (2006), Rapport d'information fait au nom de la délégation du Sénat à l'aménagement et au développement durable du territoire (1) sur les énergies locales, (代表参议院代表团发表有关法国巴黎的区域规划和可持续发展信息报告). www.vie-publique.fr/rapport/28420-rapport-dinformation-fait-au-nom-de-la-delegation-du-senat-lamenagem.

Bøhm, B. (2013), “Production and distribution of domestic hot water in selected Danish apartment buildings and institutions. Analysis of consumption, energy efficiency and the significance for energy design requirements of buildings” (在选定的丹麦公寓楼和机构中生产和输配生活热水。分析建筑的能耗、能源效率及其对建筑能源设计要求的意义), Energy Conversion and Management, Vol. 67, pp. 152-159, <https://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2012.11.002>.

Boissavy, C. (2019), Report reviewing existing insurance schemes for geothermal (现有地热保险计划审查报告), www.georisk-project.eu/wp-content/uploads/2020/02/D3.1_Report-reviewing-geothermal-risk-mitigation-schemes-v2.pdf.

Brand, M. (2014), Heating and domestic hot water systems in buildings supplied by low-temperature district heating (低温区域供热建筑中的供热和生活热水系统), Technical University of Denmark, Department of Civil Engineering, Lyngby.

British Geological Survey (2020), Geothermal energy, www.bgs.ac.uk/geology-projects/geothermal-energy/ (accessed 12 October 2020).

Brown, K. (2013), Mineral scaling in geothermal power production (地热发电中的矿物质结垢), Report 39, United Nations University Geothermal Training Programme.

Brückner, S. et al. (2014), “Using industrial and commercial waste heat for residential heat supply: A case study from Hamburg, Germany” (将工商业余热用于住宅供热: 以德国汉堡为例), Sustainable Cities and Society, Vol. 13, <https://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2014.04.004>.

- Bühler, F. et al. (2017)**, “Industrial excess heat for district heating in Denmark” (丹麦区域供热中使用的工业余热), *Applied Energy*, Vol. 205, pp. 991-1001, <https://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.032>.
- Calderoni, M. et al. (2019)**, Sustainable district cooling guidelines (可持续区域供冷指南), www.iea-dhc.org/fileadmin/documents/Annex_XII/2020_IEA_DHC_Sustainable_District_Cooling_Guidelines_new_design.pdf.
- Candelise, C. (2018)**, Crowdfunding as a novel financial tool for district heating projects (区域供热项目的新型融资工具——众筹), <https://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.27847.75682>.
- CELSIUS Project (2020a)**, A datacentre supplies local heating in Mäntsälä, Finland (芬兰曼采莱的数据中心为当地供热), <https://celsiuscity.eu/datacentre-supplies-local-heating-in-mantsala-finland/> (accessed 18 August 2020).
- CELSIUS Project (2020b)**, Heat recovery from the London Underground in Islington, United Kingdom (英国伊斯灵顿从伦敦地铁回收热能), <https://celsiuscity.eu/heat-recovery-from-the-london-underground-in-islington-united-kingdom/> (accessed 18 August 2020).
- CELSIUS Project (2019)**, Free cooling from water (利用水自然冷却), <https://celsiuscity.eu/free-cooling-from-water/> (accessed 12 October 2020).
- Cerema (2012)**, Réseau de chaleur très basse température à sources multiples, reseaux-chaleur.cerema.fr/reseau-de-chaleur-tres-basse-temperature-a-sources-multiples (多源超低温区域供热). (accessed 18 August 2020).
- Chambers, J. et al. (2019)**, “Mapping district heating potential under evolving thermal demand scenarios and technologies: A case study for Switzerland” (根据不断变化的热需求场景和技术确定区域供热潜力：针对瑞士的案例研究), *Energy*, Vol. 176, Elsevier, pp. 682-692, <https://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.044>.
- Christiansen, C.H. et al. (2012)**, “Results and experiences from a 2-year study with measurements on a low-temperature DH system for low energy buildings” (一项为期两年的低能耗建筑低温区域供热系统评估研究的结果和经验), in *The 13th International Symposium on District Heating and Cooling*, Copenhagen, pp. 86-93.
- City of Vancouver (n.d.)**, False Creek Neighbourhood Energy Utility (NEU), <https://vancouver.ca/home-property-development/southeast-false-creek-neighbourhood-energy-utility.aspx> (accessed 18 August 2020).
- ižman, J. and J. Bugarova (2019)**, Improving the performance of district heating systems in Central and Eastern Europe: Work Package No. 5, Development of multi-level policy plans (提高中东欧区域供热系统的性能：5号工作包，制定多级政策规划)。
- Connolly, D. et al. (2015)**, Enhanced heating and cooling plans to quantify the impact of increased energy efficiency in EU member states (Heat Roadmap Europe 3) (改进供热供冷规划，以量化欧盟成员国能源效率提升的影响) (欧洲供热路线图 3), <https://vbn.aau.dk/da/publications/heat-roadmap-europe-3-strategy-translating-the-heat-roadmap-europe>.
- Connolly, D. et al. (2013a)**, Heat Roadmap Europe 2: Second pre-study for the EU27 (欧洲供热路线图 2：欧盟 27 国第二次预先研究), Aalborg University, Halmstad University, Ecofys Germany GmbH, PlanEnergi and Euroheat & Power, [https://vbn.aau.dk/da/publications/heat-roadmap-europe-2050\(306a5052-a882-4af9-a5da-87efa36efea\).html](https://vbn.aau.dk/da/publications/heat-roadmap-europe-2050(306a5052-a882-4af9-a5da-87efa36efea).html).
- Connolly, D. et al. (2013b)**, Smart energy systems: Holistic and integrated energy systems for the era of 100% renewable energy (智能能源系统：100% 可再生能源时代的全面集成式能源系统), Sustainable Energy Planning Research Group, Aalborg University, Denmark, https://vbn.aau.dk/files/78422810/Smart_Energy_Systems_Aalborg_University.pdf.
- Connolly, D. et al. (2012)**, Heat Roadmap Europe 1: First pre-study for the EU27 (欧洲供暖路线图：欧盟 27 国第一次预先研究), Aalborg University, Halmstad University and Euroheat & Power, https://vbn.aau.dk/files/77244240/Heat_Roadmap_Europe_Pre_Study_1.pdf.
- Costanzo, E. et al. (2018)**, EPBD implementation in Italy: Status in December 2016 (意大利实施建筑能效指令：2016 年 12 月现状), <https://epbd-ca.eu/wp-content/uploads/2019/06/CA-EPBD-IV-Italy-2018.pdf>.

