

城市可再生能源的崛起

未来城市能源解决方案



协助单位:



Federal Ministry
for the Environment, Nature Conservation
and Nuclear Safety

除非另有说明，否则本出版物中的材料可以自由使用、分享、复制、重印、打印及/或保存，但需恰当注明 IRENA 为资料来源和版权所有。本出版物中属于第三方的材料可能受单独的使用条款和限制的约束，在使用此类材料之前，可能需要获得这些第三方的相应许可。

引文: IRENA (2020), 城市可再生能源的崛起: 未来城市能源解决方案, 国际可再生能源机构 (IRENA), 阿布扎比

ISBN: 978-92-9260-328-1

本文件为“Rise of renewables in cities: Energy solutions for the urban future”的译本 ISBN: 978-92-9260-271-0 (2020)。如中文译本与英文原版的内容不一致，概

关于 IRENA

国际可再生能源机构 (IRENA) 是一个重要的国际合作平台、英才中心、政策、技术、资源和金融知识库，也是推动全球能源系统转型的动力。IRENA 是一个政府间组织，成立于 2011 年，旨在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、海洋能、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发展与繁荣。www.irena.org

IKI 的支持

本报告是“未来城市能源解决方案”项目的组成部分，该项目得到了国际气候行动 (IKI) 的大力支持。根据德国联邦议院通过的一项决定，由德国联邦环境、自然保护与核安全部 (BMU) 资助这项研究。

致谢

IRENA 谨对本报告的审阅专家致以诚挚的感谢。Anjali Mahendra (世界资源研究所)、Gerhard Stryi-Hipp (弗劳恩霍夫太阳能系统研究所)、Haukur Harðarson (ArcticGreen Energy Corporation)、Helen Carlström (德国意昂集团)、朱丽 (亚太经合组织可持续能源中心)、Sven Teske (悉尼科技大学)、Toby Couture (E3 Analytics)、Vincent Kitio (联合国人居署)、奚巍民和朱婵霞 (中国国家电网城市能源研究院) 和梁志鹏 (中国国家能源局) 提供了富有见地的评价和建设性建议。

IRENA 的同事 Arina Anisie、Asami Miketa、Celia García-Baños、Elena Ocenic、Francisco Boshell、Jinlei Feng、Luis Janeiro、Michael Renner 和 Prasoon Agarwal 提供了宝贵的意见和建议。

Paul Komor、Neil MacDonald 和 Elizabeth Press 也提供了有用的反馈。Lisa Mastny 编辑了本报告。

IRENA 非常感谢德国 IKI 项目对编制本出版物的支持。

撰稿人: 本报告由 IRENA 创新与技术中心 (IITC) 的可持续城市能源团队在 Dolf Gielen 的指导下编写而成。由 Yong Chen、Enzia Schnyder 和 Jennifer Potter (IRENA) 以及 Mashael Yazdanie (Empa) 共同撰写，此外，Julien Marquant (IRENA)、Dorine Hugenholz (IRENA) 和 Alina Gilmanova (中国科学院) 也协助撰写了部分内容。

获取更多信息或提供反馈，请访问 publications@irena.org

下载网址: www.irena.org/publications

免责声明

本出版物及其材料均按“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。但是，无论是 IRENA 还是其任何官员、代理人、数据或其他第三方内容提供者均不提供任何形式的明示或暗示担保，他们对使用本出版物或材料的任何后果不承担任何责任或法律责任。

本文中包含的信息不一定代表 IRENA 所有成员的观点。提及特定的公司或特定的项目或产品并不意味着 IRENA 认可或推荐这些公司或产品，且认为其优先于未提及的类似性质的其他公司或产品。此处采用的名称和本材料的表述，并不意味着 IRENA 会就任何地区、国家、领土、城市或地区或其当局的法律地位或对边界或边界的划定表示任何意见。

目录

● 图	4
● 表	4
● 文本框	5
● 缩写	5
● 执行摘要	6
<hr/>	
1. 前言	11
● 1.1 城市化与气候变化	12
● 1.2 了解城市能源系统	15
● 1.3 可再生能源在全球城市能源转型中的作用	18
● 1.4 关于本报告：目的、范围和结构	20
<hr/>	
2. 城市可再生能源的潜在机遇	23
● 2.1 全球城市层面的可再生能源目标分布情况	24
● 2.2 有关本地可再生能源和发电厂目标的空间分析	33
<hr/>	
3. 城市可再生能源技术	51
● 3.1 太阳能	52
● 3.2 生物能源和转废为能	60
● 3.3 城市风能	65
● 3.4 直接利用地热能	68
● 3.5 智能电网的创新发展	70
● 3.6 区域热能网络	73
<hr/>	
4. 城市能源系统规划建模工具	76
● 4.1 数据挑战：所需数据、时间与空间粒度及其可访问性	78
● 4.2 建模工具	83
● 4.3 发展中国家面临的建模挑战	97
● 4.4 城市能源系统规划展望	100
<hr/>	
● 参考文献	102



图 1:	世界人口增长 (1961-2016)	13
图 2:	2050 年前全球与能源相关的碳减排: 当前计划与能源转型	19
图 3:	本报告中的章节: 解决城市挑战的关键步骤	22
图 4:	可再生能源目标和 100% 可再生能源目标的地理分布	25
图 5:	可再生能源目标城市和气候带的世界地图	26
图 6:	城市目标与城市人口	30
图 7:	GHI 排名前 30% 的城市和已制定可再生能源目标的城市	35
图 8:	太阳能光伏电站的分布 (按 GHI 及区域)	36
图 9:	城市附近太阳能电站的地理分布	37
图 10:	风功率密度排名前 30% 的城市和已制定可再生能源目标的城市	40
图 11:	城市附近风电场的分布 (按功率密度及区域)	41
图 12:	城市附近风电场风功率密度及地理分布	42
图 13:	水电站的区域分布	44
图 14:	生物能源和转废为能发电厂的区域分布	45
图 15:	城市附近的生物质发电厂和资源潜力高的城市	47
图 16:	全球城市附近的转废为能发电厂	47
图 17:	城市附近地热发电厂的区域分布	49
图 18:	全球住宅太阳能光伏系统的平均装机容量	53
图 19:	屋顶太阳能光伏-光热混合系统	59
图 20:	Savonius 垂直轴和 Darrieus 垂直轴	67

表

表 1:	各数据集中太阳能潜力较高的城市数量	34
表 2:	各数据集中风能潜力较高的城市数量	39
表 3:	各数据集中离最近河流段的平均距离和平均水电潜力	43
表 4:	各数据集中地热能潜力较高的城市数量	48
表 5:	开环和闭环地热热泵系统的关键特性	70

文本框

文本框 1:	未来城市的可再生能源解决方案	15
文本框 2:	创新展望：电动汽车智能充电	17
文本框 3:	瑞典于默奥和哥德堡的区域热电联产与供冷系统	61
文本框 4:	全球地热联盟	68
文本框 5:	可再生能源供热和供冷盈利项目开发技术指南	74
文本框 6:	区域供热和供冷系统的热能储存	75

缩写

°C	摄氏度	LAC	拉丁美洲和加勒比地区
BIPV	光伏建筑一体化	LEAP	长期能源替代规划
CFD	计算流体力学	m	米
CHP	热电联产	m ²	平方米
CO ₂	二氧化碳	MESSAGE	能源供给策略选择及其总体环境影响分析模型
CSP	聚光太阳能发电	MtCO ₂ e	百万吨二氧化碳当量
EUR	欧元	MW	兆瓦
EV	电动汽车	MW _{th}	兆瓦热
GDP	国内生产总值	OSeMOSYS	开源能源模拟系统
GHI	水平面总辐射量	PV	光伏
Gt	千兆吨	PV-T	太阳能光伏-光热
GW	吉瓦	R&D	研发
GW _{th}	吉瓦热	TIMES	综合 MARKAL-EFOM 系统
HOMER	多能源混合优化	TWh	太瓦时
ICT	信息与通信技术	UNFCCC	联合国气候变化框架公约
IPCC	政府间气候变化专门委员会	USD	美元
IRENA	国际可再生能源机构	VRE	波动性可再生能源
kW	千瓦	W	瓦
kWh	千瓦时		

执行摘要



执行摘要

城市与减缓和适应气候变化的关系日益密切，这不仅是因为城市在全球碳排放中占很大比例，更重要的是因为城市在减少各种排放方面具有很大的潜力，而且人们对能适应气候变化的未来城市基础设施的需求也越来越高。到 2050 年，城市需要为全球三分之二的人口提供宜居的低碳环境。在强大的政治意愿和技术进步的支持下，将可再生能源技术整合到本地能源系统已成为实现这一潜力所需转型行动的组成部分。本地可再生能源的发展将对国内生产总值 (GDP) 和就业产生积极影响，城市也将因此受益。

本报告探讨了三大关键知识点 — 可再生能源资源的潜力和可再生能源目标、技术方案以及城市能源系统规划。这些知识将帮助城市在逐步实现能源系统脱碳转型的同时，加大利用本地可获取的可再生能源。

制定可再生能源目标是城市促进可再生能源部署的重要环节。但要制定合适的目标，必须充分了解可再生能源资源的供应情况等关键因素。通过分析本地可获取的可再生能源资源和城市附近的可再生能源发电厂相关的城市层面的目标，结果表明：

- 越来越多城市制定了可再生能源目标，但大多为欧洲和北美城市，这些地区经济富裕，处于温带或寒带气候。全球制定了可再生能源目标的城市（共 671 个城市）中，80% 以上位于欧洲和北美。同时，能源需求预计将会增长的亚洲和非洲城市在制定可再生能源目标方面却行动落后。
- 制定了可再生能源目标的城市，人口大多在 100,000 至 500,000 之间。制定了可再生能源目标的大城市和特大城市大多只追求将能源结构中的一小部分替换为可再生能源。
- 水电、生物能源和转废为能在帮助城市实现可再生能源目标、能源结构脱碳转型方面发挥着明显作用。虽然太阳能和地热能的巨大潜力有待开发，但其在城市中的使用正在增长，城市利用风能的能力也在发展，但进展缓慢。

城市在整合本地可再生能源技术上面临各种挑战，包括立法、政策、监管、融资、人力、美学、设计和城市规划等障碍。从某种程度上来说，之所以存在这些障碍，是因为不了解可再生能源方案和利用本地可获取的可再生能源资源的益处。加强了解城市可再生能源技术的应用将有助于城市规划和部署市区的可再生能源。

本报告还概述了城市中最常用的可再生能源技术，包括：

- **太阳能光伏 (PV)：**城市的太阳能光伏系统通常比郊区的地面光伏系统规模要小。2018 年，已安装的住宅光伏系统的平均规模约为 6.4 千瓦。这些系统通常安装或集成在建筑物屋顶和立面上。扩大城市光伏应用规模面临着很多独特的挑战，包括土地限制、波动性可再生能源比例增加对本地电网的潜在影响，以及对太阳能光伏系统对本地电力供应商和电网公司的经济影响缺乏了解。
- **太阳热能：**太阳热能系统依赖各种太阳能集热器工作，通常用于水加热和空间采暖，有时也用于工业过程加热。越来越多的城市和国家制定了建筑法规，要求所有新建建筑都必须使用太阳能热水器。在有些城市中，大型太阳能集热器通过区域供热网络传输热量。通过将热能网络转变为低温（60-70 摄氏度以下）区域供热系统（即第四代），可以实现太阳能区域供热。太阳能系统可以安装在地面或建筑物屋顶上，为建筑物、社区、地区或城市供热。但是，在天然气价格很低且以天然气作为主要热源的国家，由于缺乏激励政策或提振方案来支持其社会环境效益，太阳热能系统的竞争力会很弱。
- **太阳热能供冷：**1990 年，全球供冷需求为 600 太瓦时 (TWh)，到 2016 年增长了两倍，达到 2,000 TWh，预计到 2050 年至少还将增长两倍。随着全球供冷需求的增长，太阳热能已逐渐扩展到供冷领域。为达到供冷目的，太阳热能通常与吸收式供冷机结合使用，以降低炎夏时电网的高峰需求，从而减少停电和电网升级成本。

- **生物能源和转废为能：**与太阳能光伏相比，生物质能的能量供应相对稳定可靠。对城市而言，转废为能也是打造循环经济的潜在好方法。但还需要解决获得可持续原料供应不稳定的问题，公众认可也仍然是转废为能的一大障碍。
- **城市风能：**风能在城市使用较少，扩大规模面临巨大挑战。尽管也有一些城市使用风力机发电的例子，但其性能仍有待改善，而且大规模实施也很少见。风力机在城市环境中的应用目前主要处于研发阶段。缺乏实验数据是城市风力机发展的一大阻碍。
- **直接利用地热能：**由于供热行业需要脱碳，而直接利用地热能存在巨大潜力和优势，因此，城市中的地热能应用不断增长。2010 年以来，全球直接利用地热能的装机容量增长了一倍以上，到 2019 年，88 个国家/地区部署的地热能达 107,727 兆瓦。通过独立的供热系统和区域供热系统，地热技术可主要用于城市空间采暖、供冷和热水供应。对于新建城市或现有城市扩张，安装地热能系统比在现有基础设施中集成这些系统更具成本效益。

对大多数城市而言，整合上述可再生能源技术需要对城市基础设施进行改造，但又不能影响运营可靠性和稳定性。本报告强调，通过创新和采用使能技术（如电动汽车、能量储存系统和智能能源管理系统）来发展“智能”电网，从而促进在城市基础设施中集成可再生能源，这一点极其重要。智能电网可望增大波动性可再生能源比例，提高系统效率。这一点尤为重要，因为未来城市的能源基础设施将高度整合各行各业，包括电力、供热与供冷以及交通运输等。

同样，专注于整合各种可再生能源的区域供热网络也为可再生能源（例如太阳热能和低温地热能）带来了新的机遇，使其有望在能源供应中发挥更大的作用。通过热泵、电锅炉和热能储存等行业耦合技术，热能网络与电力系统日渐融合。

专注于在能源基础设施中集成可再生能源的城市能源系统规划对于推进世界能源转型来说至关重要。为该规划选择合适的建模工具也是关键一环。本报告研究了常用的城市能源系统规划建模工具，以及进行此类规划（特别是在发展中国家）面临的主要挑战。

其中包括数据挑战，主要涉及涵盖供需两侧的城市层面的能源数据可访问性及数据粒度。本报告根据一系列标准评估了七种建模工具，以确定它们在以可再生能源为中心的城市能源系统规划中的有效性。

值得注意的是，相对于老城区，在新建城市或扩建新城区的基础设施中集成可再生能源系统成本会更低，因为一般无需改造现有建筑物和供热管网。

因此，现有城市或规划城市需要转变其城市基础设施的发展范式，让可再生能源发挥重要作用。这将有助于减少城市的碳足迹，顺应限制碳排放的全球倡议，并帮助城市减轻全球及本地气候变化的负面影响。

总而言之，城市很少能仅依靠本地可再生能源即实现能源系统脱碳。然而，城市不应一开始即预设从外地引入可再生能源，而应探索各种机会，最大限度利用本地可获取的可再生能源。

城市应鼓励分布式能源生产，采用综合方法来开发未来的城市基础设施。因此需要联合电力、建筑、交通运输、供热和工业部门，共同提高系统效率，增强气候变化适应能力。





1.

