中国城市大规模推广建筑领域可再生能源利用研究报告

该报告由以下单位共同合作完成：

dena 德国能源署

编写单位

德国能源署
Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena)
German Energy Agency
Chausseestrasse 128 a
10115 Berlin, Germany
Tel: +49 (0)30 66 777-0
Fax: +49 (0)30 66 777-699
E-mail: info@dena.de
Internet: www.dena.de

编写组

Hui Zhang 章晖，Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena)
Ang Ye 叶 昂， Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena)

委托方

世界自然基金会（瑞士）北京代表处
北京市西城区百万庄大街22号院2号楼3层
Tel: +86(0)10-68366698
Fax: +86(0)10-68366678

项目管理

王伟康 世界自然基金会（瑞士）北京代表处 项目主任
刘芙宇 世界自然基金会（瑞士）北京代表处 高级项目专员
刘 倩 世界自然基金会（瑞士）北京代表处 助理项目专员

时间：2020年11月30日

德国能源署（dena）简介

dena是提高能效、推动可再生能源和智能能源系统发展的职能中心。作为能源转型的职能机构，德国能源署在德国本土和国际上制定并落实解决方案，为实现能源转型和气候保护的目标作出贡献。德国能源署成立于2000年，活跃于政界、经济界及学术界。目前德国能源署共有230余名员工，专业背景涉及能源、物理、经济、建筑、法律和商务等多领域，其广泛的专业知识和经验被充分运用于目前100多个项目的实施中。与此同时，德国能源署的项目伙伴涉及若干公共和私营部门及众多专业领域。

世界自然基金会（WWF）简介

WWF是在全球享有盛誉的、最大的独立性非政府环境保护组织之一。自1961年成立以来，WWF一直致力于环保事业，在全世界拥有将近520万支持者和一个在100多个国家活跃着的网络。WWF的使命是遏止地球自然环境的恶化，创造人类与自然和谐相处的美好未来。为此WWF致力于：保护自然世界生物多样性；确保可再生自然资源的可持续利用；推动降低污染和减少浪费型消费的行动。

摘要

在二氧化碳排放达到峰值和实现碳中和的过程中，城镇范围建筑领域可再生能源大规模的利用发挥了重要的作用。建筑与工业、交通并列为能源消耗的三个主要领域。城镇区域是这三大能耗领域的集合点，也是全球能源转型最重要的参与者。城镇作为建筑和相关基础设施建设的管理主体，可在不同层面提升可再生能源利用。根据2016年发布的中国《能源生产和消费革命战略（2016-2030）》，能源转型将坚持分布式和集中式并举，以分布式利用为主，推动可再生能源高比例发展。这也对城镇区域建筑领域大规模利用可再生能源，提出了国家宏观层面的要求。

可再生能源的类型和利用形式多样，有不同发展潜力。在建筑领域利用可再生能源，需要根据城镇区域所在的气候地理条件，进行因地制宜的分析和一体化的规划设计。

可再生能源发电主要有三种方法。除了目前在中国应用较为广泛、发展较快的光伏发电系统以外，小型风力发电系统和生物质能发电系统在国际上也得到了一定程度的探索。相类似的，在可再生能源供暖与制冷方面，中国对于太阳能集热器供暖应用已积累不少经验。其他系统，如太阳能热结合吸收式冷却系统、地热能供暖和制冷以及生物质能供暖系统，可以进一步减少建筑用能的二氧化碳排放量，目前在国际范围内有一些技术成熟的案例，但仍需要得到大规模推广。

推广建筑领域可再生能源利用需要相应的基础和保障。在中国能源转型战略以及《可再生能源法》的框架内，城镇一级可以运用相应的规划工具制定综合性或单项可再生能源的利用规划。国际上，例如德国，在这方面已有一些成熟案例，中国类似的综合能源规划目前还处于试点阶段。在技术层面，除了可再生能源产能技术本身的发展，系统性的技术应用是大规模推广的基础。其中包括灵活稳定的数字化电网系统、以利用小型设备为主的分布式能源系统和适宜的储能技术。

为实现建筑领域可再生能源利用的大规模推广，一方面需要针对单项可再生能源提出创新的发展理念，如光伏建筑一体化，另一方面也应挖掘建筑组群或园区中多种可再生能源利用方式相互协作的潜力，如实施园区一体化方案，实现集群效应。此外，对于一些特定的可再生能源利用如地热能、生物质能和风能，城镇也可积极与周边区域合作，推动优势互补。

随着“十四五规划”的编制，预计中国实现碳排放达峰与碳中和的路径将越来约明晰。选取适宜的城市区域，通过国际合作，推广建筑领域可再生能源利用，将是一项具有战略意义的工作。根据德国能源署十多年来在中国开展建筑节能和生态城市合作的经验，搭建一个多层面的工作框架将有助于合作的开展与落地。其内容包括：与合作伙伴共同选定示范技术和项目、协助地方推动可再生能源发展管理体系建立、并在具体示范项目合作的实践经验基础上为城镇提供政策和标准建议。

可再生能源的特性决定了其在应用过程中需要系统化的解决方案和创新的模式。全方位、多层面的合作成果，可以为区域性大规模推广建筑领域可再生能源利用打下坚实的基础。

Abstract

The large-scale use of renewable energy in the building sector in urban areas plays an important role in peaking CO2 emissions and achieving carbon neutrality. Buildings, along with industry and transport, are the three main sectors with high energy consumption. Urban areas are the convergence point of these three major energy consuming sectors and are therefore the most important players in the global energy transition. Cities and towns, as custodians of buildings and related infrastructure, can make the use of renewable energy at different levels more attractive. According to China's Revolutionary Strategy for Energy Production and Consumption (2016-2030), released in 2016, the energy transition will accommodate both the distributed and the centralised approaches, focusing on distributed utilisation and promoting a high proportion of renewable energy. This also highlights national macro-level requirements for the large-scale use of renewable energy in building sector.

There are various types and uses of renewable energy with different development potentials. The use of renewable energy in the building sector requires a site-specific analysis and integrated planning and design based on the climatic and geographic conditions of the urban area.

There are three main approaches to renewable energy generation. In addition to photovoltaic systems, which are currently widely used and developing rapidly in China, small-scale wind power and biomass power systems have also been explored internationally. Similarly, in the area of renewable energy heating and cooling, China has accumulated considerable experience with solar collectors for heating applications. Other systems, such as solar thermal combined with absorption cooling systems, geothermal heating and cooling, and biomass heating systems, can further reduce carbon dioxide emissions resulting from building energy use. There are further examples of mature technologies internationally, however, thesestill need to be promoted on a wider scale.

The promotion of renewable energy in the building sector requires the appropriate foundation and guarantees. Within the framework of China's energy transition strategy and the Renewable Energy Law, urban planning tools can be used to develop comprehensive or individual renewable energy plans. Internationally, Germany, for example, has some mature cases in this area, and similar integrated energy planning in China is currently in the pilot phase. On the technical level, in addition to the development of renewable energy capacity technology itself, systematic technology applications are the basis for large-scale deployment. These include flexible and stable smart grid systems, distributed energy systems based on the use of small devices, and appropriate energy storage technologies.

In order to achieve large-scale deployment of renewable energy in buildings, innovative concepts are needed for individual renewable energy sources, such as building-integrated photovoltaic (BIPV), as well as the potential for collaboration among multiple renewable energy sources in a urban district, such as a campus-integrated solution to achieve a cluster effect. In addition, for specific renewable energy uses such as geothermal energy, biomass, and wind energy, cities and towns can actively cooperate with their neighbors to promote complementary advantages.

With the preparation of the 14th Five-Year Plan, it is expected that China's path to peak carbon emissions and carbon neutrality will become increasingly clear. It will be a strategically important task to select suitable urban areas and promote the use of renewable energy in the building sector through international cooperation. Based on more than ten years of experience of the German Energy Agency (dena) in the field of building energy efficiency and eco-city cooperation in China, a multifaceted working framework will facilitate the cooperation. The framework will include the selection of demonstration technologies and projects together with the partners, assistance in the establishment of local management systems for renewable energy development, and policy and standard recommendations for cities and towns based on the practical experience of cooperation on concrete demonstration projects.

The nature of renewable energy is such that its application requires systemic solutions and innovative models. A comprehensive and multifaceted cooperation can lay a solid foundation for a large-scale regional expansion of renewable energy use in buildings.

目录

1 引言

1.1 研究背景

作为全球最大的二氧化碳排放国和第二大经济体，中国在应对全球气候变化和实现可持续发展目标方面发挥着重要的作用。2020年9月，中国国家主席习近平在第七十五届联合国大会上首次明确了中国实现碳中和的时间点，中国二氧化碳排放量将力争于2030年前达到峰值，并争取于2060年前实现碳中和。

能源系统的转型是实现气候承诺的保障。2016年起实施的国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要（“十三五”规划）中提出了能源革命的构想，目标在于建立一个清洁、低碳、安全和高效的能源系统。针对建筑领域，“十三五”规划中提出，到2020年，城镇新建民用建筑须全部达到节能标准要求，能效水平比2015年提升20%，城镇绿色建筑面积占新建建筑面积比重须提高到50% (中华人民共和国中央人民政府, 2016)。

提升建筑能效并降低建筑领域碳排放，需要在降低建筑自身能源需求的同时，优化建筑的能源利用。对此，可再生能源利用可以发挥重要的作用。

1.1.1 城镇化与城镇能源消耗

城镇是实现能源转型和减缓气候变化的核心。根据联合国人口统计数据，截止2018年底，全球城镇居民人口数量增长到42亿，相比1950年（7亿5千万）已增加了四倍，占总人口数量的55%。预计从2018年到2030年，城镇居民数量将平均每年增长1.7%，从2030年至2050年将平均每年增长1.3%。到2050年，68%的全球人口将居住在城市区域 (United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Divison, 2018)。

中国的城镇化目前仍保持相对较快的增长速度。中国国家统计局数据显示，截止2019年，中国城镇人口数量达到8.48亿。城镇化率从2001年的37.7%增长到2019年的60.6%。如果按照目前的趋势发展，预计到2030年中国的城镇化率将达到70% (中国国家统计局, 2020)。

当前，城镇区域能源消耗量占全球总能源消耗量的67至76%，与能源相关的二氧化碳排放量占总排放量的71至76% (IPCC, 2014)，城镇因此成为低碳发展和能源转型的最主要场所。城镇人口密集，空间受限，经济和社会活动集聚，这些塑造了城市能源系统的独特性。为了发挥城镇的潜力，需要在城镇区域构建高效、互联、一体化、跨领域集成、高韧性的能源系统。