Dalla Rosa, A. et al. (2014), EA DHC Annex X report: Toward 4th generation district heating: Experience and potential of low-temperature district heating (EA DHC Annex X 报告: 转向第四代区域供热: 低温区域供热的经验和潜力), https://orbit.dtu.dk/files/105525998/IEA_Annex_X_Toward_4th_Generation_District_Heating_Final_Report.pdf.

Danish Energy Agency (2016a), Technology data - Energy plants for electricity and district heating generation (技术数据——用于发电和区域供热的能源工厂) (updated November 2019), Copenhagen.

Danish Energy Agency (2016b), Technology data for energy plants (能源工厂的技术数据) (updated chapters), August 2016, Copenhagen.

Decarb Europe (2020), Grupo Hunosa: District heat from abandoned coal mine (Grupo Hunosa: 利用废弃煤矿进行区域供热), <https://decarbeurope.org/2020/03/25/grupo-hunosa-district-heat-from-abandoned-coal-mine/> (accessed 25 March 2020).

Diget, T. (2019), “Motivation tariff – The key to a low temperature district heating network” (激励价格——低温区域供热网络的关键), Hot & Cool Magazine, pp. 19-22.

Djørup, S. et al. (2020), “District heating tariffs, economic optimisation and local strategies during radical technological change” (重大技术变革期间的区域供热价格、经济优化和本地战略), Energies, Vol. 13, <https://dx.doi.org/10.3390/en13051172>.

Djørup, S.R. et al. (2019a), Definition & experiences of strategic heat planning: Handbook I (战略性供热规划的定义和经验手册: 一), <https://vbn.aau.dk/da/publications/definition-amp-experiences-of-strategic-heat-planning-handbook-i>.

Djørup, S. et al. (2019b), Guidance for the comprehensive assessment of efficient heating and cooling (高效供热供冷的综合评估指南), https://vbn.aau.dk/ws/files/302317295/Handbook_2_Guidance_for_comprehensive_assessment_of_efficient_heating_and_cooling.pdf.

Drake Landing Solar Community (n.d.), Drake Landing Solar Community: The district heating system (德雷克 Landing 太阳能社区: 区域供热系统), www.dlsc.ca/district.htm (accessed 18 August 2020).

Duffie, J.A. and W.A. Beckman (2013), Solar Engineering of Thermal Processes (太阳能热处理工程), Fourth edition, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, <https://dx.doi.org/10.1002/9781118671603>.

Dyrelund, A. et al. (2010), Varmeplan Danmark 2010 (2010 年丹麦供热计划), Ramboll Denmark, Copenhagen.

Elmegaard, B. et al. (2016), “Integration of space heating and hot water supply in low temperature district heating” (在低温区域供热中整合空间供热与热水供应), Energy and Buildings, Vol. 124, pp. 255-264, <https://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.09.003>.

Engie (2020), Event: IRENA, IRENA website, <https://irena.org/events/2020/May/Integration-of-low-temperature-energy-sources-into-existing-district-energy-networks-and-buildings> (accessed 26 May 2020).

Epp, B. (2019), 15 MW SDH plant inaugurated in Latvia (拉脱维亚建成 15 MW 太阳能区域供热厂), www.solarthermalworld.org/news/15-mw-sdh-plant-inaugurated-latvia (accessed 18 August 2020).

European Bank for Reconstruction and Development (2018), Making district heating happen: Empowering users through fair metering (实现区域供热: 通过公平计量为用户提供支持), www.ebrd.com/documents/admin/making-district-heating-happen-empowering-users-through-fair-metering.pdf.

European Bank for Reconstruction and Development (n.d.), Renewable District Energy in the Western Balkans (ReDEWeB) programme (西巴尔干可再生区域能源 (ReDEWeB) 计划), www.ebrd.com/work-with-us/projects/tcpsd/renewable-district-energy-in-the-western-balkans-redeweb-programme.html (accessed 18 August 2020).

European Parliament (2018a), Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources (2018 年 12 月 11 日欧洲议会和理事会关于促进使用可再生能源的 (EU) 2018/2001 指令), European Commission, Brussels.

European Parliament (2018b), Directive (EU) 2018/2002 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 amending Directive 2012/27/EU on energy efficiency (对关于能源效率的 2012/27/EU 指令进行修订的欧洲议会和理事会 2018 年 12 月 11 日的 (EU) 2018/2002 指令), European Commission, Brussels.

European Parliament (2010), Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (2010 年 5 月 19 日欧洲议会和理事会关于建筑能源性能的 2010/31/EU 指令), European Commission, Brussels.

Fjernvarme Fyn A/S (2020), Årsberetning 2019 (2019 年度报告), Odense, Denmark, www.fjernvarmefyn.dk/media/1597/fjernvarme_fyn_aarsberetning_2019.pdf.

Frederiksen, S. and S. Werner (2013), District heating and cooling (区域供热供冷), Studentlitteratur, Lund, Sweden.