前言

1. 前言

全球有 55% 的人口居住在城市，城市是世界的经济引擎，占全球国内生产总值 (GDP) 的 80% (联合国经社部，2018)。城市化通过扩大经济活动、增加商业机会改善了社会福祉，但也加剧了环境破坏和全球气候变化，因为大部分城市经济社会活动需要化石燃料提供动力 (联合国开发计划署，2017; Keirstead 和 Shad, 2013)。

根据政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 的数据，全球与能源有关的二氧化碳 (CO₂) 排放中，有 71%-76% 来自城市。在全球 80% 以上的城市中，严重的空气污染问题与化石燃料和其他排放相关。这导致每年约 700 万人因肺癌、中风和哮喘等疾病而早逝 (世界卫生组织，2018)。

未来三十年中，城市居住区预计将增加 25 亿人口 (联合国经社部，2018)，今天对城市可持续能源系统建设做出的决定将影响我们大家共同的未来。我们需要寻找创新方法来为全球新兴城市地区提供动力，同时实现现有系统转型。近年来，得益于可再生能源发电成本的急剧下降，可再生能源有望在重塑城市能源系统中发挥关键作用。

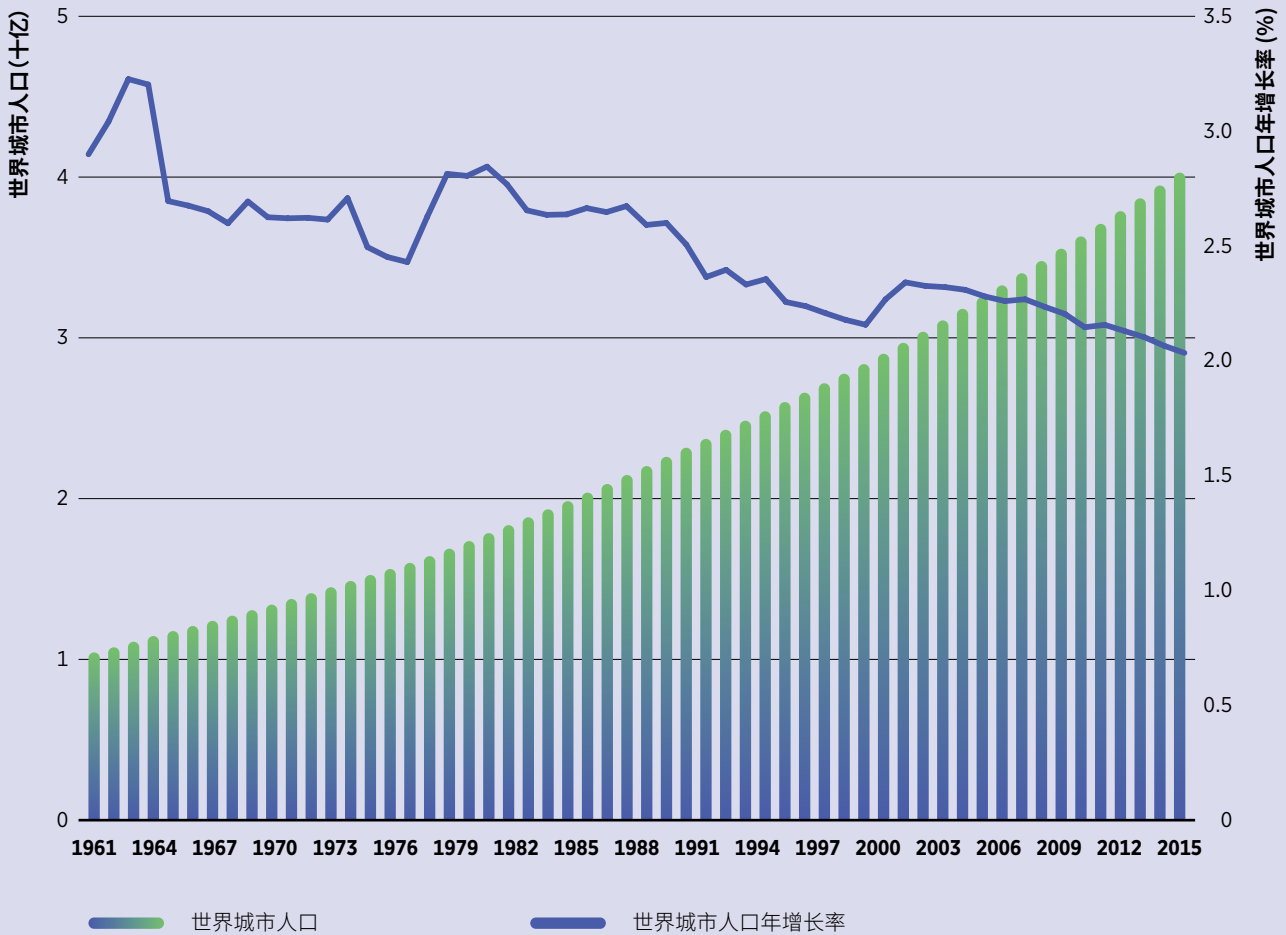
这也与联合国可持续发展目标第 7.2 条相符，即到 2030 年，全球能源结构中可再生能源的比例大幅增加。

本章从整体上介绍城市中可再生能源的崛起及其对我们未来发展的潜在影响，以及城市在全球能源转型中的定位。此外，鉴于城市中技术应用以及可用于确定可行方案、制定可持续能源战略和气候行动计划的可用建模工具丰富多样且日趋成熟，本章探讨了本地可获取的可再生能源有待开发的机遇。

1.1 城市化与气候变化

过去五十年中，全球城市人口迅速增长，比 1961 年增长了三倍 (图 1)。虽然预计城市化速度将持续放缓 (2018 年至 2030 年年均增长 1.7%，2030 年至 2050 年年均增长 1.3%)，但据联合国 (UN) 估计，到 2050 年，城市总人口将比 2015 年增长 50% 以上。这意味着，到本世纪中叶，全球三分之二的人口 (即 67 亿人口) 将生活在城市，预计几乎所有新增人口 (90%) 都来自亚洲和非洲 (联合国经社部，2018)。

图 1: 1961-2016 年世界人口增长



根据世界银行的数据计算，2017 年

目前，全球 67%-76% 的终端能耗，71%-76% 与能源相关的 CO₂ 排放均来自城市（Edenhofer 等，2014）。未来几十年中，城市化进程必然将与全球能源系统脱碳的迫切需求相吻合。如果我们希望实现 2015 年《巴黎协定》制定的气候目标，将全球平均气温增幅控制在 2°C 以下（即比工业化前的水平高 1.5°C），全球能源系统脱碳是必不可少的一项工作。

自 21 世纪初以来，城市已越来越多地感受到气候变化的影响。洪水、风暴和热浪等气候事件越发频繁，性质日益严重，使城市地区遭到破坏甚至几近瘫痪（联合国国际减灾战略，2016；Güneralp 等，2015）。根据美国国家航空航天局（NASA）的数据，在全球范围内，有记录以来最热的 18 个年份中，有 17 个发生在过去 20 年。（NASA，2019）。

2003 年的热浪是过去五十年中最严重的灾难之一，3 万人因此丧生（联合国环境署，2004）。预计夏天将会越来越炎热和干燥（Zscheischler 和 Seneviratne，2017），进而导致空调使用量持续增长。这反过来又导致建筑的环境温度升高，加剧城市热岛效应，使城市地区更加燥热。到 21 世纪末，这些影响可能使城市损失 10.9% 的 GDP（Estrada 等，2017）。

气候变化对水循环的影响也会影响区域气候模式。夏季炎热干燥是 2017 年和 2018 年美国加利福尼亚州山火灾害的主要原因，当然人为因素也是其中一项重要因素。2019 到 2020 年，澳大利亚持续四个月的丛林大火也是区域影响的一个例子。2019 年 11 月，意大利威尼斯发生严重洪灾，85% 的城区被淹，威尼斯因此损失 11 亿欧元（12.3 亿美元¹），部分历史建筑遭到不可修复的破坏（Henley 和 Giuffrida，2019）。

如果海平面继续上升，那么欧洲其他地区也会遭遇类似影响，因为欧洲 70% 的大城市都位于或靠近海岸，而且大部分海拔低于海平面 10 米（经合组织，2009）。不止欧洲，全球亦是如此，IPCC 发出警告，海平面上升对沿海和小岛屿国家与地区的影响越来越大（IPCC，2019）。

在减缓气候变化方面，城市扮演着重要角色，因为城市找各种减排方面都大有潜力。此外，城市基础设施对维持其他基础设施功能至关重要，因此，必须增强城市基础设施（特别是城市能源系统）适应气候变化的能力。

由于各种使能技术的发展，例如能量储存（包括电池和热量储存）、电动汽车（EV）智能充电、可再生能源转化为热能或氢能、数字技术和智能能源管理，许多国家在城市及城市周边部署了越来越多的分布式可再生能源系统。预计这种趋势仍将继续，并伴随出现一些创新的商业模式，例如能源即服务、整合商、点对点电能交易、社区所有制模式、即付即用和城市能源规划，以及建筑、交通运输和工业等各行业的相互协作（IRENA，2019a）。

同时，IRENA 即将发布的报告《未来城市的可再生能源解决方案》（*Renewable energy solutions for cities of the future*）（文本框 1）指出，政策与监管框架和市场设计应致力于促进城市转型，打造能适应气候变化的低碳城市，同时创造本地就业机会。此外，使用创新方式运营城市电力系统将有助于实现以可再生能源为中心的能源转型，其中配电系统运营商的作用至关重要。例如，太阳能和风力发电使用的先进天气预报工具可以帮助当今的电力系统整合这些可再生资源（IRENA，2019a）。

1 汇率：1.12 美元/1.0 欧元（2019 年 12 月）

文本框 1： 未来城市的可再生能源解决方案

IRENA 即将出版的报告《未来城市的可再生能源解决方案》(Renewable energy solutions for cities of the future) 对城市的作用以及政策工具进行了分析，以支持可再生能源在不同行业的部署，报告重点关注了中国、哥斯达黎加和乌干达的六个中等城市。这些案例研究对社会经济和行政背景大相径庭的情况下的最佳实践进行了考察。

每个案例研究中均概述了制定地方级可再生能源部署框架的国家级政策，分析了市一级采取的举措，并对从中获得的关键经验教训以及为解决规模扩展问题所作的考虑进行了总结。研究中还总结了适合地方或国家级政策制定者的关键要点信息，推动城市全力实现一个更具有可持续性的能源前景。

该政策分析简要说明了在城市中部署可再生能源的关键因素和行业方法。为取得成功，城市规划者和管理人员需要掌握以下方面的一系列技能：生产或获得可再生能源资源；将其纳入建筑物或交通行业等城市能源系统中；提高能源效率并实现电气化；采用适当的城市规划工具和监管措施。

来源：IRENA，即将出版的 a 册

为实现这一潜力，需要现在就采取转型行动。该行动将创造新的机会，并为城市能源问题提供创新解决方案。随着各城市努力制定能适应气候变化的环保型能源基础设施的有效策略、面向未来的前瞻性行动计划和投资决策，这些城市需要很好地了解本地可获取的可再生能源资源和城市可再生能源技术的各种应用，并合理规划使用低碳能源结构的联网能源基础设施。

1.2 了解城市能源系统

城市能源系统的运作方式与其他任何能源供应系统类似，都是通过配电网和能源管理系统提供各项服务，满足各种能源消费者的需求。然而，由于经济社会活动密集、技术和商业模式创新以及城市直接遭受的环境影响，城市能源系统也非常独特。根据不同视角，我们可将城市能源系统看作为一个热力学、新陈代谢或复合系统 (Keirstead 和 Shad, 2013)。我们可以通过多种视角来了解分析此类系统。

城市能源系统的一大特点是，城市是连接物理能源系统与其最终用户（即城市居民）的社会技术接口。因此，这不仅事关能源系统本身，消费者行为更为关键。

随着改变能源系统生产者与消费者关系的颠覆性技术的出现，情况则更是如此。这些关键技术创新包括含储能电池的屋顶太阳能光伏系统、净电量计算、智能能源管理、节能设备、物联网、大数据推动的人工智能以及区块链技术。

通过使用可再生能源和数字技术，发电的日渐分散化正在重塑物理能源系统（通常由公用事业单位运营）与能源消费者之间的动态关系。换言之，能源生产与能源消费之间的界限日趋模糊。此外，还有一些创新解决方案将基于此类技术的新商业模式与配电网新法规和创新系统运营实践相结合，为城市提供了一个独特机会，可以从技术上和体制上重新审视城市与国家能源系统的关系。

同理，最终应用的电气化对城市能源转型成功也至关重要。行业相互协作技术（例如热泵、配有智能充电系统支持配电网运行的电动汽车以及各种储能技术）的使用增多，极大地促进了电力系统对波动性可再生能源（VRE）的整合，例如太阳能光伏和风能（请参阅 IRENA 的 *创新展望：电动汽车智能充电*（IRENA, 2019b），摘要列于文本框 2）。

能源系统创新促进了产消者（既是能源消费者，又是能源生产者，通常使用太阳能光伏系统发电）概念与实践的发展。这正在重塑能源生产者与消费者之间的传统动态关系。

按照传统模式，城市居民的活动产生了能源服务需求，能源公司通过复杂和集中的能源基础设施提供能源服务，由消费者支付费用。相比之下，产消者生产的电力（无论是自用还是注入电网）可能颠覆现有参与者的传统角色，因此需要建立监管制度协调未来监管与市场设计中的更多参与者（Brown 等，2019；Hall 和 Roelich，2016；Sioshansi，2019）。

除产消者以外，还出现了其他新的参与者，例如整合商，他们将几种分布式能源并入一个单一实体（虚拟电厂），从而参与电力或服务市场并开展交易（IRENA，2019c）。

在供热领域，向可再生能源转型的情况要比电力行业少得多，但也出现了一些使用太阳热能集热器和地热能替代天然气的情况。区域供热网络的热流以单向为主。有些实验（例如 ectogrid™）已验证低温微型热力的概念，通过分散的热泵平衡不同用户之间的废热和供冷能源，因此只需较少的能源输入即可补偿损失。这类系统已在多个城市进行示范，特别是在瑞典、荷兰和英国。

城市能源系统通常无法脱离国家系统独立运行，而且完全独立运行也没有什么经济意义。城市能源系统和国家能源系统之间的这些关系可通过各种方法来研究。但是，过去十年来，影响这些关系的驱动力发生了变化。城市已逐渐意识到能源生产与消费对各种城市问题的影响，从公共卫生与环境，到交通、废物管理和就业市场等。

在制度方面，城市需要行使其能源治理权，尤其是在与国际社会共同应对气候挑战时，同时还应认识到改善当地环境和促进社会福祉的共同利益。过去十年来，越来越多的城市寻求加强管控其能源系统，特别是通过促进使用可再生能源来实现这一目标。据 IRENA 分析，到 2019 年，约有 671 个城市已至少制定了一个促进当地使用可再生能源的目标，其中 60% 以上的城市制定了实现 100% 可再生能源的目标。参与低碳发展计划的城市在全球和地区范围内均有所增加，这主要归功于以城市为重点的国际组织的努力，例如气候与能源市长盟约、ICLEI - 地方可持续发展协会和 C40 城市集团（请参阅第 2 章）。