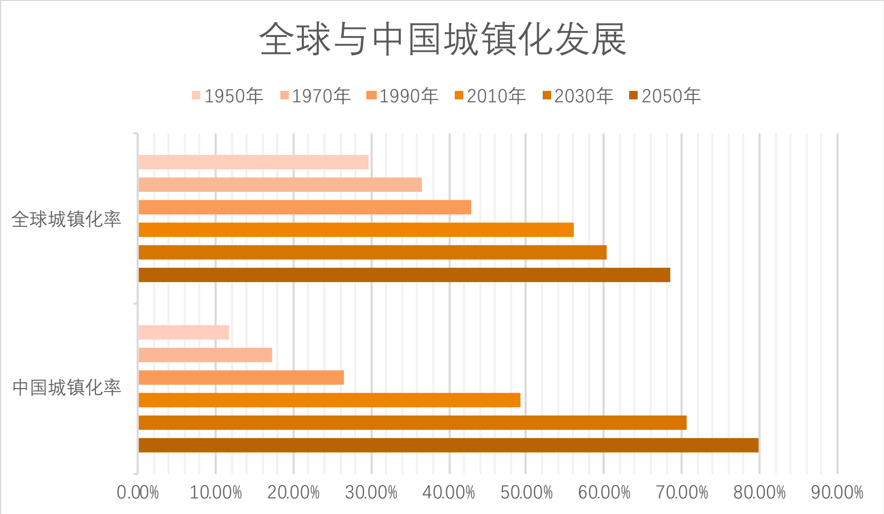

图1 全球与中国城镇化率发展

（数据来源：UN World Urbanization Prospects: The 2018 Revi-sion）

1.1.2 建筑领域能耗

建筑与工业、交通并列为能源消耗的三个主要领域。建筑能耗主要包括建造能耗和运行能耗两个部分。建筑建造能耗是指由于建筑建造所导致的从原材料开采、建材生产、运输以及现场施工所产生的建筑消耗。建筑运行能耗是指在住宅、办公建筑、学校、商场、宾馆、交通枢纽、文体娱乐设施等建筑内，为居住者或使用者提供供暖、通风、空调、照明、炊事、生活热水，以及其他为了实现建筑的各项服务功能所产生的能源消耗。

自2000年以来，全球建筑领域的能源消耗稳步增加，年均增长率约为1.1%。2018年建筑建造和运行的终端能源消耗占全球总能耗的35%，其中建造能耗占6%，运行能耗占30%。建筑行业相关二氧化碳排放占全球总二氧化碳排放的39%，其中由建筑建造导致的二氧化碳排放占11%，建筑运行占28%。特别是2019年，由于极端天气的影响，以及供暖和制冷需求的持续增加，源自建筑电力与热力的直接和间接二氧化碳排放量上升到10Gt，是有记录以来的最高水平 (IEA, 2020)。

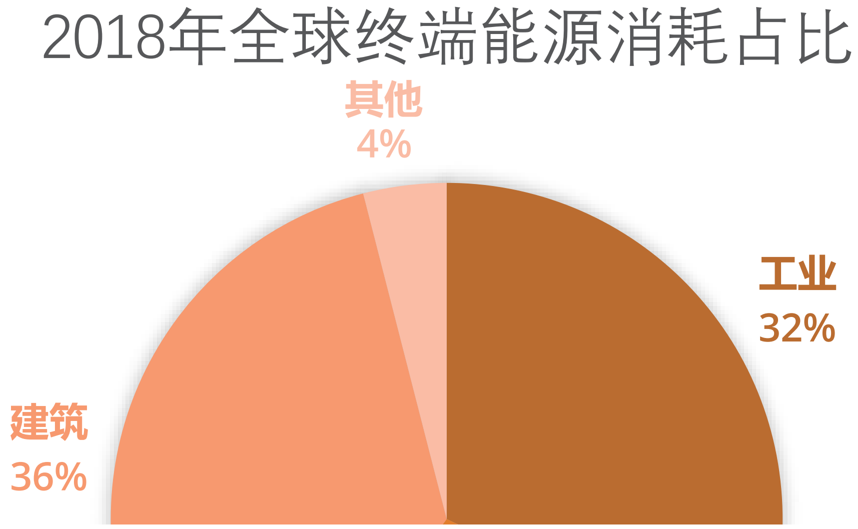

图2 2018年全球终端能源消耗占比

（数据来源：International Energy Agency, 2019 Global sta-tus report for buildings and construction）

根据清华大学建筑节能研究中心的核算结果，2018年，中国建筑能耗占全社会总能耗的37%，建筑领域相关二氧化碳排放占全社会二氧化碳总排放量的42%。建筑领域能耗和二氧化碳排放占比均略高于全球整体水平 (清华大学建筑节能研究中心, 2020)。

建筑领域能耗的持续增长，一方面是因为新建建筑面积的增加，特别是快速的城镇化发展造成民用建筑需求的不断增加，另一方面，伴随着不断提高的生活水平，民用建筑在生活热水、空调等方面需求的增加，也大幅提升了建筑在电力和热力方面的能源消耗。

2030年达峰和2060年碳中和目标的提出，对建筑领域能源结构的转型提出了新的要求，如何降低建筑在用电、供暖和制冷方面造成的直接或间接二氧化碳排放，是建筑领域未来发展面临的主要挑战。

1.1.3 可再生能源

可再生能源利用是低碳发展战略和转型路径中最重要的手段之一。可再生能源利用在分布形式和规模上具有很强的灵活性，能源的生产更加接近能源消费端，适宜于在城镇区域内开展。构建城镇分布式能源系统，一方面可以减少空气污染和温室气体排放，降低城市能源成本，减少对传统化石燃料的依赖，另一方面可以推动本地与可再生能源利用相关产业经济发展，为城镇增加就业机会。

目前，世界各地已有超过两百个城市制定了可再生能源发展目标，例如加拿大温哥华市于2015年发布了《可再生能源城市战略2015-2050》，其目标是到2050年实现温哥华市100%的可再生能源利用 (City of Vancouver, 2015)。在中国，很多城市在其十三五规划中都明确了可再生能源发展目标，北京市在最新的城市总体规划中也提出到2020年北京市可再生能源利用比重要达到8%，到2035年达到20% (北京市规划和自然资源委员会, 2018)。

伴随着可再生能源技术的不断成熟，如电力和热能储存、电动汽车智能充电、可再生电力产热和制氢、数字技术和智能能源管理等，以可再生能源为基础的分布式能源系统得以在越来越多的城镇及其周边地区得到部署。

1.2 名词解释

一次能源需求：一次能源需求描述了满足终端能源需求所需的能源量。还包括建筑之外的上游工艺链在提取、转换和分配能源载体过程中所需要的能源量。

终端能源需求：是指为了保证室温标准和全年生活热水，必须向供暖、通风、热水制备和制冷等系统提供的能源。该能源需求包括系统技术（泵、控制等）运行所需的辅助能量。

产能建筑：德国产能建筑的定义为全年一次能源需求为负数（ΣQp<0 kWh /m²a），且全年终端能源需求为负数（ΣQe<0 kWh /m²a），则达到产能建筑要求。其他方面必须遵守《节能条例》（EnEV）的要求，例如夏季隔热要求等。

超低能耗建筑：是指在围护结构、采暖和制冷、照明、设备、智能控制、可再生能源利用等方面综合选用各项节能技术，能耗水平远低于常规建筑的建筑物。

1.3 研究目的

本次研究通过对中国建筑领域能源消耗及可再生能源利用进行分析，并总结大规模推广建筑领域可再生能源利用面临的问题和挑战，来形成相应的政策层面和技术层面的发展建议，进而确定相应的工作框架，为后续推动试点城镇建筑领域可再生能源利用做准备。

目标1: 对建筑能耗进行数据分析，阐明选择建筑领域使用可再生能源的原因

目标2: 研究建筑领域使用可再生能源的方式，及相应可以减少碳排放的数量

目标3: 结合德国能源署在中国推广建筑节能的经验，分析研究在中国大规模推广建筑使用可再生能源面临的挑战和问题，以及建议采取哪些方案解决这些问题

目标4: 提出适宜大规模推广建筑领域可再生能源利用的城市/区域选择标准

目标5: 以试点城市为例，概述为城市大规模推广建筑领域可再生能源利用形成政策建议和制定措施的工作流程

1.4 研究范围和方法

本次研究重点在城镇及周边区域分布式可再生能源利用上，集中式大规模可再生能源生产、并网及远距离输送使用不在本次研究范围内。

本次研究选择定性和定量分析中国建筑耗能、建筑领域可再生能源利用，并结合德国能源署在建筑节能领域长期的实践经验，形成相应的政策和技术发展建议以及相应的工作框架，以推动建筑领域可再生能源，特别是分布式可再生能源利用在中国大规模推广。

2 建筑领域可利用的可再生能源种类及其发展潜力

可再生能源，是指风能、太阳能、水能、生物质能、地热能、海洋能等非化石能源。由于受到自然条件和空间需求的限制，同时基于分布式可再生能源“就地生产、就地利用”的原则，本章将对适宜在城镇范围内用于建筑领域的可再生能源，主要包括太阳能、风能、地热能和生物质能，进行介绍。

2.1 太阳能

建筑领域利用太阳能的方式主要有两种：

- 太阳能光伏发电为建筑提供电力
- 太阳能集热为建筑提供生活热水、采暖和制冷。

这两种技术都可以在不同规模的建筑（群）中，以独立或并网的形式布置。

图3 太阳能光伏

（来源：shutterstock.com_Mariusz Niedzwiedzki）

图4 太阳能集热

（来源：shutterstock.com_indukas）

2.2 风能

风能在建筑领域的分布式利用主要是通过在建筑屋顶或建筑群内的空地上设置小型风力发电机组为建筑提供电力，多以独立的形式存在。

图5 垂直轴风力发电机

（来源：shutterstock-eldeiv_95223898）

2.3 地热能

地热能是通过提取储存在地下岩石或土壤中的能量来发电、供暖和制冷。地热能通常分为三种：

- 浅层地热能：从地表至地下200米深度范围内，储存于水体、土体、岩石中的温度低于25摄氏度，采用热泵技术可提取用于建筑物供热或制冷等的地热资源
- 水热型地热能：储存于天然地下水及其蒸汽中的地热资源
- 干热岩型地热能：不含或仅含少量流体，温度高于180摄氏度，储存在固体岩石中的地热资源

适合直接提取利用用于建筑供暖和生活热水加热的，主要指中低温地热能（约10℃至150℃），如浅层地热能和中低温水热型地热能。当温度较低，需要通过地源热泵的使用将这个深度的热量提高到建筑所需的温度水平。中低温地热能也是区域供暖系统中传统化石燃料热源的理想替代能源。