Fritzsche, U.R. et al. (2017), Global land outlook working paper: Energy and land use (全球土地展望工作文件: 能源和土地使用), <https://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.24905.44648>.

Gadd, H. and S. Werner (2014), “降低区域换热站的回流温度” (Achieving low return temperatures from district heating substations), Applied Energy, Vol. 136, pp. 59-67, <https://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.022>.

Galindo Fernández, M. et al. (2016), Efficient district heating and cooling markets in the EU: Case studies analysis, replicable key success factors and potential policy implications (欧盟的高效区域供热供冷市场: 案例研究分析, 可复制的关键成功因素和潜在的政策含义), Publications Office of the European Union, Luxembourg, <https://dx.doi.org/10.2760/371045>.

GeoCom (2013), Reinjection to sandstone reservoirs technology showcase (回注砂岩储层技术展示), <https://geothermalcommunities.eu/downloads/14>.

GEODH (2014), Regulatory Framework for Geothermal District Heating in Europe (欧洲地热区域供热监管框架), <http://geodh.eu/wp-content/uploads/2012/07/D-3.5-GEODH-Regulatory-Framework-17-02-2014.pdf>.

GEOENVI (2019), GEOENVI: Tackling the environmental concerns for deploying geothermal energy in Europe (GEOENVI: 解决在欧洲部署地热能面临的环境问题), www.geoenvi.eu/ (accessed 18 August 2018).

Global Alliance for Buildings and Construction, IEA and UNEP (2019), 2019 global status report for buildings and construction: Towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector (2019 年全球建筑与工程现状报告: 迈向零排放、高效有韧性的建筑与工程行业), United Nations Environment Programme, <https://worldgbc.org/news-media/2019-global-status-report-buildings-and-construction>.

Global Alliance for Buildings and Construction, UN Environment and IEA (2018), 2018 global status report: Towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector (2018 年全球现状报告: 迈向零排放、高效和有韧性的建筑与工程行业), pp. 73, www.worldgbc.org/news-media/2018-global-status-report-towards-zero-emission-efficient-and-resilient-buildings-and.

Hansen, K. (2019), “Decision-making based on energy costs: Comparing levelized cost of energy and energy system costs” (基于能源成本的决策: 比较能源平均成本与能源系统成本), Energy Strategy Reviews, Vol. 24 <https://dx.doi.org/10.1016/j.esr.2019.02.003>.

Hassan, H.Z. and A.A.Mohamad (2012), “A review on solar cold production through absorption technology” (关于使用吸收技术进行太阳能制冷的综述), Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 16, <https://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.04.049>.

Heller, A. (2001), Large scale solar heating: Evaluation, modelling and designing (大规模太阳能供热: 评估、建模与设计), S. Svendsen and S. Furbo (eds), PhD thesis for Department of Buildings and Energy, Technical University of Denmark, https://orbit.dtu.dk/files/5300211/R-046_PhD_Thesis.pdf.

Herold, K.E., R. Radermacher and S.A. Klein (2016), Absorption Chillers and Heat Pumps (吸收式制冷机和热泵), CRC Press, <https://dx.doi.org/10.1201/b19625>.

Hickson, C. et al. (2020), “Alberta #1: The Province’s first electrical geothermal project” (阿尔伯塔省 # 1: 该省第一个地热发电项目), in Proceedings World Geothermal Congress 2020.

Hotmaps Project (2020), Hotmaps: The open source mapping and planning tool for heating and cooling (Hotmaps: 开源的供热供冷匹配与规划工具), www.hotmaps-project.eu/ (accessed 18 August 2020).

HUNOSA (2019), “Barredo Colliery” district heating (“Barredo Colliery” 区域供热), www.districtenergyaward.org/wp-content/uploads/2019/09/19GDECA-Desc-DHeating-BarredoColling-Spain.pdf.

IGA and IFC (2014), Best practices guide for geothermal exploration (地热勘探最佳实践指南), www.ifc.org/wps/wcm/connect/topics_ext_content/ifc_external_corporate_site/sustainability-at-ifc/publications/publications_handbook_geothermal-bp-2ed.

Inayat, A. and M. Raza (2019), “District cooling system via renewable energy sources: A review” (使用可再生能源的区域供冷系统: 综述), Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 107, Elsevier, pp. 360-373, <https://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2019.03.023>.

IEA (2019a), Renewables 2019: Market analysis and forecast from 2019 to 2024 (2019 可再生能源报告: 2019-2024 年市场分析与预测), International Energy Agency, Paris, www.iea.org/reports/renewables-2019/heat (accessed 15 July 2020).

IEA (2019b), How can district heating help decarbonise the heat sector by 2024? (区域供热如何帮助供热行业到 2024 年实现脱碳?), International Energy Agency, Paris, www.iea.org/articles/how-can-district-heating-help-decarbonise-the-heat-sector-by-2024 (accessed 16 July 2020).

IEA (2018), The future of cooling: Opportunities for energy-efficient air conditioning (制冷的未来: 节能空调的机遇), International Energy Agency, Paris, <https://doi.org/10.1787/9789264301993-en>.

IRENA (2020a), Global renewables outlook: Energy transformation 2050 (全球可再生能源展望: 能源转型报告 2050), International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

IRENA (2020b), Innovation Outlook: Thermal Energy Storage (创新前景: 储热), International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

IRENA (2019a), Accelerating geothermal heat adoption in the agri-food sector: Key lessons and recommendations (加快在农业食品行业使用地热: 重要的教训和建议), International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, www.irena.org/publications/2019/Jan/Accelerating-geothermal-heat-adoption-in-the-agri-food-sector.