此外，在从集中式化石燃料（城外的大型发电站）向分布式可再生能源的转型中，增进对本地可选择的技术方案和能源规划部门的了解也至关重要。本地的能源资源越多，就越能促使市政部门对辖区内的能源系统承担责任。

文本框 2: 创新展望：电动汽车智能充电

IRENA 的 *创新展望：电动汽车智能充电* 表明，可再生能源发电成本的稳步下降，使电力成为一种能为交通运输行业提供燃料的具有吸引力的低成本能源。扩大电动汽车的部署也展示了电力系统的发展机遇，这样有可能增加电力系统急需的灵活性，并能为高比例的可再生能源的整合提供支持。然而，要实现电动汽车的最佳用途，需要仔细研究哪些应用情形下最符合交通运输的需要，同时也对电力行业最有利。最理想的情况是，可再生能源驱动的电动汽车既能为电网带来广泛的益处，又不会对交通运输功能造成负面影响。为此，实现智能充电和建设智能充电基础设施非常关键，让充电周期既能适应电力系统的条件，又能符合车辆使用者的需要。

此外，IRENA 的创新展望中讨论了电动汽车充电对城市电力调度系统的潜在影响，并展示了智能充电如何能减少提升地方电网能力所需的费用。报告还重点阐述了电动汽车智能充电促进城市内及周边地区 VRE 资源整合的潜力。讨论中进一步探索了其他颠覆性技术的潜在影响，这些技术可能改变城市的交通运输方式（比如自动驾驶汽车和出行即服务）。

来源：IRENA, 2019b

这可以帮助各城市制定合理的城市能源战略、投资规划和融资方案。这些方案包括签署购电协议，为与交通运输网络、废弃物管理系统、供水系统和废水处理设施等其他市政系统联系日益紧密的能源基础设施推出绿色债券。

分布式能源战略和规划过程将不可避免地与城市整体规划相互影响。最终，建筑物、交通运输和工业等最终使用部门的能源消耗（如果是产消者，则是能源生产与消耗）在很大程度上受到城市近期发展规划和长期发展目标的影响。

1.3 可再生能源在全球城市能源转型中的作用

由于技术和系统成本（尤其是太阳能光伏和陆上风电）大幅下降，人们对可再生能源的使用迅速增长，全球能源格局正在发生根本性变化。

关键驱动力包括电力行业数字化、分布式能源增多以及最终使用部门的电气化（目前大多数这些部门都依赖化石能源）。分布式发电技术的创新进一步加剧了这些种变化。

除了技术驱动的使能技术系统创新之外，创新商业模式、新型市场结构与监管，以及新型配电系统运营方式都在重塑能源的生产、运输、分配和消耗方式。

自 2009 年以来，太阳能光伏的平均成本下降了 80%，电池储能技术的成本也在迅速下降，未来十年内可能还会再下降 60%。IRENA 预计未来几年总体成本将继续下降，目前所有商业化的可再生能源发电技术都将可与传统燃料抗衡（IRENA, 2020a）。

这对城市意义重大，也是在城市层面部署可再生能源的强大动力，因为很多这样的颠覆性技术都可以扩大分布式可再生能源系统的规模。这将帮助城市减少与能源相关的 CO₂ 排放（主要来自建筑物、交通运输和工业部门）。此外，本地可再生能源的发展将对 GDP 和就业产生积极影响，使城市获益匪浅。

根据 IRENA 的《全球可再生能源展望》，到 2050 年，相比“已规划能源方案”，依照其“转型能源方案”（以加速利用可再生能源为特征），全球 GDP 将提高 2.4%，可再生能源提供的就业岗位将从今天的约 1100 万增加到 4200 万（IRENA, 2020b）。这些数字凸显了可再生能源在全球城市能源转型中的关键作用。

为将这些预测情景变成现实，必须认识到可再生能源的巨大潜力，以帮助各部门实现与能源相关的大幅减排。虽然目前可再生能源仅占城市能源消耗的 20%，其中约三分之二用于建筑物，另三分之一用于交通运输（IRENA，2016）。

但是，如图 2 所示，到 2050 年，可再生能源和电气化可能帮助我们减少 75% 与能源有关的碳排放（与参考案例相比），使全球气温增幅远低于 2 °C。

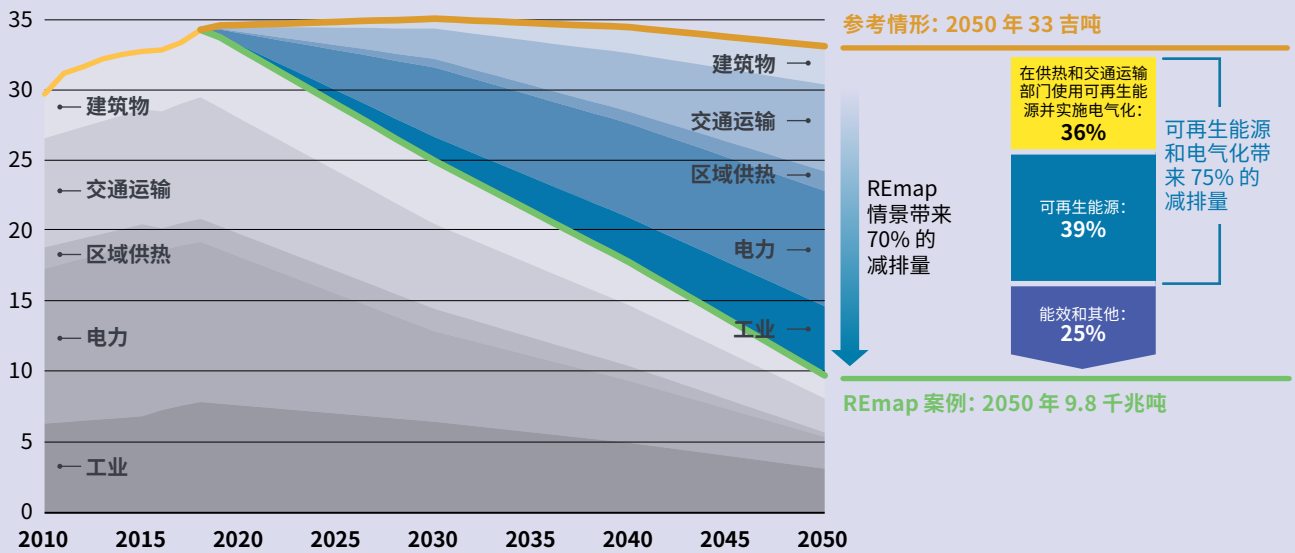
其中大部分减排源于其可能在建筑物、交通运输、工业和区域供热等最终使用部门中替代化石燃料（IRENA，2019d）。

本地可获取的可再生能源还可用于各部门帮助城市能源系统脱碳，例如将本地可获取的可再生能源集成到小型分布式电力系统（包括迷你型、微型和纳米电网²）中。

2 Burmester 等提出了纳米电网的定义（2017）。

图 2： 至 2050 年全球能源相关碳排放减少情况：当前计划和能源转型

每年与能源相关的 CO₂ 排放 (吉吨/年)



参考情形 = 按照当前政策和计划制定的路径
 REmap 情景 = 通过加速可再生能源利用来推动能源转型的 IRENA 路线图
 来源：IRENA, 2019d

1.4 关于本报告：目的、范围和结构

本报告旨在提供有关在城市层面使用可再生能源的潜力、城市的技术方案以及城市能源系统规划的基础知识，使城市能源规划人员、市政决策者部门及其咨询单位能够在城市层面推进能源转型。部分章节可能对可再生能源技术与项目开发商、金融机构专业人士和投资者以及其他利益相关者有所帮助。

本报告旨在推动探讨以下两个问题：

1. 如果所有非技术性障碍均已消除，哪些知识将有助于城市最大程度地利用其本地可再生能源？通过查阅文献以及与专家和本地能源专业人士探讨，确定了与评估城市可再生能源选择最相关的三个领域：本地可获取的可再生能源资源、适用于建筑环境的可再生能源技术以及城市能源系统规划工具。

分析范围主要是使用本地可获取的可再生能源进行分布式发电，包括与可再生能源目标和计划相关的资源地图绘制、适用于城市及其周边地区的可再生能源技术，以及城市能源系统规划建模工具 — 城市能源系统规划是将本地可再生能源融入未来城市能源基础设施发展的重要过程。

其根本原因是，在考虑从外地“进口”可再生能源之前，如果先自行评估本地的可再生能源资源情况以及如何充分利用这些资源，城市将大为受益。事先的全面评估可以帮助城市获得充分的信息，并据此作出高瞻远瞩的决定。

关注本地可获取的资源绝不会削弱从外地（通过输电线路）引入可再生能源电力的重要性。如果电网运营和输电能力许可，本地电网与国家电网之间的互动可促进本地及偏远地区的可再生能源资源以最有效的方式得到利用。

2. 在本地/地区层面增进对技术的了解将如何帮助城市制定切实可行的目标，并根据充足的信息打造/制定高瞻远瞩的本地能源政策和战略？《巴黎协定》之后，城市在应对全球气候变化方面发挥了更大的作用，并积极寻找能源系统转型机会，打造低碳甚至零碳能源的未来，同时通过本地可再生能源发展充分利用社会经济发展机会。越来越多城市尝试在地方层面管控其能源供应。

随着技术知识加深，城市可以设定切合实际的均衡政策目标，并采取切实可行的措施来实现这些目标，尤其是在使用本地可再生能源与从外地引入可再生能源之间权衡选择。

本报告的范围仅限于城市能源体制的技术前沿问题；本分析不涵盖政策、立法、监管和金融与经济激励措施，但本报告承认这些措施都非常重要。

尽管本报告对正在考虑是否利用本地可再生能源的城市可能最有价值，但对已在该领域领跑的城市拓宽视野，加深理解城市能源转型也会有所帮助。

本报告的另一目的是，通过进一步交流知识，发起令人深省的讨论，弥合领先城市与追赶城市之间的沟通鸿沟。

总体而言，本报告认为，为了制定本地可再生能源方案并将其融入城市能源系统规划，城市需要做到以下几点：评估本地可再生能源的可用情况；了解各种可再生能源技术在城市内及/或其周边的适宜性；最好制定切合实际、理由充分的目标来支持本地可再生能源的发展；充分了解制定城市能源系统规划可使用的建模工具。

鉴于全球城市的多样性，城市变革能源系统、实现低碳或零碳未来的关键要素绝不仅限于以上几点。



但若不考虑这些要素，城市将难以充分利用本地的可再生能源，而这是实现能源结构脱碳的第一步。

本报告的结构如下（请参阅图 3）：

第 1 章为前言，介绍分析背景，强调城市在全球能源转型中的作用。

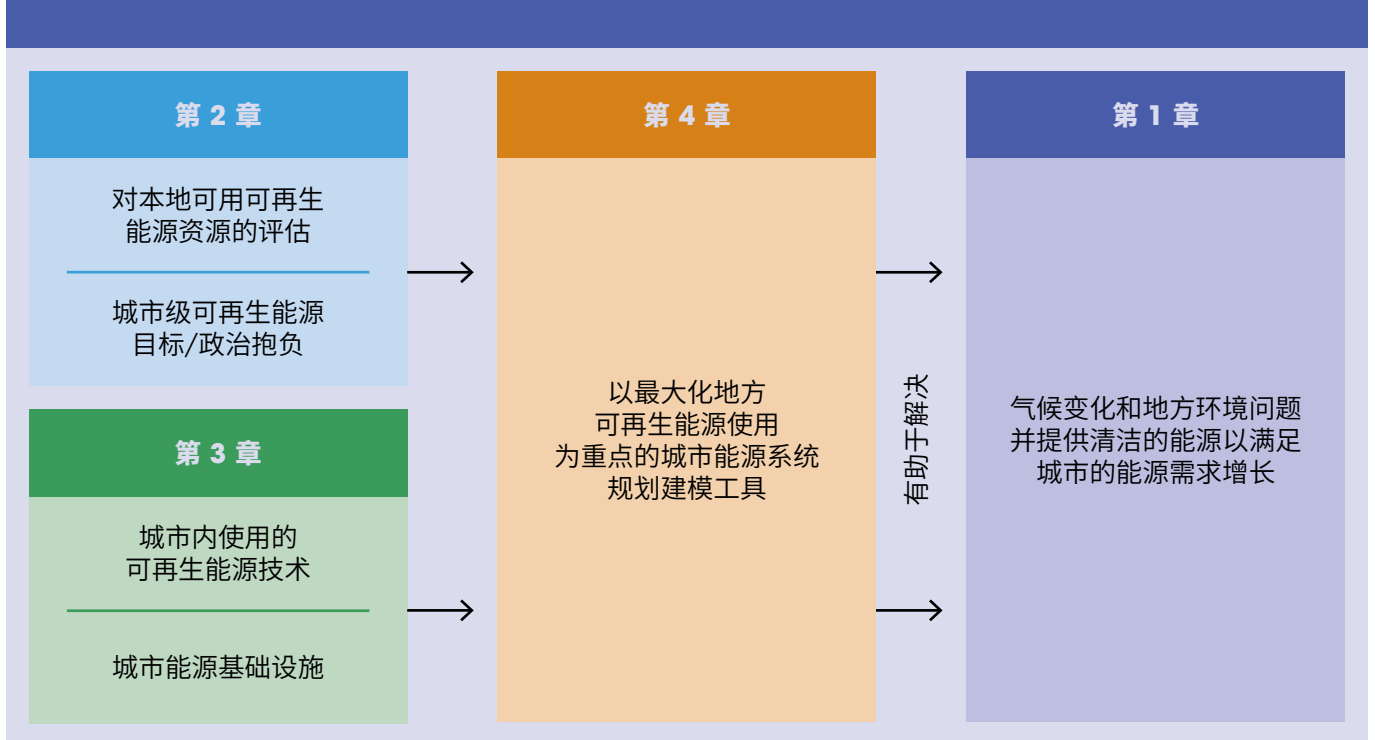
第 2 章通过以下分析，揭示了在城市内及其周边开发本地可再生能源的潜在机会：城市已制定的可再生能源目标；本地现有的可再生能源资源和发电厂；目前城市附近可能被替代能源替代的化石燃料设施。本章介绍了本地可再生能源资源的评估，可以帮助城市制定合理的可再生能源目标（如果尚未制定）。

第 3 章讨论了城市可再生能源的关键转换技术，包括太阳能光伏、太阳热能、城市风能、直接利用地热能、生物能源和转废为能。此外，智能电网、需求响应策略和区域能源网络也有所提及。

第 4 章为本地能源专业人士和规划人员介绍了城市能源系统规划可使用的各种建模工具的基本知识、机遇及局限性。具体而言，本章分析探讨了适合充分利用本地可再生能源的各种工具。有各种工具可用于各种应用，从早期规划阶段评估可再生能源解决方案的可行性到之后的系统设计（例如确定规模和运营）以及长期市政可再生能源战略制定。

本章重点介绍了如何利用这些工具评估可再生能源方案。还探讨了与发展中国家规划相关的数据挑战和关键问题等其他相关方面。

图 3： 本报告中的章节：应对城市挑战的关键步骤





2.