图6 地热能开采

（来源：H. Anger´s Söhne Bohr und Brunnenbaugesellschaft mbH）

2.4 生物质能

生物质是指有机来源的材料，是自然界中生存或生长的物质以及生物和死亡生物的废弃物。城镇区域可用于能源生产的生物质一般有两类：

- 残留物、副产品和废物，以及
- 能源作物

残留物、副产品和废物主要是在城市生产和生活的过程中产生的，包括液态粪便、排泄物、垃圾和收获残渣，以及贸易和工业产生的有机废物。能源作物是指以生产能源为目的种植的如玉米、油菜和谷物等作物以及木材和草等速生植物，通常在能源种植园中短期轮作种植。能源作物被加工成沼气、木柴、木屑和颗粒。这些生物质燃料可在火力发电厂中转化为热能和电能。

图7 生物质锅炉

（来源：Rainer Weisflog）

2.5 可再生能源的发展潜力

根据2020年4月发布的《中国可再生能源展望2019》，实现2050年全球气温升温控制在2摄氏度以下的目标情景需要大幅提升可再生能源在一次能源消费中的比例，特别是太阳能和风能。在电力系统中，太阳能光伏发电和风力发电到2050年将承担超过70%的电力生产（国家发展和改革委员会能源研究所，国家可再生能源中心，英国儿童投资基金会, 2020）。

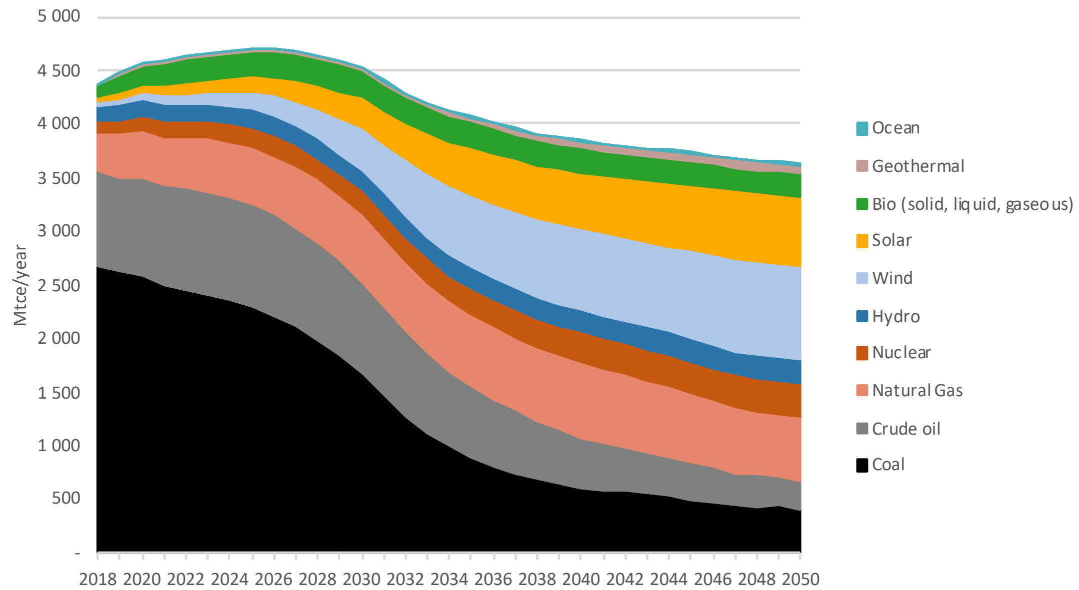

图8 在2摄氏度目标情景下可再生能源在一次能源消费中的比例

（来源：中国可再生能源展望2019）

在中国明确了2030年二氧化碳排放达峰和2060年碳中和的目标后，根据清华大学气候变化与可持续发展研究院于2020年9月发布的中国低碳转型路径研究结果，中国长期低碳排放路径选择需要从强化政策情景向2ºC和1.5ºC目标情景的过渡。实现2060年碳中和需要实施以1.5ºC目标为导向的长期深度脱碳转型路径（清华大学气候变化与可持续发展研究院, 2020)。因此，可再生能源在未来能源结构转型中将肩负更大的责任。

3 建筑领域可利用的可再生能源方式

城镇范围内的建筑用能途径主要包括家用电器、空调、照明、炊事、生活热水以及夏热冬冷地区的冬季供暖。不同类型和功能的建筑，所需电能和热能比例也不相同。可再生能源依据其产能方式可分为可再生能源发电和可再生能源供暖与制冷两种方式。

3.1 可再生能源发电

建筑领域可再生能源发电主要包括太阳能光伏发电、小型风力发电和生物质发电三种方式。这其中，太阳能光伏是建筑领域可再生能源发电最常见的利用方式。

3.1.1 太阳能光伏发电系统

原理：

光伏系统将太阳辐射功率转化为电能。太阳光照射到嵌在塑料中的太阳能电池上，太阳能电池中的电子在太阳辐射的作用下被提升到更高的能量水平，从而在电池中产生电流，从正极接触到负极接触。串联的电池产生直流电，在逆变器中转化为交流电。产生的电力可以输入公共电网，也可以由用户直接使用。

形式：

设置在建筑层面上的太阳能光伏发电主要包括两种形式：

- 建筑屋面或外墙上的光伏系统，以及
- 与建筑构件融为一体的光伏建筑一体化系统。

设置在建筑屋面和外墙上的太阳能光伏系统是最常见的光伏系统形式，其安装和维护都相对简单。光伏建筑一体化（Building Integrated Photovoltaics / BIPV）是指使用特殊材料取代标准建筑材料，将其装于屋顶或建筑立面，以促进建筑的光电转化效果的集成建筑组件方案，主要包括两类产品：幕墙一体化(如光伏墙/幕墙)和屋顶一体化(如光伏屋面和瓦片)。

发展：

过去十年，全球太阳能光伏发电装机容量迅速增加，根据国际可再生能源机构（IRENA）的最新数据，全球光伏发电从2010年的约40千兆瓦增加到2019年的580千兆瓦，其中大部分是公用事业规模的太阳能发电厂 (IRENA,

2020)。但在一些国家，如德国，城市内和周围的小规模分布式太阳能光伏系统占主导地位。

中国的光伏装机容量近年来一直稳居全球首位，根据国家能源局数据，中国光伏发电从2014至2019年期间累计装机容量持续增长，截止2019年，光伏发电累计装机容量达到20430万千瓦，其中主要为集中式光伏，比例接近70%。分布式光伏虽然占比例较小，但在政策的鼓励下，所占比重从2016年以来逐年增加。

示范案例：

山东城市建设职业学院被动式低能耗建筑示范项目

图9 山东城市建设职业学院

（来源：德国能源署）

山东城市建设职业学院位于济南市东部的教育城彩石片区，历经两年半建设完成总建筑面积达两万平米的大型被动式超低能耗建筑 -- 实验实训中心大楼。

实验实训中心大楼由南北两个建筑体组成，通过东、西侧的连廊相连。北楼按照中国现行节能标准65节能建造，南楼按照被动式超低能耗建筑标准建造。南楼屋面设置了大面积的光伏和太阳能集热器，并放置空气源热泵机组。太阳能光伏发电提供庭院照明和公共走廊照明。太阳能真空集热管收集太阳能用于建筑供暖，夏季驱动吸收式制冷机。暖通设备方面，每层设置两台带高效热回收的新风机组，以保障室内优良的空气质量，供暖和制冷通过与空气源热泵相连的风机盘管送风实现。

本项目的实施，不仅对本校专业教学，而且对山东省以及全国被动式超低能耗建筑的推广都起到了重要的示范作用。在这里，学生们既可以学习建筑节能技术的理论知识，又能亲身体验节能、舒适的实际效果。2019年，该项目获得了德国工商会（AHK）颁发的 “ 德国创新节能解决方案在中国建筑领域的典型案例奖 ”。

优势与机遇

太阳能光伏发电在建筑领域的利用具有很多优势，光伏发电过程产生的二氧化碳与其他温室气体（含氟气体、甲烷、六氟化硫）排放很低，光伏设备的安装对建设环境负面影响小，设备组件也可以集成到现有的建筑和基础设施中，从而缓解城镇空间紧张的问题。光伏设备维护成本低，具有较高的投资安全性。产能的盈余可以输入公共电网，减少城镇能源结构中化石一次能源的使用。

中国在光伏产业从原材料采购，到生产和市场推广应用都具有完整和成熟的产业链，为建筑领域光伏发电的推广提供了非常有利的条件。光伏补贴政策的转型从长远来看也可以推动市场的良性发展和结构优化。在光伏建筑一体化的发展领域，2016年住房城乡建设部组织编制及发布的《建筑节能与绿色建筑发展“十三五”规划》中提出，全国城镇新增太阳能光电建筑应用装机容量1000 万千瓦以上的主要目标，为光伏建筑一体化技术发展提供了广阔的发展空间 （住房城乡建设部，2017)。完整的光伏产业链为传统光伏产业向光伏建筑一体化的转型也提供了有力的支持。

劣势与挑战

光伏系统的产能效果受天气条件、时间和区位位置影响较大，夏季光伏系统产量约占全年总产量的三分之二，冬季光伏产能效果较差，同时城镇范围内用于铺设太阳能光伏系统建筑屋顶空间有限，也限制了光伏发电的进一步发展。此外，分布式小装机容量的光伏设备并网条件尚不完善，各地审批标准也不统一。在光伏建筑一体化方面，当前相关产品种类不丰富，市场选择少，商业模式不明确，并且缺乏光伏建筑一体化行业规范，包括设计、施工和验收的规范。

光伏发电在建筑领域的大规模应用还面临着不少挑战，首先是政策的转型使光伏补贴大幅降低，可能会导致企业在短期内以降低成本为目的减少对新技术和产品（如光伏建筑一体化）的研发，其次扩大光伏产能效应的关键因素之一是储能技术，当前储能设备的技术尚不成熟，投资成本较高。此外，光伏电池与蓄电池的生产和处理也可可能对环境造成负面影响。

3.1.2 小型风力发电系统

原理：

风力发电机将气流的动能转化为机械能。风力发电机由转子叶风轮、传动系统、偏航系统、液压系统、制动系统、发电机、控制与安全系统、机舱、塔架和基础组成。

形式：

小型风力发电在建筑领域中的应用主要是风力发电建筑一体化。

风力发电机依据旋转轴的种类分为水平轴风力发电机和垂直轴风力发电机。水平轴风力发电机基于风的升力原理，输出功率和效率主要受塔架的高度的影响。水平轴风力发电机的主要优点是效率高、容量大，而且可以很容易地扩大规模，进行大规模发电，但随着风力的增加，噪音也会增加，通常应用在城镇周边空旷区域。