IRENA (2019b), Global energy transformation: A roadmap to 2050 (2019 edition) (全球能源转型: 2050 年路线图 (2019 年版)), International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

IRENA (2018), Solid biomass supply for heat and power: Technology brief (固体生物质供热供电: 技术简介), International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

IRENA (2017a), Geothermal power: Technology brief (地热发电: 技术简介), International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

IRENA (2017b), Renewable energy in district heating and cooling: A sector roadmap for REmap (区域供热供冷中的可再生能源: REmap 行业路线图), International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

IRENA (2017c), Untapped potential for climate action: Renewable energy in nationally determined contributions (气候行动可利用的潜力: 国家级相关项目中的可再生能源), International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

IRENA (2016), Renewable energy in cities (城市中的可再生能源), International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

IRENA (n.d.), IRENA Project Navigator (IRENA 项目导航器), International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, <https://navigator.irena.org/index.html> (accessed 18 August 2020).

IRENA, IEA and REN21 (2020), Renewable Energy Policies in a Time of Transition: Heating and Cooling (过渡时期的可再生能源政策: 供热和供冷), IRENA, OECD/IEA and REN21.

IRENA, OECD/IEA and REN21 (2018), Renewable energy policies in a time of transition (过渡时期的可再生能源政策), www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Apr/IRENA_IEA_REN21_Policies_2018.pdf.

Jebamalai, J.M., K. Marlein and J. Laverge (2020), “Influence of centralized and distributed thermal energy storage on district heating network design” (集中式和分布式蓄热对区域供热网络设计的影响), Energy, Vol. 202, Elsevier, article 117689, <https://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2020.117689>.

- Johra, H., P. Heiselberg and J. Le Dréau (2019)**, “Influence of envelope, structural thermal mass and indoor content on the building heating energy flexibility” (围护结构、结构热质量和室内物质对建筑供热能源灵活性的影响), *Energy and Buildings*, Vol. 183, pp. 325-339 <https://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.11.012>.
- Jones, N. (2018)**, “How to stop data centres from gobbling up the world’s electricity” (如何阻止数据中心耗尽全世界的电力), *Nature*, Vol. 561, pp. 163-166, <https://dx.doi.org/10.1038/d41586-018-06610-y>.
- Jovanovi, S. (2019)**, Šabac district heating operator to upgrade residential buildings under ESCO model (沙巴茨区域供热运营商按照 ESCO 模式升级住宅建筑), *Balkan Green Energy News*, <https://balkangreenenergynews.com/sabac-district-heating-operator-to-upgrade-residential-buildings-under-esco-model/> (accessed 18 August 2020).
- Kganyapa, M. (2019)**, SA’s first solar district heating system in operation at Wits Junction (南非首个太阳能区域供热系统在 Wits Junction 投入运营), <http://witsvuvuzela.com/2019/08/20/wits-solar-district-heating-system-in-operation/> (accessed 18 August 2020).
- Klein, S.A. and G. Nellis (2012)**, *Thermodynamics (热力学)*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Köfing, M. *et al.* (2018), “Simulation based evaluation of large scale waste heat utilization in urban district heating networks: Optimized integration and operation of a seasonal storage” (模拟评估城市区域供热网络中大规模的余热利用: 季节性储能的优化整合与运营), *Energy*, Vol. 159, Elsevier, <https://dx.doi.org/10.1016/J.ENERGY.2018.06.192>.
- Køhler Pedersen, M. and C. Holm Christiansen (2019)**, Interconnection schemes for producer installations – RELaTED D2.3 (生产商装置互连计划 – RELATED D2.3), www.relatedproject.eu/wp-content/uploads/2019/03/RELaTED_D2_3_Interconnection-producers_v1.6.pdf.
- Konovšek, D. et al. (2017)**, “Process of optimization of district heat production by utilizing waste energy from metallurgical processes” (利用冶金过程中的余能优化区域供热), in *AIP Conference Proceedings*, Vol. 1866/1, article 050003, <https://dx.doi.org/10.1063/1.4994527>.
- Krog, L. and K. Sperling (2019)**, “根据丹麦和国际见解制定的战略性能源规划综合框架”(A comprehensive framework for strategic energy planning based on Danish and international insights), *Energy Strategy Reviews*, Vol. 24, Elsevier, pp. 83-93, <https://dx.doi.org/10.1016/j.esr.2019.02.005>.
- Leoni, P., R. Geyer and R.R.Schmidt (2020)**, “Developing innovative business models for reducing return temperatures in district heating systems: Approach and first results” (开发创新商业模式来降低区域供热系统的回流温度: 方法及初步结果), *Energy*, Vol. 195, article 116963, <https://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2020.116963>.
- Lettenbichler, S. and A. Provaggi (2019)**, 100% renewable energy districts: 2050 vision (100% 使用可再生能源的地区: 2050 年愿景), www.euroheat.org/wp-content/uploads/2019/08/RHC-ETIP_District-and-DHC-Vision-2050.pdf.
- Liao, Z., M. Swainson and A.L.Dexter (2005)**, “On the control of heating systems in the UK” (英国供热系统的管控措施), *Building and Environment*, Vol. 40/3, pp. 343-351, <https://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.05.014>.
- Limberger, J. et al. (2018)**, “Geothermal energy in deep aquifers: A global assessment of the resource base for direct heat utilization” (深层含水层中的地热能: 全面评估可直接用于供热的资源储量), *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 82, pp. 961-975, <https://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.084>.
- Lukic, M. (2018)**, Financing possibilities: ReDEWeB Fund (融资可能性: ReDEWeB 基金), 17th Energy Efficiency Coordination Group Energy Community Secretariat, 6 June 2018, Belgrade, www.energy-community.org/dam/jcr:ae5ebc44-82f3-4d1d-92e6-5ace563b8614/EECG_EBRD_ReDEWeB_062018.pdf.
- Lund, H. et al. (2018)**, “The status of 4th generation district heating: Research and results” (第四代区域供热的现状: 研究与成果), *Energy*, Vol. 164, pp. 147-159, <https://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2018.08.206>.
- Lund, H. et al. (2017)**, “Smart energy and smart energy systems” (智能能源和智能能源系统), *Energy*, Vol. 137, pp. 556-565, <https://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.123>.