城市可再生能源的潜在机会

2. 城市可再生能源的潜在机会

本章重点介绍城市层面加速利用可再生能源的机会。城市需要考虑的关键问题包括：

- 越来越多城市制定了可再生能源的目标，但 80% 以上的这些目标都是欧洲和北美城市制定的。鉴于亚洲和非洲无论在城市人口还是能源需求预计都将经历最迅速的增长，因此，这种目标的地理分布不均可能不利于在城市层面实现《巴黎协定》制定的全球气候目标。
- 制定了可再生能源目标的城市，人口大多在 100,000 至 500,000 之间。制定了可再生能源目标的大城市和特大城市大多只追求将能源结构中的一小部分替换为可再生能源。
- 在制定可再生能源目标的城市中，大部分（671 个城市中有 551 个，占比 82%）位于人均 GDP 较高的国家，表明目前制定可再生能源目标的城市与经济状况之间存在明显的相关性。
- 水电、生物能源和转废为能在帮助城市实现可再生能源目标以及能源结构脱碳转型方面发挥着明显作用。虽然太阳能和地热能的巨大潜力有待开发，但其在城市中的使用正在增长，城市利用风能的能力也在发展，但进展缓慢。在一些城市，城郊地区为可再生能源发电提供了潜在场址。

2.1 全球城市层面的可再生能源目标分布情况

一般而言，制定可以实现的宏大目标体现了政府或组织的政治承诺水平，也是公共决策过程中的重要一环（Marsden 和 Bonsall, 2006; Hepburn, 2006）。过去十五年来，国家层面的可再生能源目标为所有相关利益方（特别是制造商、投资者和项目开发商）提供了长期政治信号和政策方向，在加速可再生能源部署方面起到了关键推动作用（IRENA, 2015a）。

城市层面的可再生能源目标在原则上也可以发挥类似作用，但在大多数国家，由于城市与国家能源系统的相互联系，城市对能源的管理权往往有限。

过去十年中，制定可再生能源目标的城市数量增长了六倍以上，2010 年仅有不到 100 个城市，而到 2019 年已有 671 个城市，范围横跨 70 个国家。各城市共制定了将近 1,000 个与可再生能源相关的目标³，有些城市还制定了多个目标。其中大部分是欧洲和北美城市，而亚洲和非洲城市在制定目标方面比较滞后。

总体而言，中小型城市参与度最高，当然也有一些特大城市在城市能源转型方面处于领先地位。

³ 包括城市、市政和社区层面，以及部门和特定技术的可再生能源目标，既有绝对值目标，也有相对值目标；但不包括减少碳排放、提高能效和电气化目标（虽然这些目标可能间接影响可再生能源的发展）。

通过高效信息交流和资源共享，再加上制定可再生能源目标、使用可再生能源相关的同行压力，参与全球和区域低碳发展倡议的城市相互影响，积极制定本地可再生能源目标。

但制定专门的目标并非提高可再生能源使用率的唯一手段。可再生能源目标也不是跟踪进度的唯一指标。

即使没有制定目标，过去十年中，由于太阳能光伏电池板和电池储能系统的成本急剧下降，可再生能源的应用规模也大幅扩大，帮助满足城市尤其是农村电气化不断增长的需求。

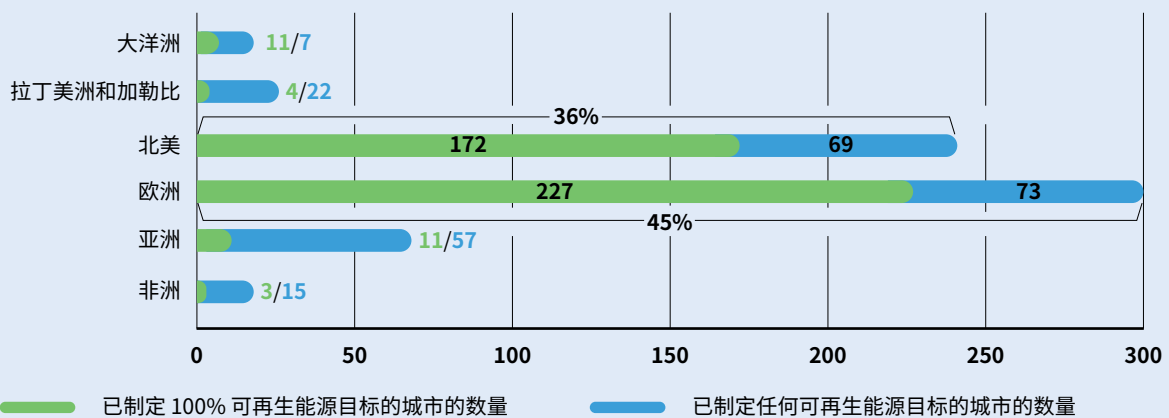
越来越多城市制定了可再生能源目标，但大多为欧洲和北美城市，这些地区经济富裕，处于温带或寒带气候。

设定可再生能源目标的
城市
主要集中于气候
较寒冷的富裕地区。

本报告分析的 671 个城市中⁴，45% 是欧洲城市，36% 是北美城市。制定了 100% 可再生能源目标的 428 个城市子集也存在相似的地理分布特征，如图 4 所示。

4 使用 CDP (2015 - 2018 年的城市可再生能源目标) (CDP, 2019a)、REN21 (REN21, 2019a)、carbonn 气候注册 (carbonn Center, 2019)、全球 100% 可再生能源平台 (100% Renewables, 2019)、美国市长气候联盟 (Climate Mayors, 2018)、美国市长会议 (US Conference of Mayors, 2020)、塞拉俱乐部 (Sierra Club, 2019)、UK100 (UK100, 2019) 和 100% 可再生能源地图集 (100% Renewable Energy Atlas, 2019a) 的数据汇编了城市可再生能源目标数据库。该数据库并不全面，未囊括所有城市可再生能源目标。

图 4: 可再生能源目标和 100% 可再生能源目标的地理分布



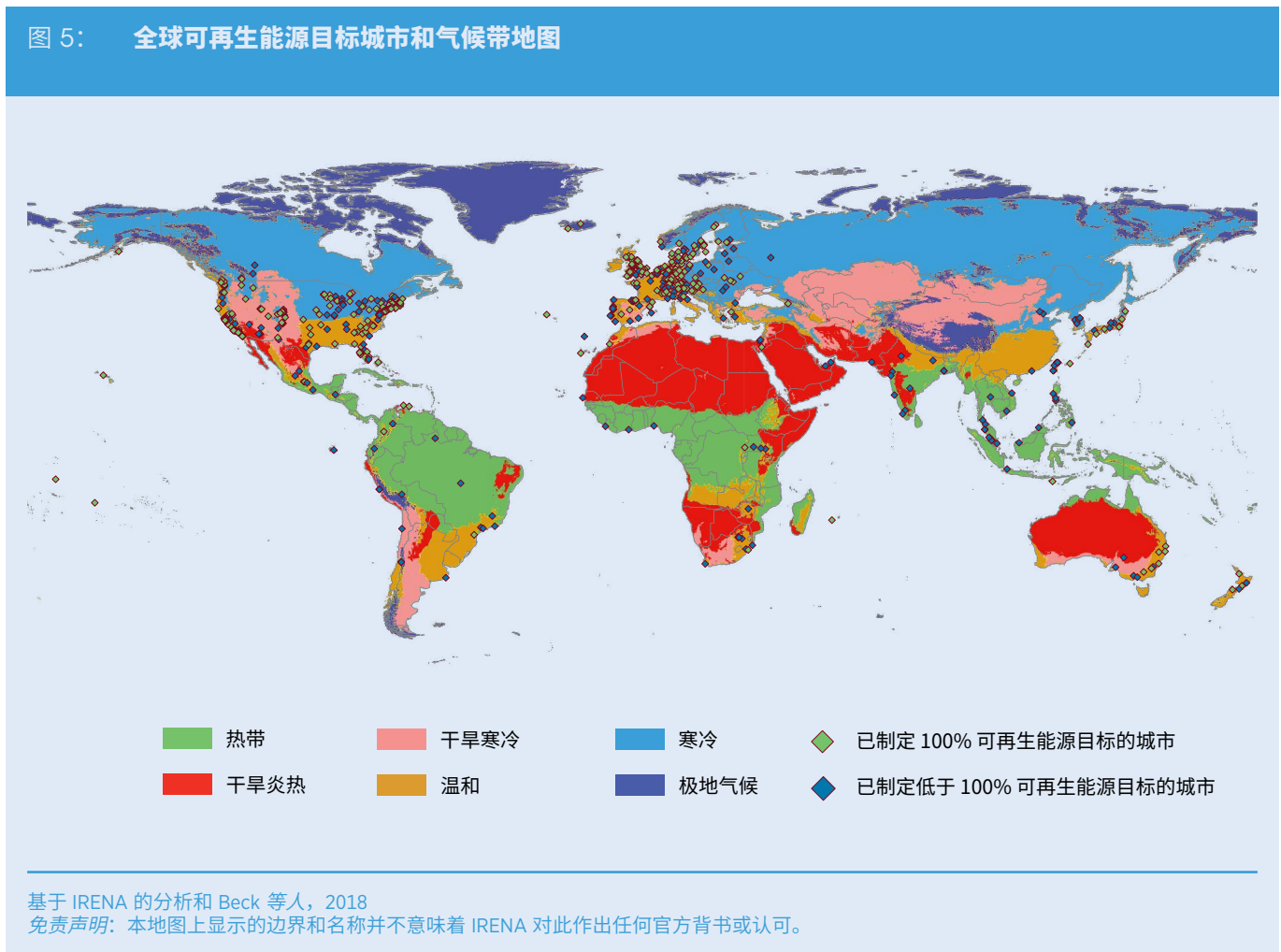
基于 IRENA 的分析

在制定了可再生能源目标的城市中，80% 以上位于气候通常处于温带或寒带地区的欧洲和北美（图 5）。这一事实对能源需求和所需的能源服务类型（特别是冬季供热）有显著影响。评估的 980 个可再生能源目标（包括所有类型）中，专门的供热目标只有 50 个左右⁵，不到总数的 5%。

而针对可再生能源发电的目标有 389 个，占比达 40%。但是，针对所有可再生能源的其余 55% 的目标也涉及供热，反映了最终使用部门（包括供热）的电气化趋势 — 得益于过去十年来技术成本急剧下降，太阳能光伏和风力发电快速规模化。

5 包括 49 个仅针对供热的目标和 6 个结合电力与供热或运输的目标。

图 5： 全球可再生能源目标城市 and 气候带地图



目标分析还表明，制定了可再生能源目标的城市与城市整体经济状况之间存在相关性。根据国际货币基金组织 (IMF) 分类，在制定可再生能源目标的城市中，大多数 (671 个城市中有 551 个，占比 82%) 属于人均 GDP 最高的 30 个国家 (IMF, 2019)。

而且，其中 40% 的城市位于人均 GDP 最高的 10 个国家 (卢森堡、瑞士、挪威、爱尔兰、卡塔尔、冰岛、美国、新加坡、丹麦和澳大利亚)。与此形成鲜明对比的是，人均 GDP 最低的 30 个国家中，只有 4 个城市制定了此类目标。

展望未来，发展中国家迅速发展的城市或新兴城市需要大规模扩大可再生能源使用规模。预计亚洲和非洲的城市人口和能源需求将经历最迅速的增长。因此，在这个方面，亚洲和非洲非常关键。可再生能源可以帮助发展中国家避免陷入化石能源陷阱。除其他政策工具外，在城市层面制定可再生能源目标可为城市可再生能源发展的潜在投资者和项目开发商提供政治信号，并在一定程度上表明政策一致性。

能源需求上升的地区
拥有巨大的资源潜力，
但大多缺乏可再生能源目标

亚洲和非洲在制定可再生能源目标方面比较滞后。

根据联合国的数据，未来三十年中，预计将新增 25 亿城市居民，90% 的新增城市人口来自亚洲和非洲；预计到 2050 年，全球三分之二的人口将生活在城市地区 (联合国经社部，2015；联合国经社部，2016)。

过去三十年中，**非洲**城市化水平稳步提高。2015 年，43% 的非洲人口居住在城市，比 1990 年增加了 12% (联合国非洲经济委员会，2017)。据联合国预测，从现在到 2050 年，城市化趋势增速将维持在 2.7% 至 3.6% (联合国经社部，2018)。到 2050 年，非洲将新增约 10 亿城市居民，占同期全球新增城市人口 40%。

在非洲较先进的发展中国家，城市化的主要推动力来自于总体经济增长、农业部门生产效率提高、工业化和城市基础设施投资增长 (Cilliers 等，2011)。所有这些驱动因素都会影响能源生产与消耗。众所周知，没有可靠的能源供应及相应的基础设施，经济发展便无以为继。

非洲仍有近 6 亿人无电可用。而在非洲欠发达地区，城市化的主要推动力是人口增长和在城市寻求机会改善生活条件的欲望。然而，即使在非洲的城市地区，仍有 60% 的居民生活在贫民窟，生活用电、清洁餐厨燃料和就业机会都非常有限 (Brookings, 2020)。

整个非洲都有丰富的可再生能源，预计太阳能资源超过 10 太瓦、风能 110 兆吉瓦 (GW)、水电 100 GW、地热能 15 GW，还有大量生物质能源（包括有机城市垃圾）（Hott, 2018; IRENA, 2015b）。

水电在非洲大部分地区都占据重要地位，而且大多数国家的风能和太阳能也具有巨大潜力。许多非洲国家的太阳辐射量每年超过 2,200 千瓦时/平方米 (kWh/m²)，是德国的两倍。而可用于发电的地热资源主要限于非洲东部，生物燃料生产潜力最高的是撒哈拉以南非洲（IRENA, 2015c）。

在这种背景下，非洲国家如何协调可再生能源开发与可持续城市发展，对该区域的可持续经济社会发展具有深远影响。

尽管只有 18 个非洲城市制定了可再生能源目标，但截至 2018 年，已有 225 个非洲城市（撒哈拉以南非洲 202 个城市，北非 23 个城市）通过《全球气候与能源市长盟约》承诺减少温室气体排放（气候与能源市长盟约，2020）。可再生能源为非洲国家提供了充满希望的选择，既可满足非洲国家不断增长的能源需求，又可减少其碳足迹，并获得其他利益，例如改善空气质量（包括室内空气质量）和公共卫生，提高对极端天气事件（例如暴风雨、洪水和山火）的适应能力。

与发达国家相比，非洲国家更容易实现这种技术跨越，因为它们不受制于现有能源基础设施，成本会低得多。需要进一步建立和理解减少温室气体与使用可再生能源之间的联系，地方决策者及其顾问尤其需要如此。