相对于水平轴风力发电机，垂直轴风力发电机受风向影响较小，可布置在城镇范围内。城市环境中的风非常紊乱和多向，垂直轴风力发电机不受风向影响，可以从城市的湍流和多向风中产生电力。垂直轴风力发电机同时具有设计简单、低维护和制造简单的特点，可作为独立的单元或集成到电力网络中使用，易于模块化使用。

发展：

中国在全球风力发电发展领域处于领先地位，截止2019年底，全国风电累计并网装机容量达到21005万kW，年发电量4057亿kWh，占总发电量的5.5% (国家能源局, 2020)。中国风力发电以集中式陆上风电为主，分布式风电所占比例很低。

受到主流风力涡轮机的规模限制、风速、湍流、以及视觉和噪音干扰等影响，建筑领域的小型风力发电应用发展缓慢。

示范案例：

德国普福尔茨海姆市高层住宅楼

图10 德国普福尔茨海姆市高层住宅楼

（来源：www.dietmar-strauss.de）

该高层住宅楼建于20世纪70年代初，位于普福尔茨海姆主火车站对面。该建筑共9层，由16套公寓和底层的商业组成。在使用40年后，由来自路德维希斯堡的Freivogel Mayer建筑事务所对其进行了改造和扩建。翻新改造过程持续了18个月，通过改造该住宅建筑改善了保温和隔音，提高了使用者的居住舒适度，同时建筑师还将房屋加高了一层，创造了新的建筑空间。

在能源方面，建筑师在屋面上设置了太阳能光伏和小型风力发电设备，用于产生可再生电力。太阳能光伏设备表面面积为66平方米，由40块多晶光伏组件组成，能提供13.5kWp的动力。设置的垂直轴风力发电机的发电量为5千瓦。相比传统的水平轴风力发电机，使用垂直轴风力发电机更安静，隔音效果更好。

由于使用可再生技术和专门使用再生能源，该建筑二氧化碳排放量从66公斤/(平方米)减少到仅6公斤/(平方米)，年供暖需求量从200千瓦时/平方米减少到约14千瓦时/平方米，达到了被动房或德国复兴信贷银行集团KfW效率房55的标准（即建筑满足年度一次能耗需求不超过节能条例标准的55%）。

优势与机遇

建筑领域的小型风力发电属于城镇范围内的分散式风力发电，发电过程中二氧化碳和温室气体排放较低，产能方与用能方于同一区域，无传输或分配损失，对电网依赖度低。采用垂直轴风力发电机产生的噪音较小，可降低对建筑使用者的影响。在适宜的条件，可采用风光互补技术用于城镇照明。

劣势和挑战

目前建筑领域的小型风力发电还处于发展的初始阶段，城镇空间的风力可控性较低，风力发电的功率受天气影响较大，是制约大规模推广的主要因素，也因此造成风力发电投资稳定性较低。发展建筑领域小型风力发电，还需理念和技术层面的突破。

3.1.3 生物质能发电系统

原理：

生物质发电利用农业、林业、工业废弃物和城市垃圾为原料，采取直接燃烧或气化发电。

形式：

城镇范围内生物质发电的形式主要包括：

- 直接燃烧发电
- 城市垃圾发电

在建筑领域，生物质锅炉直接燃烧木质颗粒是主要形式。对于服务建筑供暖的小型热力发电机，木质颗粒是比较合适的燃料。家用壁炉中燃烧原木的排放量特别大，相比之下，现代自动颗粒加热系统的排放值相对较低，同时木质颗粒非常均匀，方便运输和储存。

发展：

生物质发电在可再生能源发电领域具有很大潜力，具有污染小、安全性高的特点。根据国际可再生能源机构的数据显示，2019年全球生物质能发电装机容量到

124GW，占整个可再生能源发电装机容量的4.9%（IRENA，2020）。在中国，截止2019年，生物质发电装机容量达到2254万千瓦，但主要还是采用垃圾焚烧发电的形式，占总容量的53%。

示范案例：

下奥尔姆市（Nieder-Olm）学校中心高能效电力与热力供应

图11 下奥尔姆市（Nieder-Olm）学校中心

（来源：EDG）

能源服务公司EnergieDienstleistungsGesellschaft Rheinhessen-Nahe（EDG）于2018年承接了原Hahn机场的供暖中心，这座供暖中心同时也为下奥尔姆市的一所警察学校中心提供热力。因为设施陈旧，EDG公司于2018年开始对热力和电力网络进行更新和优化，希望降低热力能源消耗以及成本。

在优化措施中，EDG公司采用了使用木屑的生物质锅炉，可满足约60%的热力需求，并辅助设置了高效的天然气热电联产机组和下游的冷凝热交换器。两个大型缓冲储罐通过EDG公司能源管理系统确保了热力供需的解耦。此外，储罐还能确保热电厂和生物质锅炉的优化运行。在供热网络的同时，EDG公司还在学校校园内建立了低压电网，使内部产生的热电联产电力可以直接用于供应建筑物。

优势与机遇

城镇领域生物质能源的利用可提供相对可靠和稳定的能源供应，生物质燃烧过程中的二氧化碳量很低，为城市循环经济发展提供了解决方案。为了进一步发展生物质能在城镇区域的利用，需要生物质燃料的生产供应，这就需要城镇与周边区域合作，如建设能源作物种植园，进而推动区域内生物质相关产业的发展。

劣势与挑战

生物质发电厂选址需要土地供应，对于城镇有限的空间是很大的挑战，同时基础设施和能源网络的投资成本较高，目前生物质发电厂的盈利能力还取决于补贴。此外，受大气环境保护政策影响，生物质供能存在政策限制。

3.2 可再生能源供暖与制冷

利用可再生能源为建筑供暖和制冷的主要方式包括：太阳能供暖和制冷，地热能供暖以及生物质能供暖。

3.2.1 太阳能供暖与制冷

原理：

在太阳能集热系统中，屋顶上的太阳能集热器吸收太阳辐射，将其转化为热量。这些热量被传热介质--水-防冻液混合物吸收，并由循环泵传递到锅炉房的热水箱。在储水箱中，载液通过热交换器将其热量传递给饮用水，并返回到集热器。在太阳辐射较低的时期(如冬季)，锅炉用热水箱中安装的第二个热交换器进一步加热水。水/防冻液混合物通过独立的管道系统与饮水回路完全分离，确保集热器在冬季不会被冻坏。太阳能集热系统的效率在30-60%之间，其中小型服务型热水系统的效率相对较低，大型系统（游泳池等）的设计效率约为60% (Genske, D. D., Jödecke, T., & Ruff, A., 2009)。

太阳能热的应用也可以扩展到制冷领域。为达到制冷目的，太阳能热能通常与吸收式冷却器结合使用。热流由太阳能集热器提供，冷却系统利用热流来驱动制冷循环，用于建筑物冷却和除湿。太阳能制冷在夏季可以有效降低电网高峰需求，减少停电和电网增强的成本。

形式：

太阳热能在建筑领域的主要应用方式包括：

- 单体建筑太阳能生活热水、采暖和制冷，
- 太阳能区域供暖

在建筑领域中，通常使用三种类型的太阳能集热器：平板集热器、真空管集热器(产生120℃及以下的温度)和低聚光集热器(120℃及以上至200℃)。在三种太阳能集热器类型中，平板集热器和真空管集热器的市场应用最普及。平板集热器由隔热层、选择性太阳能吸收涂层以及挡雨棚组成，其核心部件是吸热器，由黑铬、黑镍、氧化铝和氮氧化态等不同材料制成。真空管集热器由一排或多排双层玻璃管组成，两层之间有隔热真空。太阳能集热系统可以安装在建筑屋顶、外墙、阳台以及任何建筑外区域。

发展：

中国大部分地区的太阳能资源丰富，全国三分之二的国土面积年日照小时数在2200小时以上。光热利用方面，太阳能供热水发展起步较早，太阳能集热器装机容量长期保持世界领先，截至2019年，占世界总量的73% (IRENA，2020)。但2013年以后，中国太阳能集热器的市场需求逐年下降。相比太阳能供热水，太阳能建筑采暖发展较晚，试点项目也多在村镇地区开展，在城镇地区发展缓慢。