Lund, H. et al. (2016), “Energy storage and smart energy systems” (储能和智能能源系统), International Journal of Sustainable Energy Planning and Management, Vol. 11, Aalborg University Press, Aalborg, pp. 3-14, <https://doi.org/10.5278/ijsepm.2016.11.2>.

Lund, J.W. and P.J.Lienau (2009), “Geothermal district heating” (地热区域供热), International Geothermal Days, pp. 18.

Lund, R. et al. (2017), “Comparison of low-temperature district heating concepts in a long-term energy system perspective” (从长期能源系统角度比较低温区域供热概念), International Journal of Sustainable Energy Planning and Management, Vol. 12, pp. 5-8, <https://dx.doi.org/10.5278/ijsepm.2017.12.2>.

Manente, G. et al. (2019), “Optimization of the hydraulic performance and integration of a heat storage in the geothermal and waste-to-energy district heating system of Ferrara” (在费拉拉的地热和转废为能区域供热系统中优化水力性能并整合蓄热), Journal of Cleaner Production, Vol. 230, Elsevier, pp. 869-887, <https://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.146>.

Mathiesen, B.V. et al. (2019), Towards a decarbonised heating and cooling sector in Europe: Unlocking the potential of energy efficiency and district energy (欧洲供热供冷行业脱碳之路: 释放能源效率和区域能源的潜力), Department of Planning, Aalborg University, Aalborg, www.districtenergyinitiative.org/sites/default/files/publications/towardsadecarbonisedhcsectorineufinalreport-111220191046.pdf.

Mathiesen, B.V. et al. (2016), Future green buildings - A key to cost-effective sustainable energy systems (未来的绿色建筑——具有成本效益的可持续能源系统的关键), Department of Development and Planning, Aalborg University, Aalborg, <https://vbn.aau.dk/en/publications/fremtidens-byggeri-n%C3%B8gle-til-et-omkostningseffektivt-og-b%C3%A6redygt>.

Mathiesen, B.V. et al. (2015), “Smart Energy Systems for coherent 100% renewable energy and transport solutions” (共同实现 100% 可再生能源的智能能源系统和运输解决方案), Applied Energy, Vol. 145, Elsevier, pp. 139-154, <https://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.075>.

Mathiesen, B.V. and K. Hansen (2017), The role of solar thermal in future energy systems: Country cases for Germany (未来能源系统中太阳能的作用: 以德国为例), Italy, Austria and Denmark, International Energy Agency, Paris, http://vbn.aau.dk/files/265304574/IEA_SHC_Task_52_STA_AAU_report_20170914.pdf.

Mathiesen, B.V., H. Lund and D. Connolly (2012), “Limiting biomass consumption for heating in 100% renewable energy systems” (限制 100% 可再生能源系统中供热所消耗的生物质), Energy, Vol. 48/1, Elsevier, pp. 160-168, <https://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2012.07.063>.

Mendelow, A.L.(1981), Environmental scanning - The impact of the stakeholder concept (环境扫描——利益相关方概念的影响), ICIS 1981 Proceedings, <https://aisel.aisnet.org/cgi/viewcontent.cgi?article=1009&context=icis1981> (paywall).

Mijnwater B.V. (2014), Minewater: Circular energy network of the future (Minewater: 未来的循环能源网络), www.mijnwater.com/?lang=en (accessed 18 August 2020).

Ministry of Economic Development (2015), Decreto interministeriale 26 giugno 2015 - Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici - Allegato 1 (articoli 3 e 4) Criteri generali e requisiti delle prest, Italy (计算能源性能及确定建筑规定和最低要求的方法应用 - 附件 1 (第 3 和 4 条) 意大利一般标准和性能要求), www.sviluppoeconomico.gov.it/index.php/it/normativa/decreti-interministeriali/2032966-decreto-interministeriale-26-giugno-2015-applicazione-delle-metodologie-di-calcolo-delle-prestazioni-energetiche-e-definizione-delle-prescrizioni-e-dei-requisiti.

Mirakyan, A. and R. De Guio (2013), “Integrated energy planning in cities and territories: A review of methods and tools” (城市和地区的综合能源规划: 方法与工具综述), Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 22, Elsevier, pp. 289-297, <https://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.01.033>.

Miró, L., S. Brückner and L.F.Cabeza (2015), “Mapping and discussing Industrial Waste Heat (IWH) potentials for different countries” (各国工业余热 (IWH) 潜力的匹配和探讨), Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 51, Elsevier, pp. 847-855, <https://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.035>.