从长远来看，如果没有可持续的能源系统，非洲实现的任何繁荣都将无法持续。如果城市希望发展能适应气候变化的可持续能源系统，则必须将可再生能源摆在核心地位。

过去 30 年中，**亚洲**城市人口迅速增长，从 1990 年的 10.4 亿增加到 2018 年的 22.7 亿。预计到 2030 年将达到 28 亿，到 2050 年将达到 34.8 亿。虽然预计 2050 年亚洲的城市化率 (66.2%) 低于全球平均水平 (68.4%)，但全球一半以上的城市人口将生活在亚洲（联合国经社部，2019）。世界上一些最大型的城市也位于亚洲，其中 33 个全球特大城市有 20 个在亚洲，预计到 2030 年，全球特大城市将增加到 43 个，且其中 27 个在亚洲（联合国经社部，2018）。

全球化和区域经济增长共同推动亚洲城市人口增长。虽然贫民窟居民的绝对数量有所增加，凸显了城市没有能力应对人口迅速增长时出现的问题，但城市化进程确实帮助许多人摆脱了贫困（联合国人居署，2010）。

亚洲城市在可持续发展方面仍然面临着诸多挑战，包括提供经济机会、建设住房与基础设施、治理空气污染和高碳排放问题的能力（联合国亚太经社会和联合国人居署，2015；REN21，2019b）。城市人口增长也促进了能源需求增长。许多城市面临能源短缺的问题（Dulal 等，2013），而且随着亚洲国家从不可再生能源出口国转变为进口国，能源安全问题将越来越普遍（Chang 和 Li，2014）。

为了降低对进口能源的依赖，这些国家将受益于本地可再生能源发电量的增加，这也将有助于减少空气污染和碳排放，同时改善贫困地区的能源供应（Vliet 等，2012）。

亚洲拥有丰富的可再生能源资源，但大部分尚未开发。各地区情况有所不同，太阳能和生物质能集中在南部热带地区，风能集中在北部，可用于发电和直接利用的地热能极为丰富。水电在亚洲分布较均匀，是开发利用最多的可再生能源资源，总装机容量达 593 GW，占全球水电装机容量的 47%（IRENA，2019e）。但水电在尼泊尔和不丹等山区国家更为普遍，而那些快速发展、快速城市化的国家通常更加依赖化石燃料（Dulal 等，2013）。

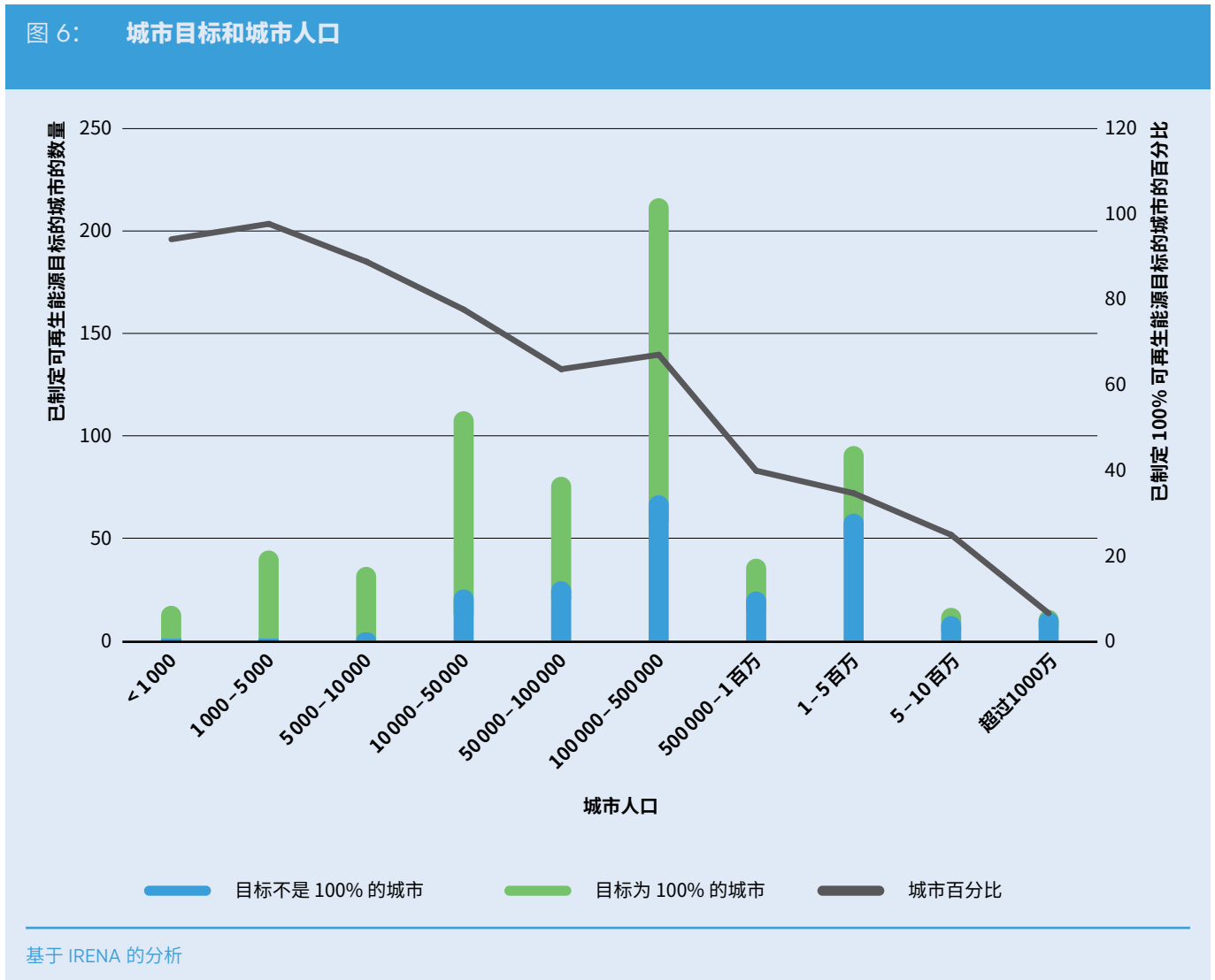
可再生能源的政策布局正在逐步扩大，这对帮助城市避免陷入高排放发展陷阱至关重要。目前，亚洲有 70 个城市制定了可再生能源目标（占全球总数的 10%），但这些目标通常都设得很低，没有什么远大抱负，只有 11 个城市（3%）制定了 100% 可再生能源目标。亚洲城市发展倡议（CDIA）通过缩小城市发展规划与可持续实施基础设施项目之间的差距来帮助城市实现其目标（CDIA，2020）。

总体而言，亚洲和非洲的现有城市和未来城市都必须转变其城市基础设施发展范式，无论是否有具体目标，都必须让可再生能源发挥重要作用。这将有助于减少城市的碳足迹，顺应限制碳排放的全球倡议，更重要的是，这还将帮助城市减轻全球及本地气候变化的负面影响。

城市人口和可再生能源目标

可再生能源目标制定与城市人口规模有一定关联。制定了可再生能源目标的城市，大多为人口在 100,000 至 500,000 之间的中等城市（图 6）。分析还显示，城市规模越大，100% 可再生能源目标占目标总数之比越低。部分原因是大城市的现有基础设施更多，脱碳难度更大。此外，世界上规模最大的城市大都位于发展中国家，可再生能源普及率较低；2018 年，全球共有 33 个特大城市，只有 4 个位于欧洲或北美（联合国经社部，2018）。

图 6: 城市目标和城市人口



迄今为止，大多数已经制定可再生能源目标的大城市和特大城市都只部署了少量可再生能源。只有一个特大城市（洛杉矶，人口 1,000 万）制定了 100% 可再生能源目标，设定在 2045 年实现这一目标（塞拉俱乐部，2019）。

除圣保罗和深圳这两个城市外，其他特大城市的抱负则要低得多，可再生能源占比目标都低于 30%。在制定 100% 可再生能源目标的城市中，人口在 500 万至 1,000 万的只有 4 个（亚特兰大、巴塞罗那、马德里和多伦多），人口在 100 万至 500 万的有 33 个。

制定了可再生能源目标的城市，人口规模的地区差异很大。一般而言，新区域制定目标的趋势是，从信息流动更快、同行交流更积极的大城市开始，然后逐渐向有能力制定更宏大目标的小城市扩散。而在欧洲和北美等发达地区，许多城市都制定了目标。

这与处于发展初期的非洲、拉丁美洲和加勒比形成了鲜明对比。制定了目标的所有非洲城市，人口均大于 100,000，而制定了目标的所有拉丁美洲和加勒比城市，除哥伦比亚的 Las Gaviotas（仅 200 人的生态村庄）外，人口均大于 50,000（100% Renewable Energy Atlas, 2019b）。制定了目标的大洋洲和亚洲城市，大多为较大城市，但也有一些较小的城市也制定了可再生能源目标。

经济机会是制定目标的主要驱动因素（Martinez 等，2018；ICLEI，2016；REN21，2019a；REN21、ISEP 和 ICLEI，2012）。总体而言，人口在 100,000 至 500,000 的欧洲和北美城市，经济成熟且多元，具有持续增长潜力。在这些城市推广可再生能源可以生产清洁能源，满足城市的能源需求，同时也可以促进发展新的商业，创造本地就业机会。

仍在扩张的城市拥有更多机会。这些城市对现有建筑物和网络的改造工作更少，在城市基础设施中集成可再生能源系统的成本更低。在这些城市制定可再生能源目标将鼓励地方政府制定全面的城市能源基础设施长期计划。同样，在规划城市或新建城市中增加可再生能源使用比例将有利于其未来的减排工作。预计 2018 年至 2030 年之间，每年将新增约 18 个 50 万至 100 万人口的城市，到 2030 年将达到 710 个城市（2018 年为 598 个）（联合国经社部，2018）。如何使用低碳和可持续能源为这些新城市或地区供电，将是决定全球能否成功应对气候变化的关键因素。

支持制定可再生能源目标的倡议

许多全球性和地区性倡议引导城市参与低碳发展，鼓励城市制定目标，相互联系，高效交流信息。有些倡议具有相同的目标和跟踪策略，而有些则让城市自行选择目标。尽管如此，它们都通过高效信息交流、资源共享和同行压力或激励来推动本地可再生能源目标的制定。分析表明，制定可再生能源目标的城市采取行动的可能性是其他城市的三倍（C40 城市集团，2019）。

以下概述了部分范围最广、目标最宏大的倡议：

- **气候与能源市长盟约**：虽然该倡议的参与范围最广，但其目标是减排，而非专门支持可再生能源。截至 2019 年 12 月，已有 10,086 个城市签署了此盟约，同意到 2020 年至少减少 20% 的 CO₂ 排放量，或到 2030 年减少 40%（与 1990 年的水平相比）。此外，有 6,413 个城市提交了如何实现目标的行动计划。该倡议始于欧盟（EU），但已扩大到中东和非洲部分地区（气候与能源市长盟约，2019）。截至 2018 年，已有 9,120 个城市签署了此盟约，分析发现，到 2030 年，这些城市的减排潜力合计为 1,440 百万吨二氧化碳当量（MtCO₂e）（Data Driven Yale 等，2018）。
 - **C40 城市集团**：截至 2019 年 12 月，已有 94 个城市（占全球 GDP 25%，占全球人口十二分之一）同意在 C40 倡议下在 2050 年前实现净碳中和目标。C40 城市必须在 2020 年之前根据《巴黎协定》的目标制定气候行动计划。这 94 个互联城市规划了 10,000 多项行动（C40 城市集团，2019），其中许多涉及可再生能源部署。到 2030 年，这些城市的减排潜力合计为 820 MtCO₂e（Data Driven Yale 等，2018）。
 - **碳中和城市联盟**：这个全球特大城市网络争取在 2050 年前将温室气体排放量减少 80% 至 100%。该联盟已在这些城市投资了 27 个创新项目，投资金额达 240 万美元（碳中和城市联盟，2019）。
 - **ICLEI - 地方可持续发展协会的 carbonn 气候行动数据上传系统**：Carbonn 气候行动数据上传系统是地方气候行动报告统一平台。该平台包括 1,066 个实体（大多为城市，也有部分地区），1,870 个气候目标，6,874 项减缓和适应行动，计划到 2050 年减少二氧化碳排放 26.8 吉吨（Gt）（carbonn Center，2019）。
 - **塞拉俱乐部**：截至 2019 年 12 月，美国有 145 个城市、12 个县和 9 个州参与了塞拉俱乐部的 Ready For RE100 倡议，并承诺在至少一个领域实现 100% 使用可再生能源电力。这些城市中已有六个实现了这一目标（塞拉俱乐部，2019）。该倡议还在迅速发展。2017 年前，该倡议只有 50 个城市、4 个县和夏威夷州参加，但已经提出了到 2030 年可能减少 2,300 万吨二氧化碳，增加相当于 2,000 兆瓦（MW）风能的可再生能源（塞拉俱乐部，2017）。
 - **UK100**：通过该网络，英国有 90 位地方政府首脑已承诺到 2050 年 100% 转换为可再生能源。他们正在开展运动，加大投资脱碳技术，就气候变化问题展开沟通，消除空气污染。虽然 UK100 是上述倡议中抱负最大的统一可再生能源目标，但它不具约束力（UK100，2019）。
- 其他重要倡议还包括美国市长气候联盟（400 名成员）、美国市长会议气候保护协议（1,066 名成员签署）以及美洲开发银行的拉丁美洲和加勒比城市网络（超过 160 个城市）（美国市长气候联盟，2018；美国市长会议，2020；美洲开发银行，2020）。

2.2 有关本地可再生能源和发电厂目标的空间分析

本节探讨制定了可再生能源目标的城市（包括 100% 可再生能源目标）、可再生能源潜力⁶和现有本地可再生能源发电厂之间的潜在空间关系。为方便比较，还应考虑将城市附近的化石能源发电厂与可再生能源资源潜力和现有可再生能源目标进行对比，以展现潜在的替代机会。

使用的城市数据库是联合国统计司通过每年分发问卷调查收集全球城市的数据（联合国统计司，2020）。

6 使用的资源数据收集自不同粒度级别的多个来源，仅用于指示性分析。

该数据库涵盖 4,591 个城市，从 10 万人口的小城市到人口超过 1,000 万的特大城市，这与已制定可再生能源目标的城市的人口规模范围相符。

该发电厂数据库（包括可再生能源和化石能源）利用了世界资源研究所（Byers 等，2019）、GlobalData（GlobalData，2019）和 UDI 世界电厂数据库（WEPP）（普氏能源资讯，2018）的全球电厂发电量及位置信息。我们采用了空间聚类算法，使用两个不同阈值（离最近市中心的距离）对发电厂进行地理编码：水电站和太阳能光伏电站为 20 千米，所有其他发电厂为 50 千米。此外，我们还对数据库进行了清理，以确保根据给定城市的每种技术的特征实现最佳整合。



太阳能

尽管城市的太阳能使用量正在增长，但潜力仍然巨大，有待开发。

太阳辐射

据分析，在太阳能潜力最高的城市（即水平面总辐射量（GHI）排名前 10% 的城市）中，有 95% 未制定支持可再生能源发展的目标（表 1）。只有 Leon de los Almadras（墨西哥）、Puebla de Zaragoza（墨西哥）和基苏木（肯尼亚）几个城市例外，但它们目标并不宏大，都没有制定 100% 可再生能源目标。即使在太阳能潜力最高的 30% 的城市中，也只有 6%（39 个城市）制定了可再生能源目标，只有 2%（14 个城市）制定了 100% 可再生能源目标。就绝对值而言，这表明 582 个太阳能资源潜力极优的城市缺乏政治承诺或抱负，未计划扩大使用可再生能源（尤其是太阳能）来满足能源需求。