在政策层面，中国国家和城市层面推出了多项鼓励或强制性政策，其中2016年发布

的《太阳能发展十三五规划》提出了太阳能热水和供暖方面的主要目标和发展方向，很多省份和地区也推出了公共建筑建设中太阳能光热利用的强制性规定。

示范案例：

青海省海东市乐都区“丽水湾”被动式超低能耗居住建筑示范项目

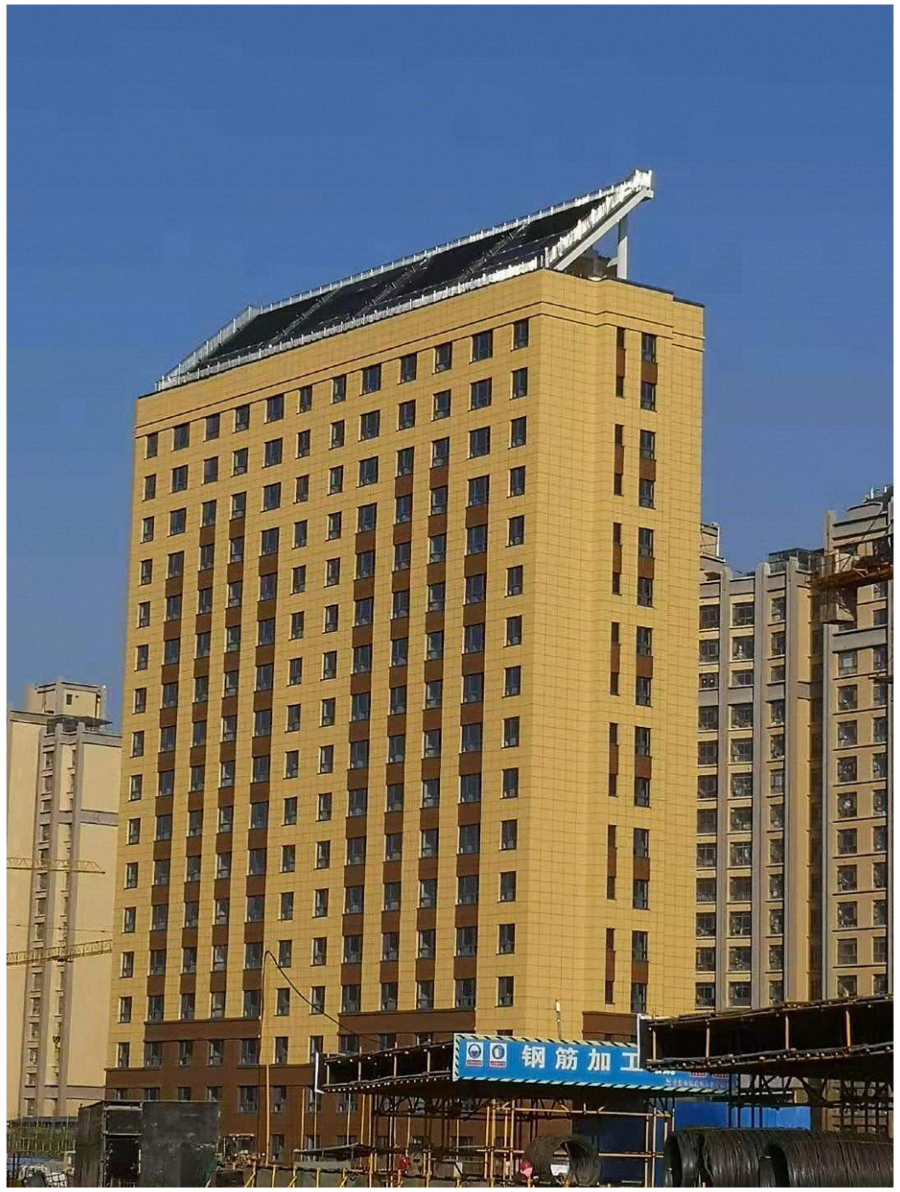

图12 青海省海东市乐都区“丽水湾”被动式超低能耗居住建筑

（来源：德国能源署）

青海省海东市乐都区“丽水湾”被动式超低能耗居住建筑示范项目，位于青海省海东市乐都区滨河南路 88 号，总建筑面积 11282.40 ㎡，示范面积 7926.42 ㎡，建筑体积 32205m3，体形系数为 0.27。该项目为超低能耗被动式住宅建筑，采用太阳能+空气源热泵的联合供暖系统，室内采暖由各层的新风系统完成，新风系统加热所需热源由屋顶集中的太阳能系统和空气源系统提供。该系统采用多能源互补技术，低温高效供热技术，实现太阳能热水单元和辅助加热装置的协同优化控制。优先利用太阳能、环境热源，以空气源热泵为补充能源，实现节能、环保、健康、可持续供应热水。

海东市位于中国西北部的青海省，而青海是中国太阳能资源最为丰富的地区。海东丽水湾馨城项目是典型的高层住宅建筑，通过充分利用光热技术（真空管集热器面积 $352m^2$），可以完全满足生活热水需求，并辅助空气源热泵进行采暖。经前期能耗模拟计算论证，超低能耗建筑技术与可再生能源利用相结合来满足高层建筑用能需求的方案是可行的。该项目目前也是中国西部欠发达地区打造气候友好型建筑的灯塔项目。

优势与机遇

太阳能热水和采暖系统可以与建筑实现有机结合。除了在屋顶设置以外，还可在高层建筑采取嵌入式、壁挂式、遮阳板式等多种形式，满足光热建筑一体化发展的需求。

对于纬度较低的地区来说，单独的太阳能集热系统可以满足100%的住宅生活热水需求。在辐照季节性变化较大的高纬度地区，该系统能提供20-60%的生活用水和空间供暖的热量需求，需要辅助配置季节性储存系统。

除了光伏建筑一体化，太阳热能在区域供暖中的应用也为城镇提供了供暖节能解决方案，对于中小型城镇具有很大发展潜力。在这一领域，北欧国家多年来的发展经验值得研究和借鉴。

劣势与挑战

光热建筑一体化目前还没有完整的技术标准体系和规范，与光伏一体化一样，产品技术水平参差不齐。同时由于光热建筑项目涉及了开发商、设计院、投资方和建筑使用者等多个参与者，光热建筑一体化项目的开展也面临着协调不同参与者利益冲突的挑战，如太阳能供热制冷系统的后期运维问题。

3.2.2 地热能供暖和制冷

原理：

在浅层地热能利用中，水平集热器安装在开阔地带、浅层地表（深度为1至2米）。垂直安装的地热探头深入地下利用地热能。在这两种情况下都通过热泵将地热带到所需的较高温度水平。当热泵的驱动力也来自可再生能源，就实现了可再生供暖。衡量热泵效率的标准是性能系数（COP），表示产热量与热泵所需总能量之比。

形式：

在应用方面，地热能的直接利用可以纳入城镇区域供暖和制冷系统，或者在热量需求达不到投资新建热力网络所需总量的情况下，作为独立的系统安装在单个建筑物或建筑群中。

提取地热能，主要通过热泵的使用。常见的热泵主要分为埋管式地源热泵系统、地下水热泵系统和地表水热泵系统。地埋管地源热泵通常采用水平埋管或垂直埋管，在冬季时将地表下恒温土层中的低位热能提高为高位热能，为建筑进行供暖，同时也可在土层中储存冷量，用于夏季制冷。地下水热泵和地表水热泵均是通过直接抽取或间接换热的方式，利用地下水或河流以及地表河流湖泊作为热泵的冷热源。

发展:

自2010年以来，全球直接利用地热能的装机容量增加了一倍多，截止2019年，在88个国家部署的地热能装机容量达到107727兆瓦特（MWth）。这一增长主要是由地热（地源）热泵的提升推动的，占总装机容量的71.6% (IRENA, 2020)。

中国地热能资源量丰富，浅层地热能和水热型地热能利用发展迅速。2010年以来，浅层地热能利用以年均28%的速度递增，截至2019年年底，浅层地热供暖（制冷）建筑面积达到约8.41亿平方米。北方地区中深层地热供暖面积累计约2.82亿平方米。水热型地热能利用以年均10%的速度增长，截至2018年，全国水热型地热能供暖建筑面积约为1.65亿平方米 (水电水利规划设计总院, 2020)。

示范案例:

德国柏林潘科（Pankow）“天与地”地热混合设备系统

图13 德国柏林潘科（Pankow）“天与地”地热混合设备系统

（来源：Geo-En Energy Technologies GmbH）

柏林潘科（Pankow）地区的“天与地”新建项目用“地热混合设备”覆盖了70户人家的供暖需求。该系统包括20个盐水水源地热探头和一台100千瓦的热泵，并与一个天然气驱动的热电联产机组（33 kWel，71 kWth）和350平方米的太阳能吸收器相结合。地下探头获取的热能经由热泵进入低温储能设备，加热到40°C后进入地暖系统，为房屋供暖。饮用水加热可利用热电联产机组的高温储能设备所提供的热力。热泵的能源需求通过热电联产机组来满足。

总体上来看，该项目的热力需求56%通过热泵、40%通过热电联产机组，4%则通过峰值负荷锅炉来满足。同时，该项目还测试了纯地热能热泵和使用建筑余热的解决方案。由于投入成本和运营成本过高，项目组决定结合热电联产机组采用混合式的方案。目前项目的热力成本低于5欧分/千瓦时，二氧化碳减排量达到约20%。

该项目的实施是一项巨大的挑战，尤其是要考虑防火、隔音、能源系统规划、建筑等多方要素的相互作用，因为要把这样一个项目工程的整体规划付诸实践，需要许多专业知识。该设备系统已于2015年投入运行。

优势与机遇

地热能具有资源分布广、清洁低碳、稳定可靠等优势，应用技术较成熟，非常适宜在新建建筑、园区和城市区域安装。中国地热能资源丰富，地热能是解决当前供暖造成的雾霾问题的有效途径。同时地热能供暖的利用也扩大了供暖区域，可为中国南方地区供暖提供热源。

近年来，中国政府也推出了多项政策和法规用于支持地热能的开发利用，并推动城镇层面的相互合作，如2017年颁布的《京津冀能源协同发展行动计划2017-2020年》中，明确了在京津冀新增用能区域，支持以地热能、风能、太阳能为主的可再生能源开发。

此外，相比于浅层地热能，深层地热能如干热岩型地热能的利用可以在更大深度上挖掘热能，为整个城镇区域提供供热热源。虽然目前发展处于起步阶段，但通过深层地热能应用技术的发展，具有很大的发展潜力。

劣势与挑战

在城镇区域利用浅层地热能和水热型地热能受到空间和经济因素的影响较大，如地源热泵水平埋管占地面积较大，热泵系统增量成本过高，节能回报年限过长等。

发展深层地热能资源更需要精确的地质勘查，中国目前还面临勘查基础薄弱、评价结果精度低的问题，还需要进一步增加财政投入力度，以及多部门间的协同合作以及监测体系的建立。

3.2.3 生物质能供暖系统

原理:

生物质固体成型燃料高效燃烧时能产生较高比例的热量，可用于建筑供暖。热量供应是通过两个发电机组件来实现的。供热负荷主要由固体燃料锅炉燃烧木屑或其他固体生物质来承担。根据天气情况，采用太阳能热力上网，在夏季覆盖基本负荷。此外，剩余的热能还可用于农业生产，如育肥场。

形式:

在城镇领域，生物质能供热主要采用生物质能供热与生物质发电结合的热电联产模式。

示范案例：

德国联邦议会

图14 德国议会大厦

（来源：德国能源署）

二十世纪九十年代，柏林德国议会大厦的改造应用了一项能源方案，使建筑群中的议会大厦提高了对可再生一次能源的使用率。电能由生物柴油驱动的热电联产机组生产，发动机的余热和废气被用于制热。生物柴油由油菜籽制成，油菜籽来自距离柏林不远的种植区。此外，冬季还有4个供暖锅炉可用于供热。

夏季，吸收式制冷机把发动机的余热收集起来，用于给大厦降温。春季和秋季既没有供暖也没有降温需求，多余的热能就被泵入地下的地热能存储器中。有能源需求的时候，可以通过热泵再利用这部分能源。热力提取后，水冷却下来并作为冷力储能器保存在地下约60米深的地方。这些水在夏天用来给大厦降温。

议会大厦还为电力供给安装了大约3600平方米的光电池模块。最初几年里，这套系统的运行得到了不断的优化。运行经验表明，热电联产机组生产的大约60%热力可存储后被再度提取利用。

基于对当地的地质环境以及建筑特定功能的考虑，利用地下室作为制热和制冷的储能设备是比较特殊的方案。对于其它建筑类型而言，储能设备也是采用生物质能供暖制冷系统所需要考虑的。

优势与机遇

生物质能供热具有布局灵活、适用范围广的特点，在治理大气污染、发展清洁供暖方面具有很大潜力。中国生物质资源丰富，也为发展生物质能供热提供了很好的资源条件。在满足资源循环利用的前提条件下，城镇区域发展生物质热电联产，可发展如生活垃圾焚烧热电联产项目。2017年，中国国家能源局发布《促进生物质能供热发展的指导意见》，为中国发展生物质能热电联产提供了政策支持。