- Moller, B. et al. (2018)**, “Heat Roadmap Europe: Identifying local heat demand and supply areas with a European thermal atlas” (欧洲供暖路线图：使用欧洲热力图确定本地供热需求和供应区域), *Energy*, Vol. 158, Elsevier, pp. 281-292, <https://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.025>.
- Mouchot, J. et al. (2019)**, “Geothermal energy development in Serbia: A French-Serbian collaborative project” (塞尔维亚的地热能开发：一个法塞合作项目), paper presented at the European Geothermal Congress 2019, Den Haag, The Netherlands, 11-14 June, <http://europeangeothermalcongress.eu/wp-content/uploads/2019/07/160.pdf>.
- Nador, A. et al. (2019)**, “Cascades and Calories: Geothermal Energy in the Pannonian Basin for the 21st Century and Beyond” (级联与热量：21 世纪及未来潘诺尼亚盆地的地热能), *Resources*, interreg Danube Transnational Programme, pp. 27-50
- Nilsson, P.E.(2003)**, Achieving the Desired Indoor Climate: Energy Efficiency Aspects of System Design (实现理想的室内气候：系统设计的能效方面), Studentlitteratur AB, https://books.google.dk/books?id=IMu_tgAACAAJ.
- Noussan, M., M. Jarre and A. Poggio (2017)**, “Real operation data analysis on district heating load patterns” (关于区域供热负荷模式的实际运营数据分析), *Energy*, Vol. 129, Elsevier, pp. 70-78, <https://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.079>.
- Olsen, P.K.(2014)**, Guidelines for low-temperature district heating, EUDP 2010-II: Full-scale demonstration of low-temperature district heating in existing buildings (低温区域供热指南, EUDP 2010-II: 全面演示现有建筑中的低温区域供热), https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:zI-RNXpmAEsJ:https://www.danskfjernvarme.dk/-/media/danskfjernvarme/gronenergi/projekter/eudp-lavtemperatur-fjv/guidelines-for-ltdh-final_rev1.pdf+&cd=1&hl=en&ct=clnk&gl=ae.
- Østergaard, D.S. and S. Svendsen (2016a)**, “Replacing critical radiators to increase the potential to use low-temperature district heating – A case study of 4 Danish single-family houses from the 1930s” (替换关键散热器，提高使用低温区域供热的潜力——以 4 栋 20 世纪 30 年代的丹麦独户住宅为例), *Energy*, Vol. 110, Elsevier, pp. 75-84, <https://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2016.03.140>.
- Østergaard, D.S. and S. Svendsen (2016b)**, “Theoretical overview of heating power and necessary heating supply temperatures in typical Danish single-family houses from the 1900s” (典型的 20 世纪初丹麦独户住宅的供热功率和必需供热温度的理论概述), *Energy and Buildings*, Vol. 126, Elsevier, pp. 375-383, <https://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.05.034>.
- Paardekooper, S. et al. (2020)**, “Heat Roadmap Chile: A national district heating plan for air pollution decontamination and decarbonisation” (智利热能路线图：针对空气污染治理与脱碳的国家区域供热计划), *Journal of Cleaner Production*, Vol. 272, Elsevier, article 122744, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122744>.
- Paardekooper, S. et al. (2018)**, Quantifying the impact of low-carbon heating and cooling roadmaps, Heat Roadmap Europe (量化低碳供热供冷路线图的影响), Deliverable 6.4, Aalborg University, Aalborg, https://vbn.aau.dk/ws/portalfiles/portal/288075507/Heat_Roadmap_Europe_4_Quantifying_the_Impact_of_Low_Carbon_Heating_and_Cooling_Roadmaps.pdf.
- Paardekooper, S., H. Lund and R.S.Lund (2018)**, “Smart energy systems” (智能能源系统), in *Energy Storage Options and Their Environmental Impact*, R. Hester and R. Harrison (eds.), Royal Society of Chemistry, pp. 228-260, <https://doi.org/10.1039/9781788015530-00228>.
- Papapetrou, M. et al. (2018)**, “Industrial waste heat: Estimation of the technically available resource in the EU per industrial sector, temperature level and country” (工业余热：根据工业部门、温度水平和国家 / 地区估算欧盟的技术可用资源), *Applied Thermal Engineering*, Vol. 138, Elsevier, pp. 207-216, <https://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.04.043>.
- Pauschinger, T. (2016)**, “Solar thermal energy for district heating” (用于区域供热的太阳能), in *Advanced District Heating and Cooling (DHC) Systems*, R. Wiltshire (ed.), Woodhead Publishing, pp. 99-120 <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-374-4.00005-7>.