GHI 较高的城市大多位于中东和非洲、拉丁美洲和加勒比以及亚洲部分地区，而已制定可再生能源目标的城市大多位于 GHI 并不高的欧洲和北美（图 7）。

城市中还有
巨大的太阳能潜力
有待开发。

即使没有任何政策支持，进一步详细调查和分析也可发现这些城市存在的商机。

也就是说，太阳能潜力低不一定会阻碍城市利用太阳能，也不妨碍城市通过经济可行的方式实现可再生能源目标。例如，英国苏格兰格拉斯哥的 GHI 仅为 2.41。虽然太阳能不是格拉斯哥主要的可再生能源资源，但该市仍然开发使用了太阳能光伏和太阳热能。当地政府计划到 2030 年将太阳能光伏装机容量提高到 9.6GW，而 2014 年仅为 3 MW（格拉斯哥市议会，2014）。

表 1： 每个数据集中太阳能潜力高的城市的数目

百分位	GHI (kWh/m ²) 平均日总和	研究的城市 (数据集)	有可再生能源目标 的城市数目	有 100% 目标 的城市数目
前 10 名	6.126	66	3	0
前 20 名	5.851	248	17	6
前 30 名	5.493	621	39	14

基于 IRENA 的分析

图 7: GHI 排名前 30% 的城市以及有可再生能源目标的城市

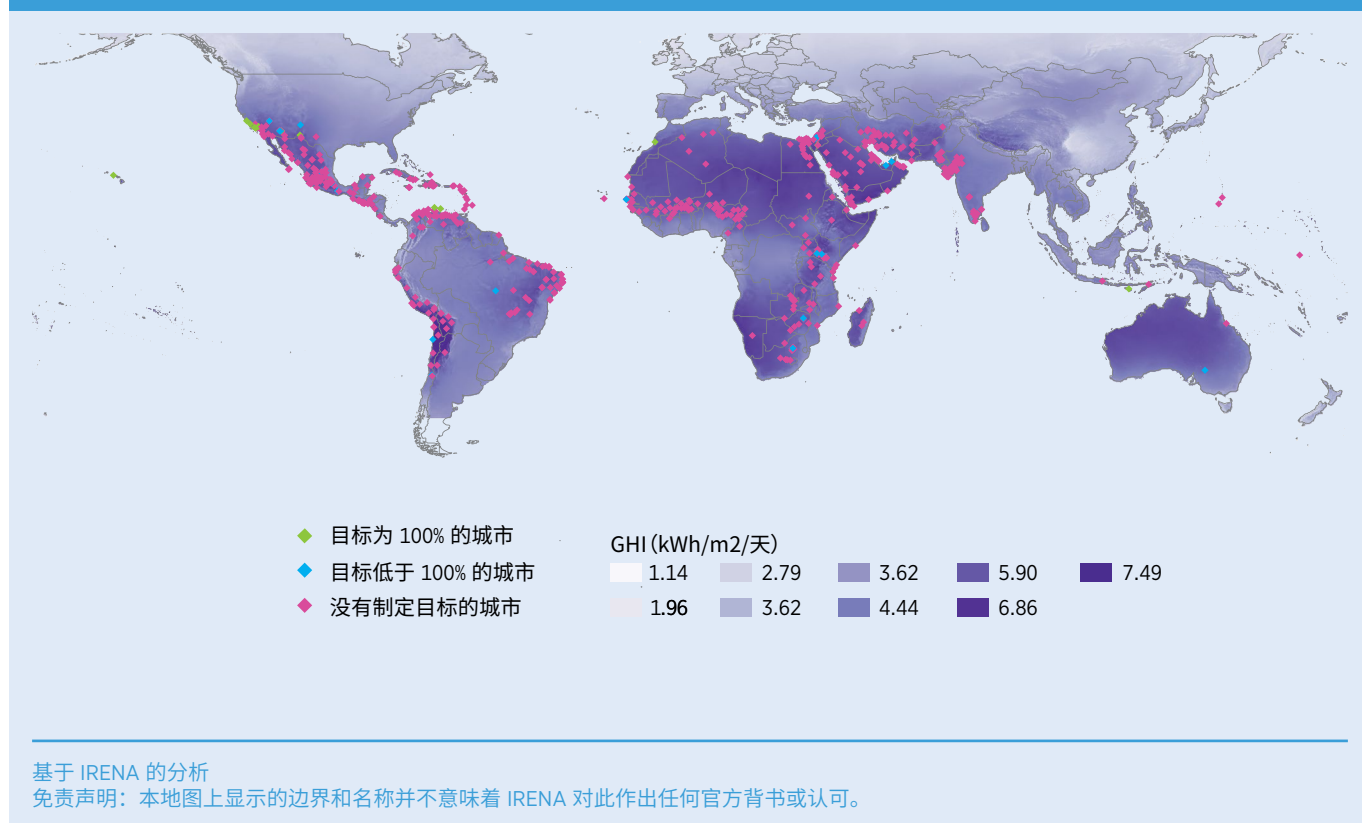
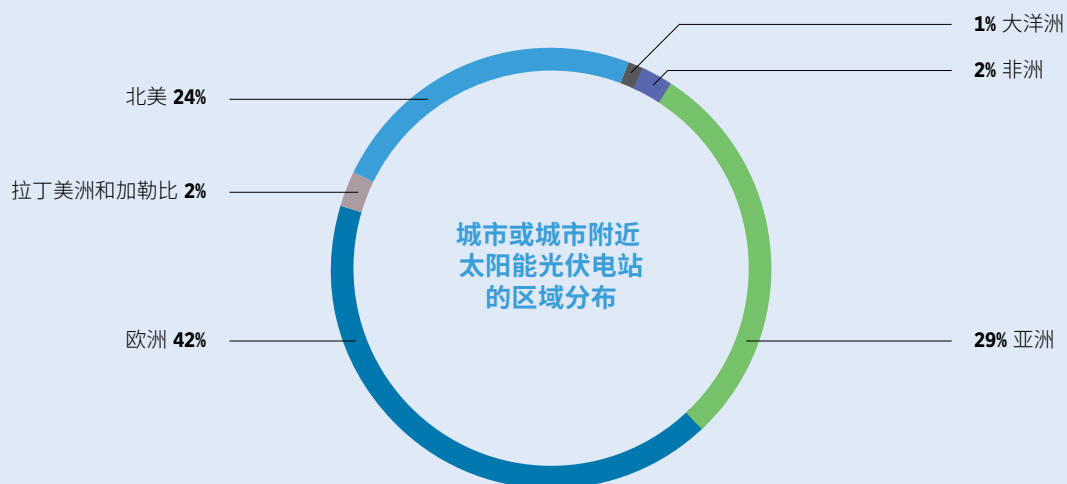
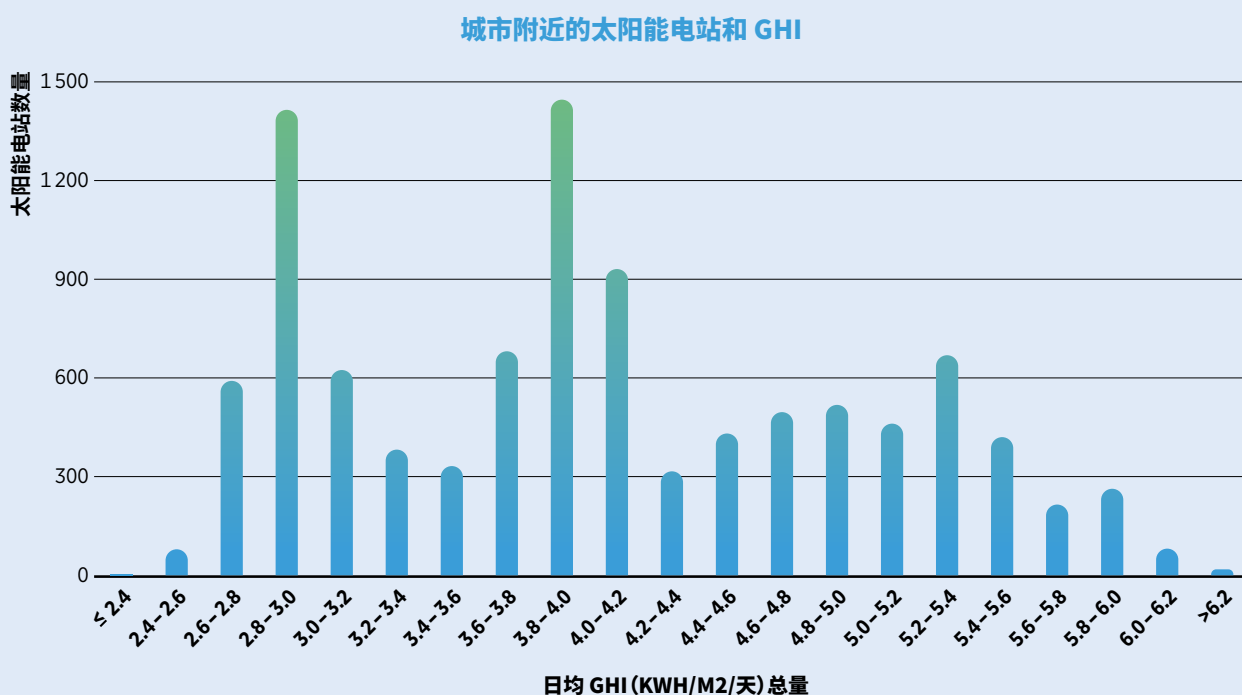


图 8： 太阳能光伏电站的分布（按 GHI 和地理区域划分）



基于 IRENA 的分析

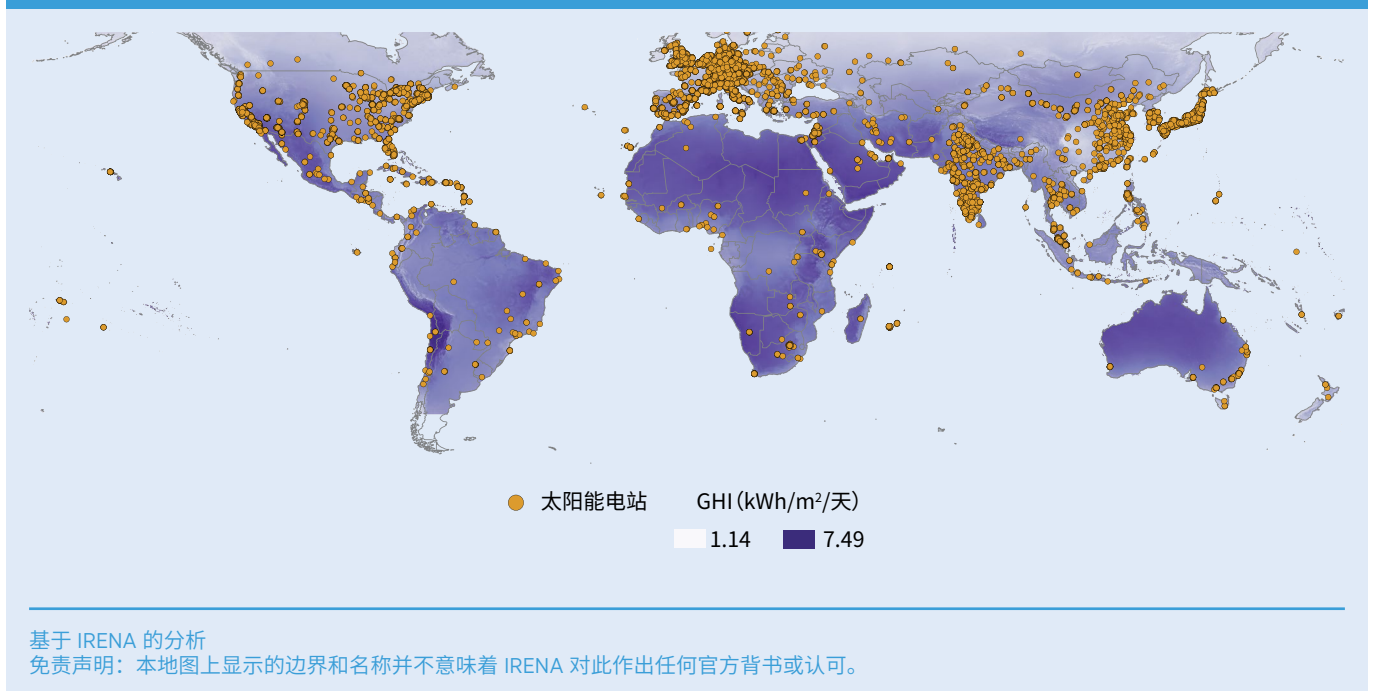
太阳能电站

城市的太阳能资源潜力与现有太阳能电站分布之间的关联不大。位于城市附近的 10,138 个太阳能光伏电站中，约有 57% 位于 GHI 仅为 2.8 至 4.2 kWh/m² 的地区（图 8）。虽然欧洲的平均 GHI 较低，但将近一半的太阳能电站位于欧洲，亚洲和北美各占四分之一左右；全球 95% 的太阳能电站位于这三个地区。

在整个亚洲，在城市附近部署太阳能电站数量最多的前几名分别是中国、日本、印度和几个东南亚国家（例如菲律宾和泰国）（图 9）。在全球最大的两个经济体（美国和中国），大多数太阳能电站都分布在经济发达的沿海地区。

欧洲、北美和亚洲城市附近的太阳能电站平均装机容量在 4.64 MW 至 13.75 MW 之间，与偏远地区动辄几百兆瓦的大型太阳能电站相比，规模相当小。

图 9： 城市附近太阳能电站的地理分布



这表明，即使在太阳能资源并不丰富的地区，城市也可以建设太阳能光伏电站。非技术因素（例如，地方政府的政治抱负、经济活动强劲推动的电力需求增长、支持政策和监管框架以及公众认可）对扩大城市太阳能光伏应用规模也起着关键作用。此外，分析表明，对电力负荷中心附近的太阳能光伏电站而言，规模经济效益是相对次要的考虑因素。

因此，对城市而言，选择可以与新旧建筑物中集成的分布式太阳能光伏系统是合理之举，特别是在人口稠密、没有空间规划大型发电厂的城市地区。数字技术和其他创新正发挥着越来越大的作用，帮助配电系统运营商和公用事业单位监测、运营和控制此类资产。分布式系统的其他优势（例如，避免长距离输电和光伏电站配置模块化）可以轻松抵消规模因素，让规模较小的本地光伏电站也可以良好运营（Skalik 和 Skalikova, 2019; Dhimish 等, 2018）。

在中东和北非地区，太阳能资源潜力（尤其是太阳直接辐射）巨大。例如，阿拉伯联合酋长国 (UAE) 的日均 GHI 达 6.5 kWh/m^2 ，一年中通常有 350 个晴天，日均日照时长达 10 小时（Masdar Institute 和 IRENA, 2015）。