劣势与挑战

目前，生物质热电联产项目在经济性上还主要依靠可再生能源补贴，经济性较差，且占用空间较大。另外，如同其他可再生能源采暖制冷技术，储能设备也是生物质采暖制冷系统设计的关键环节，需要理念、技术、规范和商务模式层面的突破。

4 推广建筑领域可再生能源利用的基础和保障

根据以上对于分布式可再生能源的分析以及案例的展示，可以看到推广建筑领域可再生能源利用，需要政策、法律、规划和技术层面的保障。

4.1 宏观层面

推动可再生能源的利用，城市在宏观层面可采用的措施主要包括：

- 扶持性政策，包括减少可再生能源投资行政许可方面的阻碍，改善可再生能源企业的经营环境
- 财政和金融激励措施，包括与可再生能源利用相关的税收制度改革，鼓励在可再生能源领域的投资选择
- 可再生能源技术条例和建筑法规，包括针对新建建筑和公共建筑的节能法规制定，强力推动可再生能源的利用
- 采购和直接投资，包括市政府对可再生能源技术的购买和直接投资，以及市政府对城市地区扶持性基础设施投资的支持

4.1.1 中国能源转型战略

中国在推动可再生能源利用领域最重要的政策基础是能源转型战略。2016年12月，中国国家发展和改革委员会正式发布《能源生产和消费革命战略（2016-2030）》，明确了中国能源转型的主要目标和方针，其中与可再生能源利用相关的包括 (中国国家发展和改革委员会，国家能源局, 2016)：

- 推动能源供应多元化，着力优化能源结构，加快形成煤、油、气、核、新能源和可再生能源多轮驱动、协调发展的能源供应体系；
- 在2021至2030 年期间，持续增长可再生能源。能源消费总量控制在 60亿吨标准煤以内，非化石能源占能源消费总量比重达到 20%左右，天然气占比达到 15%左右，新增能源需求主要依靠清洁能源满足；
- 全面优化建筑终端用能结构，大力推进可再生能源建筑应用；
- 结合新型城镇化建设，拓宽电力使用领域，优先使用可再生能源电力；
- 淘汰煤炭在建筑终端的直接燃烧，鼓励利用可再生电力实现建筑供热（冷）、炊事、热水，逐步普及太阳能发电与建筑一体化；
- 推进用能权、碳排放权、可再生能源配额等网络化交易，发展能源分享经济；
- 坚持分布式和集中式并举，以分布式利用为主，推动可再生能源高

比例发展。大力发展风能、太阳能，不断提高发电效率，降低发电成本，实现与常规电力同等竞争；

- 在具备条件的建筑、产业园区和区域，充分利用分布式天然气、分布式可再生能源，示范建设相对独立、自我平衡的个体能源系统；
- 鼓励风电、太阳能发电等可再生能源的智能化生产；
- 推广超低能耗建筑技术，发展新型保温材料、反射涂料、高效节能门窗和玻璃、绿色照明、智能家电等技术，鼓励发展近零能耗建筑技术和既有建筑能效提升技术，积极推广太阳能、地热能、空气热能等可再生能源建筑规模化应用技术；
- 鼓励可再生能源电力优先就近消纳，充分利用规划内输电通道实现跨区外送。

4.1.2 可再生能源法

中国在推动可再生能源利用领域最重要的法律基础是2006年1月1日开始实施的《可再生能源法》。其中与城镇范围内建筑领域可再生能源利用相关的规定包括：

- 鼓励和支持可再生能源并网发电；
- 鼓励清洁、高效地开发利用生物质燃料，鼓励发展能源作物；
- 鼓励单位和个人安装和使用太阳能热水系统、太阳能供热采暖和制冷系统、太阳能光伏发电系统等太阳能利用系统；
- 房地产开发企业应在建筑物的设计和施工中，为太阳能利用提供必备条件；
- 国家财政设立可再生能源发展专项资金，用于支持可再生能源开发利用的科学技术研究、标准制定和示范工程及促进可再生能源开发利用设备的本地化生产。

4.1.3 城镇综合能源规划与单项可再生能源利用规划

推动建筑领域可再生能源的利用不能只靠单一项目的累积，更需要在城镇层面运用合理的城市规划工具。城镇综合能源规划的制定有助于在城镇规划的早期阶段对可再生能源利用的可行性进行研究，分析结果可用于指导后期规划阶段可再生能源系统运行规模和形式的设计(如规模和运行)，并影响城镇可再生能源战略的制定。

此外，针对单项可再生能源在城镇建筑领域的利用，也需要制定与城市规划相结合综合利用规划。例如在推动光伏建筑一体化方面，需要将光伏建筑一体化方案纳入城市总体规划体系，在城市层面对于光伏的发展进行定位并辅以具体的保护和鼓励措施。

示范案例：

慕尼黑市能源利用规划（Energienutzungsplan- ENP）

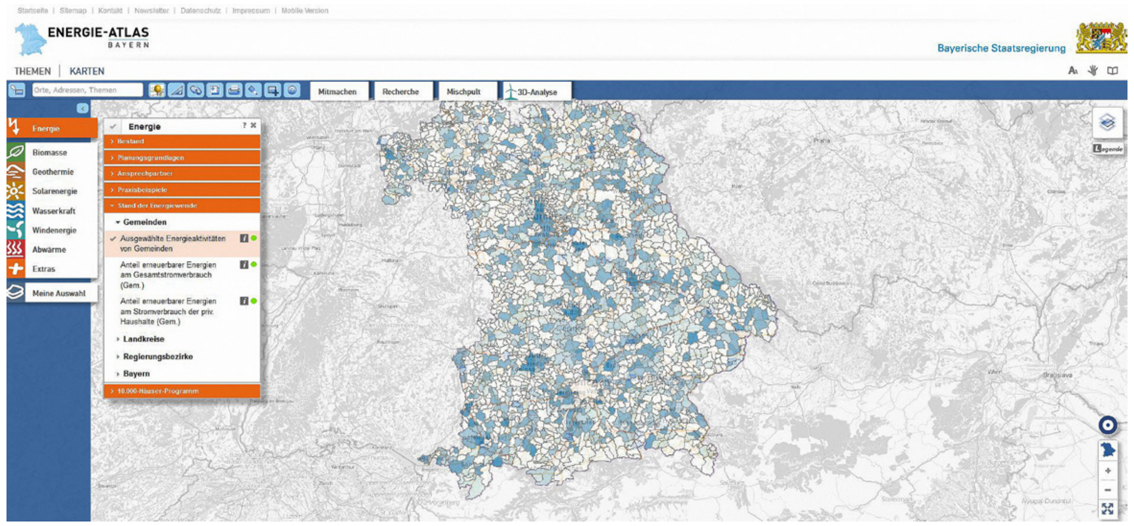

图15 巴伐利亚州城镇能源地图集

（来源：https://www.energieatlas.bayern.de/）

能源利用规划是一项指导城镇能源发展策略制定的规划工具，提供了城镇当前和未来能源需求的相关信息，并与城镇空间规划相结合。2008年，在德国巴伐利亚州政府的财政支持下，研究项目“城镇气候保护 – 面向未来的慕尼黑区域能源方案”选取了包括慕尼黑市及周边城镇一共七个城镇，为其制定城镇能源利用规划。

相较于传统的城镇土地利用规划，城镇能源利用规划将能源与土地利用相结合，展示了城镇空间内减少能源消耗、提升能源效率、增加可再生能源利用的可能性。例如太阳能潜力图和房屋供暖需求图显示了使用可再生能源的潜力。在城镇能源利用规划的帮助下，城镇可以检查开展的与能源相关的具体实施项目或投资计划是否合理，以及城市建设项目中是否已经包括了提升能效方面的考虑。

示范案例：

柏林太阳城市(Solarcity)总体规划

图16 专家团队向参议院Ramona Pop提交柏林太阳城市总体规划

（来源：BerlinerSenat, Solar Zebralog, Julia Fielitz）

自2018年11月以来，来自太阳能及能源、住宅行业、相关协会、科研和政府等部门的26名专家作为专家组与弗劳恩霍夫研究所(ISE)开展合作，开展了应柏林州参议院经济、能源和企业部要求编制太阳城市(Solarcity)总体规划的工作。在7次专家组会议以及多次深化主题的会议后，专家组讨论了柏林扩大太阳能利用规模的障碍和机遇，并制定了9个行动领域的27项措施。2019年9月4日，该总体规划由专家组递交给州参议院，宣告了历时十个月的太阳能城市(Solarcity)总体规划出炉，并正式进入实行阶段。

该规划是柏林为满足2050年实现气候中和目标的一项重要手段，其目标为通过加大部署光伏组件的面积，在2050年之前用太阳能发电供应柏林市约25%的电力需求。规划的主要实现手段包括: 信息、咨询、宣传; 打破障碍; 从经济上提高太阳能光伏发电效益; 对市场的支持; 强化市场主体; 增强伙伴合作关系; 示范项目; 改善框架; 对总体规划进行协调和监督执行情况九个领域。

4.2 技术层面

电气化是建筑领域能源利用发展的主要趋势，为了适应可再生能源的特性，城镇需要配备灵活稳定的电网系统。利用分布式能源系统，也可以有效实现能源的梯级利用。此外，考虑到可再生能源产能的波动性，还需要配以合适的储能设备。

4.2.1 灵活稳定的数字化电网系统

图17 智慧电网

（来源：shutterstock.com_metamorworks）

在城镇领域实施可再生能源方案，需要考虑到可再生能源可变性的特点，因此城市能源基础设施，特别是电网系统，必须具备一定的灵活性，并拥有整合其他部门如供暖和制冷以及交通的能力。

与此同时，数字技术在电网系统中的应用，如自动化监控和运行，使大幅增加可再生能源技术的效率。平衡带负荷的可变可再生能源，如太阳能光伏和小型风力发电机，可通过数据驱动的预测技术、储能系统、电动汽车和其他部门耦合技术，使可再生能源利用更多地融入本地能源系统。

智能电网是集成了先进的传感和测量技术、通讯技术、信息技术、计算机技术和控制技术应用的新型电网。智能电网可以解决分布式光伏发电与公共电网兼容性的问题。在建筑领域，通过智能电网的优化运行和管理，在不对建筑物进行重大硬件改造的情况下，可以节省建筑物能源消耗。

4.2.2 分布式能源系统

分布式能源系统是利用小型设备向用户提供能源的供应方式。与传统的集中式能源系统相比，分布式能源更接近负荷，可减少能源传输损失，节约输配电建设投资和运行费用，同时兼具发电、供暖等多种能源功能，可以有效地实现能源的梯级利用。