- Pedersen, T.H., R.E.Hedegaard and S. Petersen (2017)**, “Space heating demand response potential of retrofitted residential apartment blocks” (住宅公寓楼翻新后的空间供热需求响应潜力), *Energy and Buildings*, Vol. 141, Elsevier, pp. 158-166, <https://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.02.035>.
- Persson, U. and H. Averfalk (2018)**, “ReUseHeat: Accessible urban waste heat” (ReUseHeat 可利用的城市余热).
- PETA 4 (n.d.)**, Peta, the Pan-European Thermal Atlas: Renewable energy - Interactive Web map (泛欧热图集 Peta: 可再生能源 - 交互式网络地图).
- Petersen, A.B.(2017)**, Handbook - Experiences from other urban waste heat recovery investments (其他城市的余热回收投资经验手册), Kolding.
- PlanEnergi (2017)**, Long term storage and solar district heating (长期储能和太阳能区域供热), https://planenergi.dk/wp-content/uploads/2017/06/sol_til_fjernvarme_brochure_endelig.pdf.
- Popovski, K. (2003)**, “Political and public acceptance of geothermal energy” (地热能的政治认可和公众接受度), Geothermal Training Programme (September), United Nations University, pp. 31-41, www.geothermalcommunities.eu/assets/elearning/10.7.UNU-GTP-2003-01-03.pdf.
- Ramsak, P. (2020)**, Geothermal energy in the Netherlands (荷兰的地热能), presentation for IRENA webinar “Energy Solutions for Cities of the Future”, 14 May, <https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Events/2020/May/Developing-enabling-frameworks-for-geothermal-heating---The-case-of-The-Netherlands.pdf?la=en&hash=1CB15D2845FDCC1DFDCD1EC813963940C836E9F5> (accessed 16 May 2020).
- Reiter, P., H. Poier and C. Holter (2016)**, “BIG Solar Graz: Solar district heating in Graz – 500,000 m² for 20% solar fraction” (BIG Solar Graz: 格拉茨 500,000 平方米太阳能区域供热中太阳能份额达到 20%), in *Energy Procedia*, Vol. 91, Elsevier, pp. 578-584, <https://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2016.06.204>.
- REN21 (2019)**, Renewables 2019 global status report (2019 年全球可再生能源现状报告), Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, www.ren21.net/gsr-2019/.
- Riahi, L. et al. (2017)**, Waste for heating and cooling: How district energy transforms losses into gains: Study on district energy in cities to support Korea’s Eco Energy Towns approach (供热供冷余热: 区域能源如何化失为得: 支持韩国“生态能源城镇”的城市区域能源研究).
- Richter, A. (2020)**, Two wells for geothermal heat project successfully drilled in Champs-sur-Marne (田野马恩河的地热供热项目成功完成了两口地热井的钻探), ThinkGeoEnergy, www.thinkgeoenergy.com/two-wells-for-geothermal-heat-project-successfully-drilled-in-champs-sur-marne/ (accessed 18 August 2020).
- Ridjan, I. (2015)**, Integrated electrofuels and renewable energy systems (集成式电燃料和可再生能源系统), Aalborg University, Aalborg.
- Sanner, B. et al. (2011)**, Common vision for the renewable heating & cooling sector in Europe (欧洲可再生能源供热供冷部门的共同愿景), RHC-Platform, <https://dx.doi.org/10.2788/20474>.
- Schmidt, D. et al. (2017)**, “Low temperature district heating for future energy systems” (未来能源系统的低温区域供热), *Energy Procedia*, Vol. 116, Elsevier, pp. 26-38, <https://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2017.05.052>.
- Schmidt, R.R., R. Geyer and P. Lucas (2020)**, The barriers to waste heat recovery and how to overcome them? (余热回收存在的障碍以及如何克服障碍?) www.euroheat.org/wp-content/uploads/2020/06/Discussion.pdf.
- Schmidt, T. and O. Miedaner (2012)**, Solar district heating guidelines - Fact sheet 7.2 - Storage (太阳能区域供热指南 - 情况说明书 7.2 - 储存), www.solar-district-heating.eu/wp-content/uploads/2018/06/SDH-WP3_FS-7-2_Storage_version3.pdf.
- Seyidov, F. and T. Weimann (2020)**, Proposal for a transition in the Risk Mitigation Schemes (关于风险缓解计划中的过渡提案).
- Sigfusson, B. and A. Uihlein (2015)**, 2014 JRC geothermal energy status report (2014 年 JRC 地热能现状报告), JRC99284/EUR 27623 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg.
- Sørensen, P.A.(2017)**, Implementation of solar district heating integrated in existing district heating systems in cities (在城市现有区域供热系统整合太阳能区域供热).

- Sørensen, P.A. et al. (2012)**, “Solar district heating guidelines: Collection of fact sheets (太阳能区域供热准则：情况说明书合集)”, Solar District Heating, www.solar-district-heating.eu/en/knowledge-database/.
- Spain (2020)**, “Propuesta de real decreto que modifica el Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios” (关于修改 7 月 20 日第 1027/2007 号皇家法令、批准《建筑中的热能装置法规》的皇家法令提案) <https://energia.gob.es/es-es/Participacion/Documents/proyecto-RD-modifica-RD-reglamento-instalaciones-termicas/Modificacion-RITE.pdf>.
- Støchkel, H.K., B.L.Paaske and K.S.Clausen (2017)**, Inspirationskatalog for store varmepumpeprojekter i fjernvarmesystemet (区域供热系统中大型热泵项目的灵感目录), https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Varme/inspirationskatalog_for_store_varmepumper.pdf.
- Svendsen, S., D.S. Østergaard and X. Yang (2017)**, “Solutions for low temperature heating of rooms and domestic hot water in existing” (现有的房间低温供热和生活热水解决方案), in Book of abstracts: 3rd International Conference on Smart Energy Systems and 4th Generation District Heating, B.V. Mathiesen and H. Lund, (eds.), Aalborg Universitet, Copenhagen, pp. 151.
- Terés-Zubiaga, J. et al. (2015)**, “Energy and economic assessment of the envelope retrofitting in residential buildings in Northern Spain” (对西班牙北部住宅建筑围护结构改造的能源和经济评估), Energy and Buildings, Vol. 86, pp. 194-202, <https://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.10.018>.
- Tester, J.W. et al. (2015)**, “Deep geothermal energy for district heating: Lessons learned from the U.S. and beyond” (用于区域供热的深层地热能：来自美国等国家的经验教训), in Advanced District Heating and Cooling (DHC) Systems, Elsevier, pp. 75-98, <https://dx.doi.org/10.1016/B978-1-78242-374-4.00004-5>.
- The World Bank (2012)**, “Modernization of the district heating systems in Ukraine: Heat metering and consumption-based billing” (乌克兰区域供热系统的现代化改造：供热计量和按用量计费), ESMAP, pp. 1-72, <https://euea-energyagency.org/wp-content/uploads/2012/03/UkraineDHreport2012e.pdf>.
- Thellufsen, J.Z. et al. (2019)**, “Smart energy cities in a 100% renewable energy context” (100% 可再生能源环境中的智能能源城市), in Proceedings for 14th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, Dubrovnik, Croatia.
- Thorsen, J.-E. and H. Kristjansson (2006)**, “Cost considerations on storage tank versus heat exchanger for hot water preparation” (用于热水制备的储水箱与热交换器的成本考虑), in Lectures - 10th International Symposium on District Heating and Cooling, Hanover University of Technology, Hanover.
- Tol, H. and S. Svendsen (2015)**, “Effects of boosting the supply temperature on pipe dimensions of low-energy district heating networks: A case study in Gladsaxe, Denmark” (提高供应温度对低能耗区域供热网络的管道尺寸的影响：以丹麦格莱萨克瑟为例), Energy and Buildings, Vol. 88, Elsevier, pp. 324-334, <https://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.10.067>.
- Trier, D. (2018)**, Solar district heating: Instruments for policy and legal framework (太阳能区域供热：政策与法律框架工具), www.solar-district-heating.eu/wp-content/uploads/2018/10/SDHp2m_Market-monitoring_version1.0.pdf.
- Trier, D. et al. (2018a)**, Guidelines for the energy system transition - Final heat roadmap Europe guidelines for local, national, and EU lead-users (能源系统过渡指南——针对地方、国家和欧盟领先用户的欧洲最终供暖路线图指南)。
- Trier, D. et al. (2018b)**, Solar district heating trends and possibilities - Characteristics of ground-mounted systems for screening of land use requirements and feasibility (太阳能区域供热趋势及可能性——用于筛选土地使用要求和可行性的地面系统的特性)。
- Tunzi, M. et al. (2016)**, “Method to investigate and plan the application of low temperature district heating to existing hydraulic radiator systems in existing buildings” (在现有建筑的现有液压散热器系统中应用低温区域供热研究与规划方法), Energy, Vol. 113, Elsevier, pp. 413-421, <https://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2016.07.033>.
- UN Habitat (2019)**, Strategic plan 2020-2023: A better quality of life for all in an urbanizing world (2020-2023 年战略规划：改善城市化世界中所有人的生活质量), UN Habitat, https://unhabitat.org/sites/default/files/documents/2019-09/strategic_plan_2020-2023.pdf.