由于沙漠面积巨大，土地可用性几乎没有什么问题，这是大型太阳能电站在该地区引领可再生能源部署主流的关键原因。

尽管如此，该地区的油气生产国在努力推动能源部门多样化的过程中，越来越重视分布式太阳能的发展。根据中东太阳能行业协会的数据，到 2019 年，迪拜共在 1,354 个站点建设了分布式太阳能光伏装置，总装机容量达 125 MW (Publicover, 2020)。为响应阿联酋在 2019 年联合国气候峰会上的承诺，即到 2030 年实现所有建筑物零碳排放，太阳能应用规模很可能将会继续扩大。

而非洲，虽然 GHI 高达 $5.815 \text{ kWh/m}^2/\text{天}$ ，是世界上平均 GHI 最高的地区之一，但城市附近的太阳能电站极少，仅占世界总数的 1%。这是因为，该地区的城市化率低，缺乏可以集成波动性可再生能源的电力基础设施，此外还有一些其他障碍。非洲太阳能资源虽然丰富，但基本尚未开发。

尽管各国越来越关注太阳能开发，相关活动也不断增加 (DIE, 2020)，但战略思维可有助于对可再生能源发展和正在推进的城市化进程进行协调。如果非洲国家能够在城市化过程中开发该地区巨大的太阳能潜力（以及其他清洁能源），并且能够根据经济增长推动的能源需求来规划电网发展，那么非洲的城市能源发展将跨向可再生能源，而不是走化石能源的老路。

风能

城市或城市附近的风能资源通常较多。

城市附近的风能资源

随着创新型风力涡轮机设计的出现，在建筑环境中利用风电的能力正在快速提升。但事实上，城市风电在实际应用中的部署仍然少之又少。不过，在城市周边地区，特别是在风能充沛的地区，建设小型风电场或仅部署几个风力涡轮机的情况越来越多。

使用 100 米高轮毂处的功率密度来作为城市附近的风能潜力⁷指标，本报告相关分析发现，许多制定了可再生能源目标的城市的风能潜力都比较高。

7 评估依据为全球风能地图集 (Global Wind Atlas, 2019)。



在没有输电线路或无法利用现有输电容量的地方，由于传输距离有限，使用专用线路连接潜在风电场和负荷中心在经济上是可行的⁸。

分析发现，在制定了可再生能源目标城市中，有 151 个（占总数的 40%）的风能潜力排名在前 30%（表 2）。在这些城市中，有 86% 制定了 100% 可再生能源目标。在风能潜力排名前 10% 的城市中，这些比例更高。

8 该研究使用的半径为 50 千米。

表 2: 每个数据集中风能潜力高的城市的数目

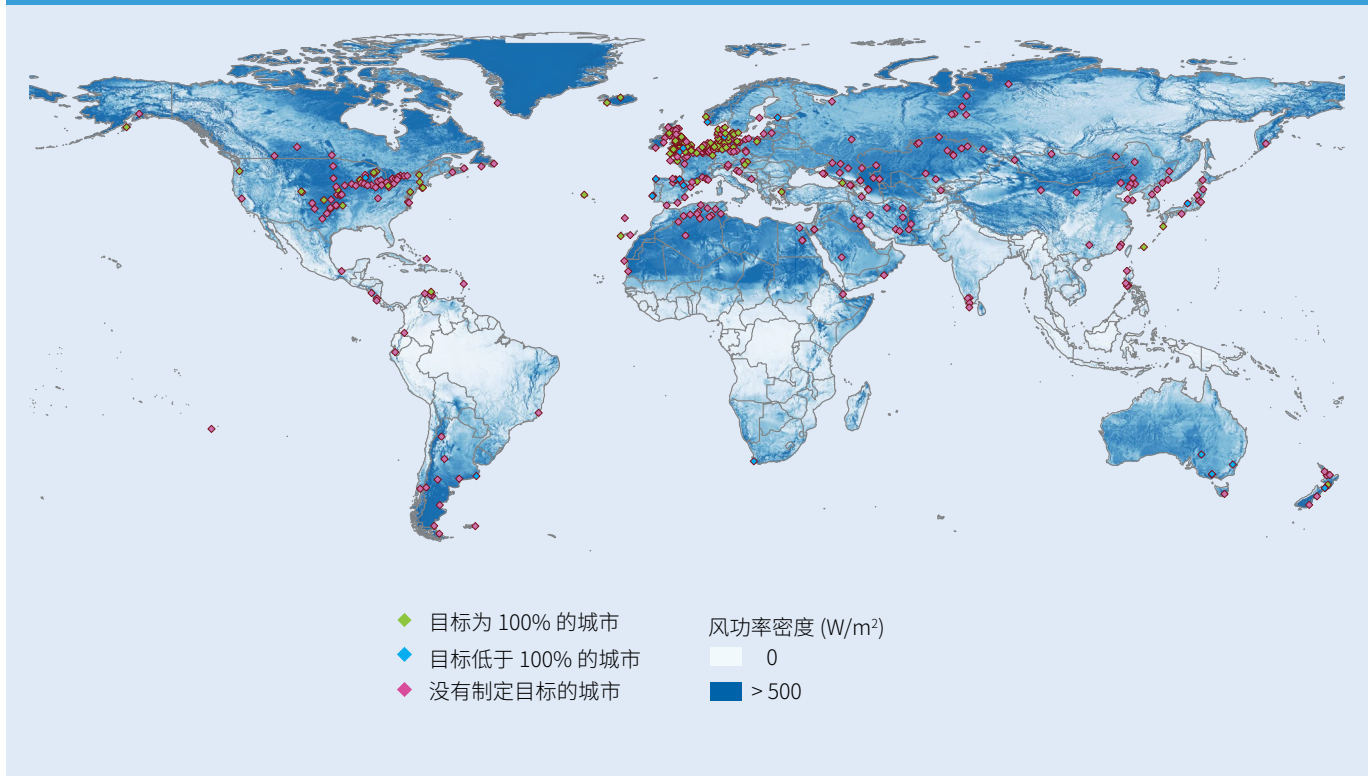
百分位	功率密度 (W/m ²)	研究的城市 (数据集)	有可再生能源目标的城市数目	有 100% 目标的城市数目
前 10 名	607.0	57	29	26
前 20 名	457.7	206	88	80
前 30 名	381.5	394	151	130

基于 IRENA 的分析

制定了可再生能源目标，且风能潜力排名前 30% 的城市大多位于欧洲（图 10）。但是，在研究的风能潜力良好的城市中，有一半以上尚未制定任何可再生能源目标。

这值得进一步研究，特别是根据风能和太阳能资源地图进行研究。鉴于风能和太阳能的时间分布特征，在许多地方，风力发电可与太阳能发电互补。

图 10: 风功率密度排名前 30% 的城市以及有可再生能源目标的城市



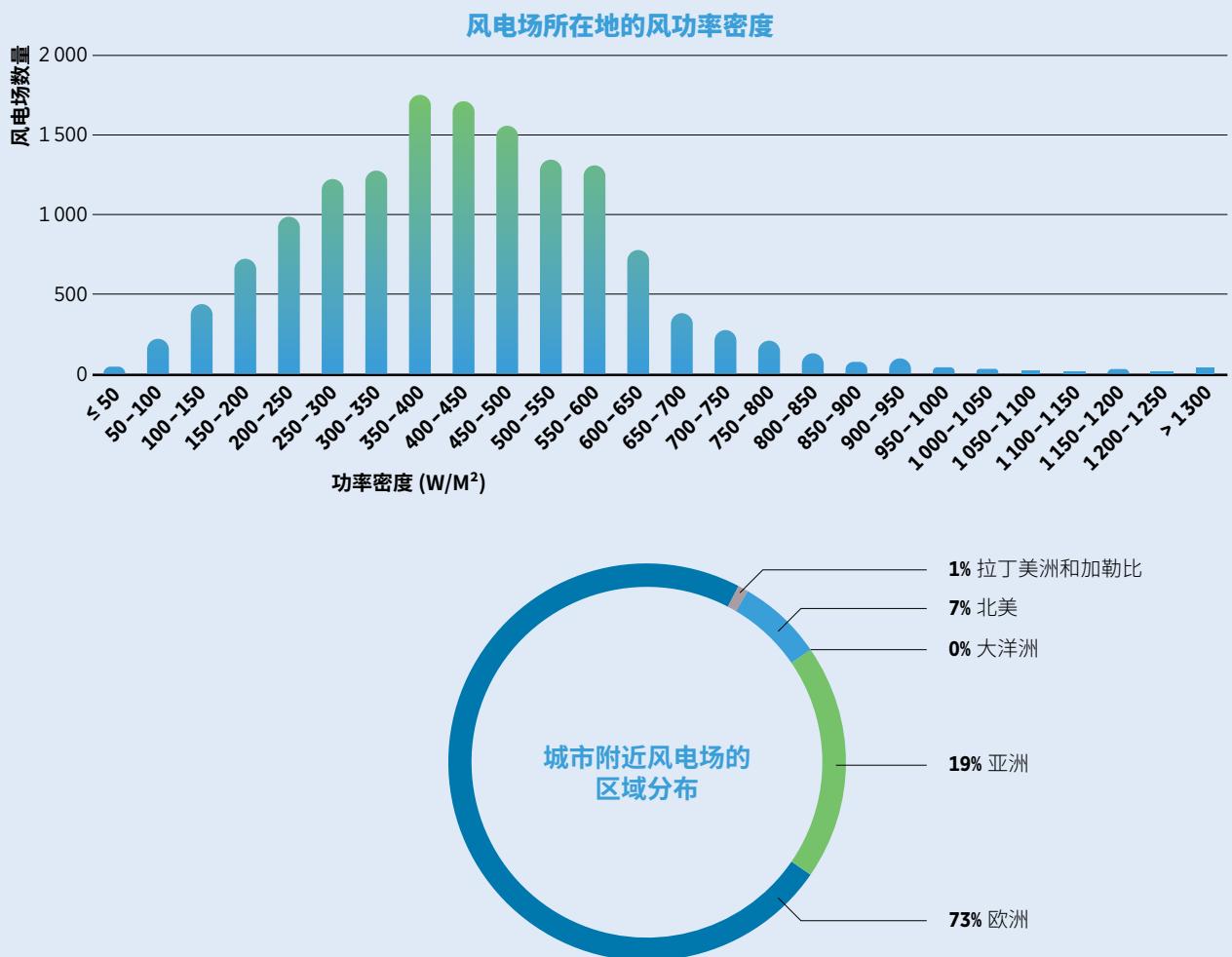
基于 IRENA 的分析
免责声明：本地图上显示的边界和名称并不意味着 IRENA 对此作出任何官方背书或认可。

城市附近的风电场

城市附近的 14,652 座风电场中，有 27% 功率密度为 350-500 瓦/平方米 (W/m²)，有 23% 功率密度为 500-650 W/m² (图 11)。

近四分之三的风电场位于欧洲，但它们仅占总装机容量的 44%，说明每座风电场的平均装机容量较低。

图 11： 城市附近风力发电厂的分布（按功率密度和地理区域划分）



基于 IRENA 的分析

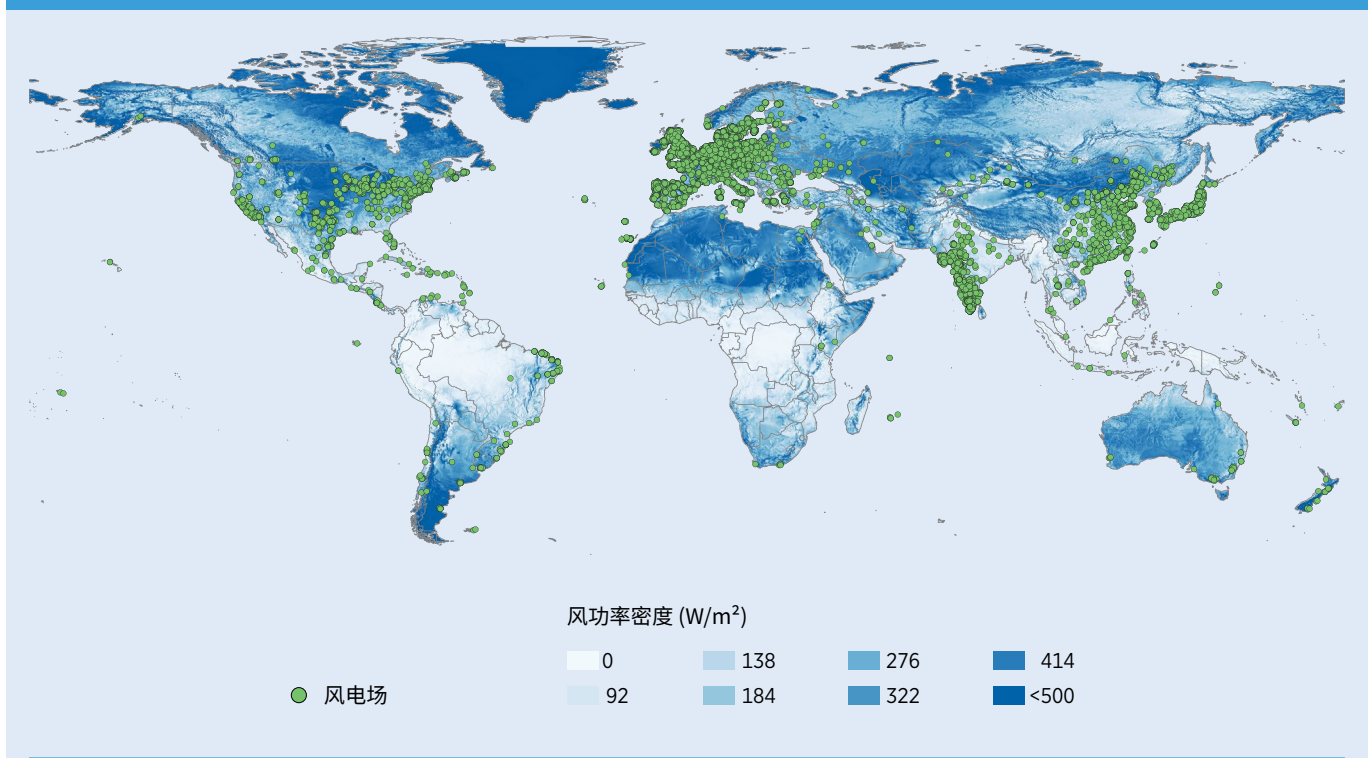
相反，亚洲的风电场仅占风电场总数的五分之一，但占总装机容量的 32%。

在亚洲，每座风电场的平均装机容量为 43 MW，而欧洲为 14.5 MW，这可能是由于中国和印度的城市能源需求更大。

从地理上看，风电场高度集中于欧洲、美国沿海地区、中国东部沿海和印度西部沿海地区（图 12）。

鉴于全球已制定可再生能源目标的城市将近一半都在欧洲，而且美国、中国和印度的沿海城市经济总体比较发达，因此可以认为，城市附近的风电场将为这些城市的清洁能源供应作出更大贡献。