以太阳能光伏发电系统为例，城市区域的分布式太阳能光伏系统可以集成在人口密集区域的新建和现有的建筑物中。分布式的光伏系统可以避免长途电力传输损失，模块化配置光伏设备，使光伏设备在较小规模上表现良好。

高密度的城镇区域适宜采用区域供暖，目前全球90%的区域供热需求还是通过采用化石燃料的热电联产和供热厂来满足，但有可再生能源参与的区域供暖比重近年来也在逐步提升，这主要归功于新一代热网技术允许使用低温热源(通常低于70℃)，如可再生能源(包括太阳能和地热)，与蓄热系统和电热泵相结合。当区域供热网需要低温供应时，可以使用热泵来提高系统效率并由此产生较好的经济效益。

4.2.3 储能技术

图18 Kiebitzberge室外游泳池综合体中带有热泵和缓冲储罐

（来源：Oliver Buchin）

可变可再生能源如太阳能和风能的供应存在间断性的特点，因此解决储能问题是扩大可再生能源生产规模的关键。可再生能源与冷热能储存技术结合，可提高能源使用效率。例如使用可再生能源过剩时的电力来制冷，储存在储冰罐中，在用电高峰期时释放存储的冷量来代替电力制冷；在日间太阳能热能过剩时，用蓄热器储存过多的热能，在夜间通过换热器释放储存的热能供热。通过集成中央蓄热系统，典型的基础负荷锅炉（如木材和太阳能或其他可再生能源）可以实现更高的热能利用率，从而降低高峰负荷锅炉（如天然气）的尺寸，从而更具成本效益。在区域供暖系统中，分散的储存设施也可以缓解系统压力。

5 大规模推广建筑领域使用可再生能源的建议措施

不同类型的可再生能源在建筑中的应用方式和产能效果均有不同。因此，为实现建筑领域可再生能源利用的大规模推广，一方面需要针对单项可再生能源提出创新的发展理念，如光伏建筑一体化，另一方面也应挖掘建筑组群/园区中多种可再生能源利用方式相互协作的潜力，如实施园区一体化方案，实现集群效应。此外，对于一些特定的可再生能源利用如地热能、生物质能和风能，城镇也应积极与周边区域合作，推动优势互补。

5.1 技术层面措施

5.1.1 光伏建筑一体化

光伏建筑一体化(building-integrated photovoltaics BIPV）指将光伏组件整合在建筑的围护结构，如屋顶、幕墙、遮阳等之中，使得建筑的围护结构在满足自身的功能要求同时，亦能够通过光伏组件产生电力。这样的太阳能组件作为建筑的一部分，成为建筑围护结构中不可缺少的一部分。

光伏建筑一体化的发展始于德国等欧美国家，它的推动和规模化发展离不开鼓励政策的颁布。德国的光伏一体化建筑最早始于阳光房，1990-1992 通过“1000光伏屋顶计划”首次由联邦和各州对光伏设备的建设提出要求。1999-2003年底，“100000”光伏屋顶计划写入可再生能源法（EEG）-太阳能发电可得到市场支持，随后逐渐规模化发展起来。日本从1994年开始实施“七万屋顶计划”，每套容量4kW，总容量200MW。2011年东日本大地震后，光伏在建筑上的应用进一步推动。美国1997年实施“百万屋顶计划”，计划从1997年开始至2010年，将上百个屋顶上安装容量达到305MW的光伏系统，并使发电成本降低到6美分/kWh。

通过建筑与光伏一体化，可以达到在源头上降低建筑能耗的目的。并且，光伏建筑一体化还具有以下优点:

- 建筑围护结构为能源生产提供了很大的空间，不需要额外的空间，从而提高了空间的利用率；
- 与建筑搭载太阳能光伏相比(BAPV),将太阳能光伏组件整合进建筑围护结构，省去了二次投资购置并安装太阳能组件的成本，降低了能源生产和运行的成本，具有较强的经济性；
- 太阳能光伏组件作为围护结构的一部分，加强了围护结构自身如遮阳，保温等性能。

示范案例：

弗莱堡市政厅

图19 搭载屋顶光伏系统，屋顶光伏光热混合系统和幕墙光伏系统的弗莱堡市市政厅

（来源：Fraunhofer ISE）

弗莱堡市政厅于2017年竣工，地上6层，建筑面积22650平方米，是目前欧洲最大的“零能耗建筑”。该建筑的整个外围护结构整合利用了太阳能技术。在外幕墙处设置了光伏组件，屋顶设置了光伏组件与光伏光热混合组件，可同时提供电力和热能。光伏组件总面积约13000平方米。光伏为建筑的照明、自用电能、热泵、电采暖、充电桩采暖提供了能源，并与公共电网相连。制冷采用两台地源热泵。通风概念采用带热回收的新风系统以节约能耗。行政大楼的一次能源需求只允许在45千瓦时/平方米左右，这相当于比普通的现代办公大楼减少了40%的需求。

在立面设计上，光伏整合在当地生产的松木基层上，由铝合金龙骨进行支撑，作为自然通风的幕墙构件与普通玻璃交替排列，形成了建筑立面的鲜明特色。将松木外幕墙与光伏的整合，是美学与使用功能完美结合的一个经典案例，这个幕墙组件不仅美观，而且可以产生电能，并具有遮阳、通风的功能。大约880块太阳能电池板以偏置、垂直投影的模块（3.5米长x0.7米宽，重约100公斤，输出功率215.6kWp）集成到外墙。太阳能电池之间留7毫米透明缝隙对后面的木质元件形成了高透明度。

5.1.1 近零能耗建筑及产能建筑（群）

近零能耗建筑是指建筑适应气候特征和场地条件，通过被动式建筑设计最大幅度降低建筑供暖、空调、照明需求，通过主动技术措施最大幅度提高能源设备与系统效率，充分利用可再生能源，建筑能耗水平较国家标准降低60%-75%以上。

目前，已有各种措施推出促进近零能耗建筑在全球范围内的发展，例如2018年发布的《C40零碳建筑宣言》中，全球25个城市的市长，承诺从2030年开始，所有新建建筑都将是零碳建筑，到2050年所有新建和现有建筑都将达到这一标准 (C40 Cities, 2018)。

在更广泛的范围内，"零能耗区"的概念已在城市中得到普及。建立这种地区的目的是为了最大限度地提高能源效率，并在地区一级而不是在单个建筑物一级使用可再生能源，从而实现规模经济，提高成本效益。区域一级的净零能源项目提供了机会，通过能源平衡、大宗采购、区域供暖和制冷系统以及面向移动性的发展，优化建筑物的集体能源使用。

产能建筑概念是在光伏技术发展的推动下产生的。德国针对产能建筑给出了比较清晰的定义：“能产生多于其住户所消耗能量的住宅”。“产能”的意思是能源供应100%依靠可再生能源，并且建筑运行完全无碳排放。此外，盈余的太阳能发电量输入公共网。

产能建筑群，拟将建筑的产能目标融合进社区规划设计初期，以近零能耗建筑定义为基础，通过在方案、设计、建设、运维全生命周期的建设实施及外部能源的补入等，最终实现在以年为计算的周期内，社区整体的产能大于耗能。概念中的产能对象为建筑群，并不代表每一栋建筑均为产能建筑只要保证建筑群获得的能源大于消耗的能源即可，是对环境、建筑群整体的评判。

示范案例：

苏州同里湖嘉苑被动式低能耗建筑改造项目

图20 苏州同里湖嘉苑被动式低能耗建筑改造项目

（来源：德国能源署）

苏州同里湖嘉苑居民住宅改建为被动式低能耗建筑项目，是住房和城乡建设部科技与产业化发展中心和德国能源署在中国联合提供全过程质量控制的第一个既有建筑改造类项目。改造过程中，通过性能化设计的方法，优化围护结构的保温、隔热和遮阳性能，同时加装高效全热回收新风系统，改造后的建筑在提高居住舒适度的同时，最大程度地减少供暖和制冷的能源需求，实现终端能源需求39.65 kWh/(m²·a)，总一次能源需求118.95 kWh/(m²·a)。节能率达到 90% 以上。

同时，新能源微网系统的建立、房屋顶部光伏设备的铺设，不仅实现了家庭用能

的自给自足，还可以给用户带来可靠的经济效益。而小区公共微网系统的建立，更是为小区的公共照明提供了清洁电。直流供电的5号别墅应用微型能量路由器，实现对电力网络能量流的主动管理。别墅配备10kW的双向直流充电桩与微网系统直接相连，以移动储能的方式，实现了与用户之间的能量双向流动。而相邻的3号别墅应用交流微网系统，配备了光储一体机，实现了光伏和储能的即插即用，交直流的供电对比带来更直观的节能体验。

5.1.1 城区/园区一体化发展

一体化的城区/园区解决方案能够结合各种可再生能源技术，优化能效潜力的运用。在一体化方案中，分布式生产的电力和微电网（Micro Grid）与不同能源生产、能源消耗和能源储存单元相连接，让能源生产和能源需求尽可能达到协调状态。能源生产单元主要包括太阳能发电设备、热电联产机组、太阳能热设备和电转热设备（空气或热泵、电热锅炉），能够确保系统的高度灵活性，并连接电力和热力供给。也可以考虑使用小型风力发电设备。集成了电动汽车的充电站后，可再生能源生产的电力可用于交通。方案核心元素还包括暂时存储电力和热力且在需要时提供能源的储能系统。通过实施一体化城区/园区发展，城区/园区自给自足的能源供给比例能够得到显著提升，可再生发电也能获得更好的集成。这里的热力和电池储能设备并不仅仅供应单栋楼宇建筑，而是能够得到更为高效的利用，规模效应也使它们比单独的房屋储能设备更具有成本效益。

以德国为例，目前城镇住宅区域已经开展了一系列的能源一体化供给示范项目。为了进一步的发展，一体化项目需要扩展用地类型和规模，与商业或者工业相结合，例如利用工业余热对城区/建筑园区进行热力供给。

示范案例：

柏林欧瑞府能源科技园区

图21 欧瑞府能源科技园区

（来源：Christian Kruppa/EUREF）

欧瑞府能源科技园区位于德国柏林市Schoeneberg区，占地面积55000平方米，建筑面积约16万平方米。园区原址为一处废弃的天然气厂，欧瑞府集团（EUREF AG）于2007年收购该地块后，通过众多能源和交通领域的国际企业、初创企业和研究机构的落户，促进气候中性的能源供应、智能能源网络、节能建筑、电动交通测试平台及众多研究项目的实施，将欧瑞府零碳园区建设成为能源转型的实验场所。2014年，欧瑞府园区实现了德国政府提出的2050年二氧化碳气候保护目标。