- UN (2019)**, World Urbanization Prospects 2018 (2018 年世界城市化前景), United Nations, <https://population.un.org/wup/> (accessed 15 July 2020).
- UN (2016)**, “Amendment to the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer” (《蒙特利尔破坏臭氧层物质管制议定书》修正案), United Nations, Kigali, https://treaties.un.org/doc/Treaties/2016/10/20161015_03-23_PM/Ch_XXVII-2.f.pdf.
- UN (2015)**, Sustainable Development Goals (可持续发展目标), United Nations, <https://sdgs.un.org/goals>.
- UNEP (2015)**, District energy in cities: Unlocking the potential of energy efficiency and renewable energy (城市区域能源: 释放能源效率和可再生能源的潜力), United Nations Environment Programme, <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/9317>.
- Verhoeven, R. et al. (2014)**, “Minewater 2.0 project in Heerlen the Netherlands: Transformation of a geothermal mine water pilot project into a full scale hybrid sustainable energy infrastructure for heating and cooling” (荷兰海尔伦 Minewater 2.0 项目: 将地热矿井水试点项目转变为用于供热供冷的全面混合可持续能源基础设施), in Energy Procedia, Vol. 46, Elsevier, pp. 58-67, <https://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.158>.
- Vermilion Energy (2019)**, Values matter: Vermilion 2019 sustainability report (价值观至关重要: 2019 年 Vermilion 可持续发展报告), <http://sustainability.vermilionenergy.com/files/pdf/2019-Vermilion-Sustainability-Report-Web.pdf>.
- Volkova, A., V. Mašatin and A. Siirde (2018)**, “Methodology for evaluating the transition process dynamics towards 4th generation district heating networks” (向第四代区域供热网络过渡的过程动态评估方法), Energy, Vol. 150, Elsevier, pp. 253-261, <https://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2018.02.123>.
- Wallquist, L. and M. Holenstein (2015)**, “Engaging the public on geothermal energy” (吸引公众参与地热能项目), in World Geothermal Congress 2015.
- Wang, X. et al. (2013)**, “Case study: Geothermal funds in Eastern Europe and Africa” (案例研究: 东欧和非洲的地热基金), in Unlocking Commercial Financing for Clean Energy in East Asia, World Bank, pp. 277-284, <https://documents.worldbank.org/curated/en/212781468037508882/pdf/811120PUB0Unlo00Box0379830BOPUBLIC0.pdf>.
- Werner, S. (2017)**, “International review of district heating and cooling” (国际区域供热供冷综述), Energy, Vol. 137, Elsevier, pp. 617-631, <https://dx.doi.org/10.1016/J.ENERGY.2017.04.045>.
- Werner, S. (2004)**, “District heating system institutional guide” (区域供热系统机构指南).
- WHO (2019)**, “Air pollution in Mongolia” (蒙古的空气污染), Bulletin of the World Health Organization, World Health Organization, <https://dx.doi.org/10.2471/BLT.19.020219>.
- Wiltshire, R. (ed.) (2016)**, Advanced District Heating and Cooling (DHC) Systems (高级区域供热供冷 (DHC) 系统), Elsevier, <https://dx.doi.org/10.1016/c2014-0-01422-0>.
- Xiong, W. et al. (2015)**, “Heat roadmap China: New heat strategy to reduce energy consumption towards 2030” (中国热能路线图: 2030 年前减少能源消耗的新供热战略), Energy, Vol. 81, Elsevier, pp. 274-285, <https://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2014.12.039>.
- Xu, J., R.Z.Wang and Y. Li (2014)**, “A review of available technologies for seasonal thermal energy storage” (季节性蓄热可用技术综述), Solar Energy, Vol. 103, Elsevier, pp. 610-638, <https://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2013.06.006>.
- Yang, X. (2016)**, Supply of domestic hot water at comfortable temperatures by low-temperature district heating without risk of Legionella (通过低温区域供热以舒适温度供应生活热水, 消除军团菌繁殖风险), S. Svendsen and H. Li (eds.), Technical University of Denmark, Department of Civil Engineering.
- Zhang, L. et al. (2017)**, “Method for achieving hydraulic balance in typical Chinese building heating systems by managing differential pressure and flow” (通过管理压差和流量来在典型的中国建筑供热系统中实现液压平衡的方法), Building Simulation, Vol. 10/1, pp. 51-63, <https://dx.doi.org/10.1007/s12273-016-0307-2>.



www.irena.org

Copyright © IRENA 2021