欧瑞府园区的能源供应是二氧化碳中性的，其核心是热电联产的应用。生物甲烷的燃烧带动发电机发电，产生的电力直接输入柏林电网。发电产生的余热用于园区建筑供暖和加热生活热水。园区地下铺设有长2.5公里的供热管道，可将90摄氏度的热水通过管道送到建筑中。园区建有采用人工智能技术的能源中心，收集和分析园区内约1000个数据点提供的数据和信息。园区同时设置了太阳能光伏和小型风力发电设施，并通过应用Power-to-Heat/Cold技术，将多余的电力储存起来。欧瑞府园区项目，证明了能源转型在技术和经济性上都是可行的。

5.2 宏观层面措施

5.2.1 城镇跨行政部门合作

推动建筑领域可再生能源利用需要城市各负责部门、单位的参与和配合。在很多城市，气候保护主题由环保部门负责，可再生能源主题由能源局负责，建筑节能主题由住建部门负责，前期规划由规划和国土资源部门负责。各个行政部门分工与责任不同，实施建筑领域可再生能源项目的积极性和参与度也不同。如果只由单一部门作为主力负责部门，在规划和协调措施和活动时，与其他部门的合作容易出现目标和行动不一致等问题。因此在制定城镇领域的可再生能源发展计划和开展实践项目时，必须要求城镇各部门之间的相互协作，如在制定城镇规划时必须将可再生能源利用的相关内容明确纳入规划中。

5.2.2 城镇区域与周边非城镇区域合作

城镇人口聚集，空间狭小，建设密度高，因此即使在大幅提高能效、减少能源需求的情况下，也很难由其范围内生产的可再生能源满足其所有能源需求。要实现100%的可再生能源目标，就需要与城市周边区域（通常是农村）合作。拥有充足资源（森林、风能、农业废弃物等）和空间的农村地区将能够像生产粮食一样生产能源，并将剩余的能源出口到资源不足、无法满足其所有需求的能源密集型城镇地区。因此，必须在城镇和周边非城镇区域之间建立一种双赢的关系，以促进合作项目的开展，并确保所有各方的利益。如在环保政策允许的前提，可以将发展生物质能放在城镇周边区域。

5.2.3 公众参与

可再生能源的利用，无论是分散布置的太阳能光伏和光热以及小型风力发电设施，还是地热能的开采和生物质能发电和供暖，都对建筑使用者有一定的影响，同时，日常生活的许多方面，如住房、照明、交通和消费等，都会受到倡导可再生能源利用的影响。因此，在开展城镇可再生能源项目时，需要尽可能地让所有利益相关者都参与进来，这也是确保项目成功实施的先决条件。在促进公众参与方面，可以制定和落实一些列措施。例如，德国从2017年开始实施的“租户电力”模式，住户直接使用建筑上光伏设备所生产的电力，电费相比市价更便宜，房屋所有者也通过收取销售的电费获得收益，租户电力模式增加了房屋所有者和住户使用光伏设备的积极性。经验表明，当人们参与决策过程并对新项目有经济利益兴趣时，将有助于创造新的商业模式，因此推动可再生能源利用的项目应该从准备阶段开始就开展公众参与活动。

6 适宜推广建筑领域可再生能源利用的城镇和区域选择标准及工作框架

根据德国能源署十多年来在中国开展建筑节能和生态城市合作的经验，搭建一个多层面的工作框架将有助于推广建筑领域可再生能源利用的开展与落地。其内容包括：与合作伙伴共同选定示范技术和项目、协助地方推动可再生能源发展管理体系建立、并在具体示范项目合作的实践经验基础上为城镇提供政策和标准建议。

6.1 城镇和区域选择标准

- 当地有超低能耗、零能耗建筑完成项目经验
- 有地方绿色建筑或可再生能源利用政策措施
- 有气候和地域代表性，可以在一定区域范围内推广经验和带动周边地区发展
- 有国际合作经验

6.2 工作框架

在为试点城镇和区域制定工作框架，建议从点到面，首先从开展示范项目作为开始，展现项目效果，逐步推动管理体系的建立，并最终辅助城镇相关政策和标准的发布。

6.2.1 选定示范技术和项目

- 规划审查和深化
  在城镇选取需要开展的可再生能源项目和应用技术时，应首先对与城镇能源相关的规划进行审查和深化，如制定与城镇规划相匹配的能源利用规划以及可再生能源发展战略，作为具体项目实施时的政策基础。

- 参与方讨论及立项
  城镇部门之间缺乏协调、缺乏当地合作伙伴、市民以及周边社区的参与也会阻碍项目进展。因此，在城镇区域引入可再生能源不仅是一项技术和财政挑战，还需要所有参与者之间不断交流信息和保持高度的透明度。对此，城镇在开展项目时可建立参与者平台，让所有受影响的政治、经济和社会机构和个人从项目开始阶段就可以参加。

- 项目资金支持及落实

  要实施建筑领域可再生能源利用的概念和方案，首先必须消除主要的障碍--资金瓶颈。由于预算紧张，许多城市在没有财政支持或只能削减其他重要活动领域的情况下，无法大幅增加用于节能和气候保护的财政资源和人员配置。它们必须更多地利用外部资金来源，以提高它们在这一领域的行动能力。这些补贴来自各级政府的补贴。

利用外部资金为城市节能措施提供资金的可能性之一是动员商业化投资。例如，可以通过资金和咨询措施，通过节能或能源合同管理、公私合营（PPP）或在新的建筑项目开发中对节能标准提出具体要求来实现。

- 质量保证服务和项目过程监测

  在建筑领域项目实施过程中，为项目提供全程同步质量保证服务可确保项目达到目标效果。质量保证服务主要包括设计过程中方案的优化设计以及施工过程中的对参与人员的培训和施工质量的审查。项目运行使用过程中，需建立项目运行监测系统，及时收集项目数据并进行分析，进一步优化项目运行。

6.2.2 地方推动可再生能源发展管理体系建立

借鉴德国能源署在德国和国际推广城镇建立“能源和气候保护管理体系”（Energie- und Klima-schutz Managementsystem/EKM）的经验，推动城镇领域可再生能源利用工作的框架内容主要包括：

- 建立负责可再生能源发展的组织构架
  - ▹ 建立永久性或临时性的工作领导小组，明确资源和责任分配
  - ▹ 尽可能将所有与项目管理相关的参与方整合在一起，特别是相关的职能机构
- 制定可再生能源利用的未来愿景
  - ▹ 为城市提供一个长期的、可以量化的可再生能源发展目标
  - ▹ 为可再生能源利用的相关措施提供政策基础
- 对城市可再生能源利用现状进行初步分析
  - ▹ 分析、评估能耗现状以及可再生能源发展潜力
  - ▹ 完成可再生能源利用分析报告
- 定义可再生能源发展目标并规划实施措施
  - ▹ 定义城市在可再生能源领域短期、中期和长期的发展目标
  - ▹ 通过现状分析得出的节能潜力来确定实施措施
  - ▹ 总结已经实施的典型措施
  - ▹ 确定描述措施及选取措施的工具
- 明确实施措施及财政规划
  - ▹ 为确定的实施措施制定时间规划
  - ▹ 制定财政规划时，要考虑财政补贴及其他第三方融资模式的可能性
- 采取措施实现目标
  - ▹ 持续监测，及时对措施实施进行反馈
  - ▹ 对已完成的措施实行评估

图22 德国能源署能源与气候保护管理体系

（来源：德国能源署）

6.2.3 为城镇提供政策和标准建议

推动市场向低碳、零碳及产能建筑解决方案发展需要强有力的政策。这包括传统的政策工具如强制性的能源性能标准，以及更多创新的政策框架，以鼓励以市场为基础的工具，降低行业转型的障碍。

在政策制定上，城镇可在一系列可再生能源项目开展的基础上，依据项目发展情况和城市节能减排效果，因地制宜地调整或推出城镇在可再生能源方面的政策和标准。

7 总结与展望

根据本次报告的分析，在城镇范围内大规模推广建筑领域可再生能源利用，是中国在应对全球气候变化和实现可持续发展目标过程中一条有效的路径。可再生能源的特性决定了其在生产、存储、分配和使用中需要系统化的解决方案。除了技术创新外也需要商务模式的创新，可为产业和地方带来绿色发展的推动力。在不断提高能效的基础上，技术层面、管理层面和政策标准层面的工作相辅相成，是大规模推广的框架条件。通过国际交流、最佳案例探讨和能力建设活动，建筑领域可再生能源利用的落实需要利益相关方共同来推动技术、管理和政策层面的发展。

8 参考文献

C40 Cities. (2018年9月). The Net Zero Carbon Buildings Declaration. 检索来源: https://www.c40.org/other/net-zero-carbon-buildings-declaration

City of Vancouver. (2015). Renewable City Strategy 2015-2050.

Genske, D. D., Jödecke, T., & Ruff, A. (2009). Nutzung städtischer Freiflächen für erneuerbare Energien. Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung BBR Bonn/ Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung BMVBS Berlin.

IEA. (2020). World Energy Balances. 检索来源: www.iea.org/subscribe-to-date-services/world-energy-balances-and-statistics

IPCC. (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland: IPCC.

IRENA. (2020). Global Renewables Outlook: Energy transformation 2050. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. 检索日期: 2020年11月30日

United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Divison. (2018). World Population Prospects: The 2018 Revision.

中华人民共和国中央人民政府. (2016). 中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要.

中国国家发展和改革委员会，国家能源局. (2016年12月29日). 国家发展改革委 国家能源局关于印发《能源生产和消费革命战略（2016-2030）》的通知. 检索来源: https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201704/t20170425_962953.html

中国国家统计局. (2020). 国家统计局. 检索日期: 2020年11月30日，来源: data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01

住房城乡建设部. (2017). 建筑节能与绿色建筑发展“十三五”规划.

北京市规划和自然资源委员会. (2018). 北京城市总体规划（2016年-2035年）. 检索日期: 2020年10月30日，来源: http://ghzrzyw.beijing.gov.cn/zhengwuxinxi/zxzt/bjcsztgh20162035/202001/t20200102_1554613.html

国家发展和改革委员会能源研究所，国家可再生能源中心，英国儿童投资基金会. (2020). 中国可再生能源展望2019.

国家能源局. (2020). 2019年全国电力工业统计数据. 检索来源: http://www.nea.gov.cn/2020-01/20/c_138720881.htm

水电水利规划设计总院. (2020). 中国可再生能源发展报告2019. 北京，中国.

清华大学建筑节能研究中心. (2020). 中国建筑节能年度发展研究报告2020. 北京.

清华大学气候变化与可持续发展研究院. (2020年10月12日). 中国长期低碳发展战略与转型路径研究. 北京，中国.

9 图片目录

Working to sustain the natural world for the benefit of people and wildlife.

together possible™

panda.org