图 12： 城市附近风力发电厂的功率密度和地理分布



基于 IRENA 的分析
免责声明：本地图上显示的边界和名称并不意味着 IRENA 对此作出任何官方背书或认可。

水电

水电可帮助城市实现可再生能源目标，助力能源结构脱碳。

按照CDP数据库，有275个城市的电力结构包含水电。其中有43%的城市，其水电容量占总装机容量25%或以上，还有30个城市将水电作为唯一的电力来源。在报告100%使用可再生能源电力的43个城市中，有26个位于巴西。在巴西，超过四分之三的电

力供应来自水电（CDP，2019b）。这表明，城市对附近水电资源的可获取性可能会推动本地政府制定可再生能源目标。

从全球来看，已制定可再生能源目标的城市均靠近水电潜力高于全球平均水平（按水电潜力中位数衡量（kWh/年）的河段（表3）。

平均而言，欧洲和北美城市附近的水电站的装机容量比亚洲及拉丁美洲和加勒比地区的水电站要小（图13）。

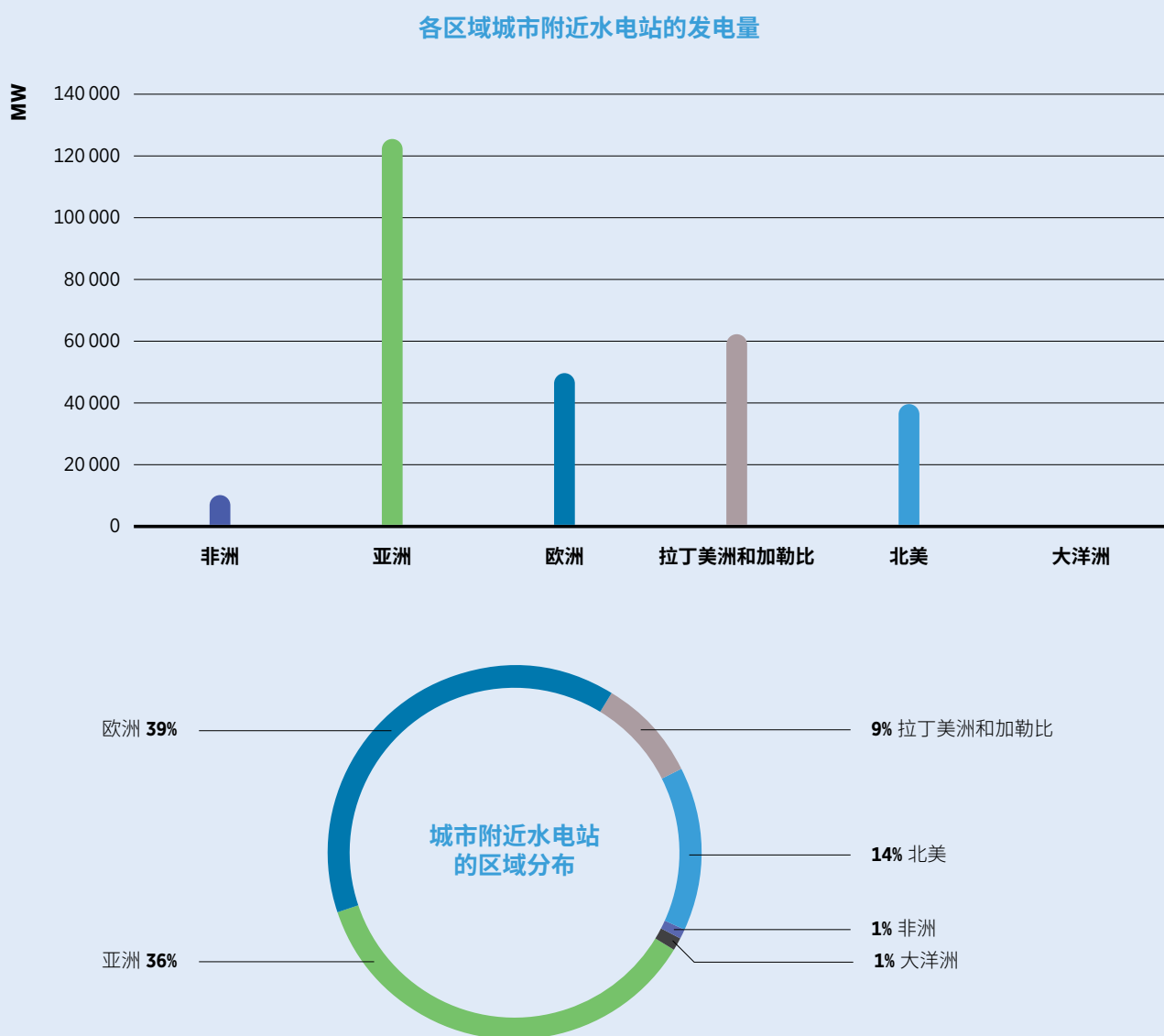
水电有利于能源结构脱碳，
并实现城市级可再生能源目标。

表 3: 每个数据集与最近河段的距离中位数以及河段功率

	研究的城市 (数据集)	有可再生能源目标 的城市	有 100% 目标 的城市
水电潜力中位数 (kWh/年)	165 563	233 015	226 884
与河流的距离中位数 (m)	2 070	1 462	1 385

注：Hoes 等人(2017)基于每个位置的河流坡度和径流计算了全球河流流域的水电潜力。由于流域的性质，该数据集在空间上并不连续。他们并没有去寻找每个点的潜力，而是去了解每个城市和水力发电站离最近的有潜力的位置有多远，以及该位置具有的水电潜力。基于 IRENA 的分析

图 13: 水电的分布情况 (按区域划分)



基于 IRENA 的分析

生物能源和转废为能

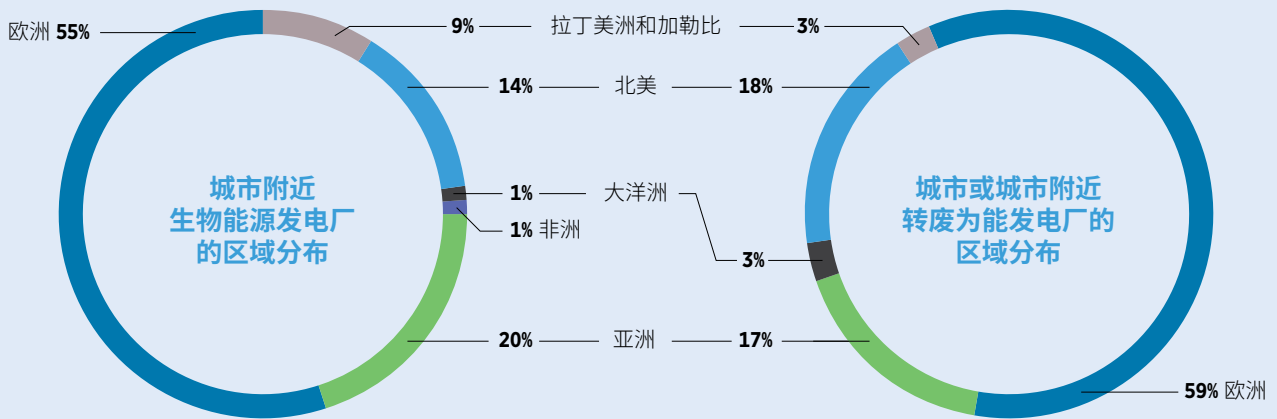
生物能源和转废为能可以为城市带来诸多益处。

只要妥善管理原料，就可以通过现代手段利用生物质残留物或能源作物以及转废为能可靠地供应能源，并为城市带来其他诸多益处。在全球范围内，城市或城市附近有超过 6,000 座生物质发电厂，约 3,000 座转废为能发电厂。⁹ 欧洲城市拥有的此类设施最多，两类发电厂各占 55% 和 59%，其次是亚洲和北美（图 14）。

将农业废弃物和城市垃圾与能源基础设施结合起来可以带来诸多好处。

⁹ 以距离市中心 50 千米为半径。

图 14： 生物能源和转废为能发电厂（按区域划分）



基于 IRENA 的分析

在北美，生物质发电厂以美国居多，而在亚洲，这类发电厂主要集中在日本、中国东部沿海和印度（图 15）。相比之下，因为所有城市都产生大量垃圾，所以垃圾燃烧发电厂似乎在所有地区都很普遍（图 16）。这些垃圾会随时间增多，给全球城市垃圾处理系统带来挑战。

因此，不论是否制定了可再生能源目标，许多城市都愿意建设这类发电厂。一吨垃圾大约可产生 500 kWh 电力（Porteous, 2005）。

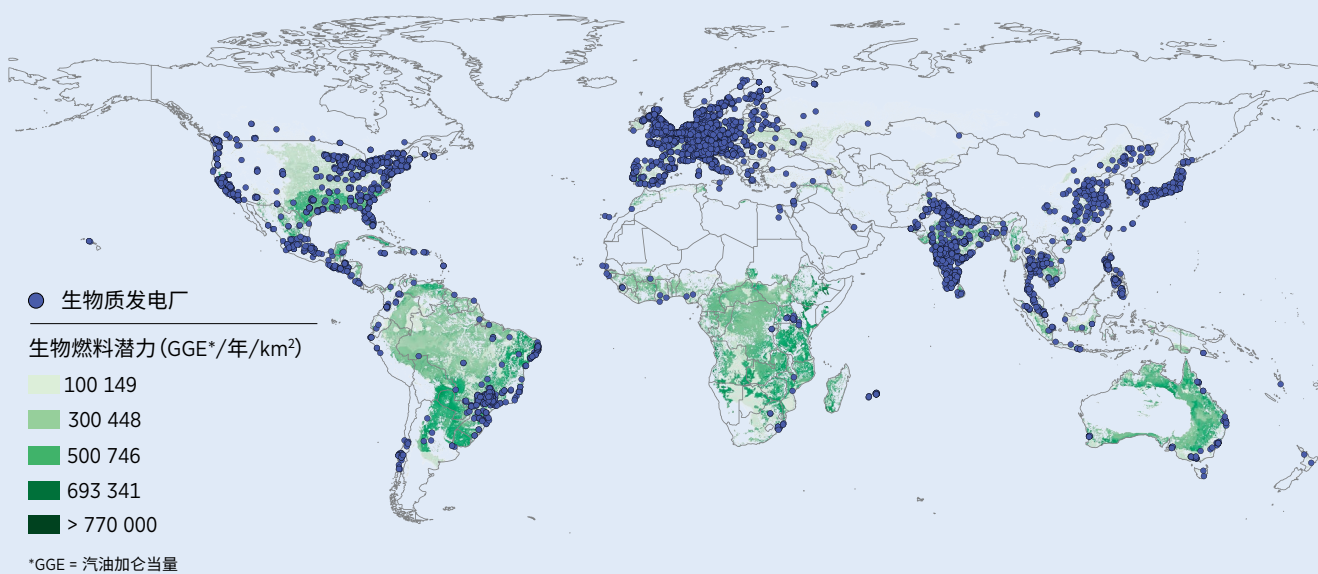
当前，70% 的城市固体废物流向了垃圾填埋场或无人管控的垃圾场，而金属、塑料和玻璃等无机材料则在不同程度上得以收集或回收。

转废为能可帮助城市避免因废物处理而造成水土污染及温室气体排放，同时还可产生能量（Mavropoulos 等, 2012）。（更多有关生物质技术与应用的信息，请参阅第 3 章。）

在发展中国家，特别是非洲发展中国家，以传统方式使用生物质能仍很普遍，加剧了环境和健康问题，例如森林砍伐和室内空气污染。尽管在非洲的能源结构中，生物质能占比很大，但非洲的生物质发电厂和转废为能发电厂都很少。

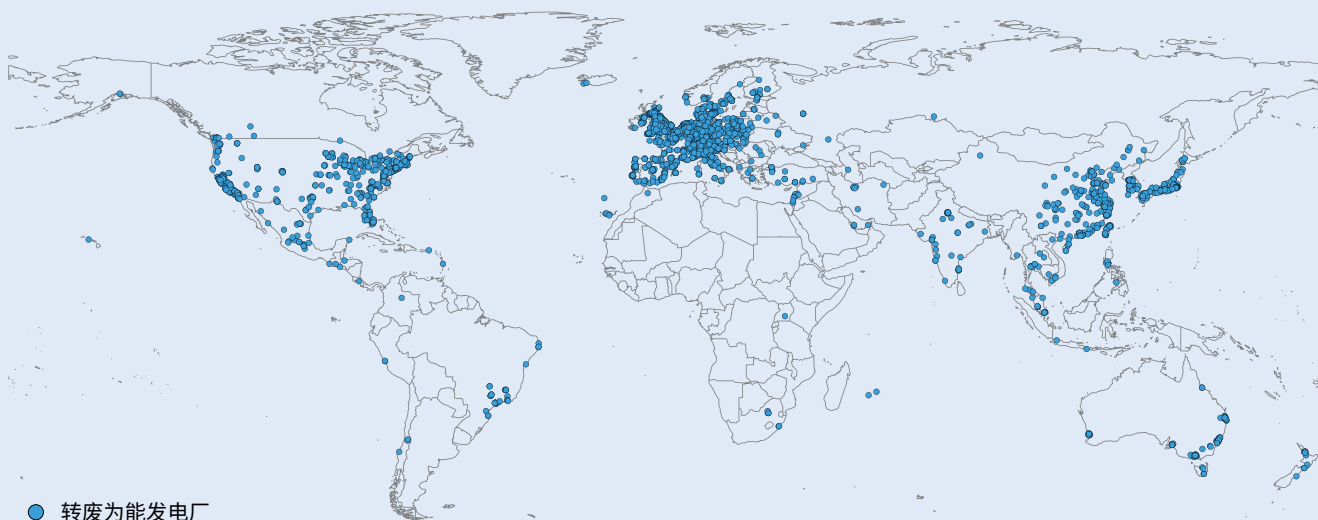
通过现代手段使用残留物并在城市附近种植专用能源作物可能是一个不错的解决方案。同样，非洲城市可以结合转废为能技术来建立并改善城市废物管理，这也是城市化进程的一部分（Edo 和 Johansson, 2018）。据估计，到 2025 年，非洲所有废物（包括垃圾填埋气）预计可产生 2,562 皮焦耳能量（Scarlat 等, 2015）。

图 15: 全球城市附近的生物质发电厂以及资源潜力高的城市



基于 IRENA 的分析

图 16: 全球城市附近的废物发电厂



基于 IRENA 的分析

免责声明: 这些地图上显示的边界和名称并不意味着 IRENA 对此作出任何官方背书或认可。

地热能

城市地表以下蕴藏着大量可直接利用的地热能资源有待开发。

地表热流可以作为衡量地热潜力的指标；但是，需要进一步勘探才能更准确地估算某地的地热潜力。在本报告分析中，我们下载了 Davies（2013）所做的资源评估中的热流数据。然后使用 Limberger 等人（2017）的方法，除测量热流之外，还用到了火山数据（全球火山计划，2020）。活火山的热流为 1.4 亿瓦/平方米（ W/m^2 ），休眠火山的热流为 8000 万 W/m^2 （Nagao 和 Uyeda，1995）。

除了自然的地表热流会影响地热潜力外，我们还会常观察到，建筑环境下的热能通常比农村地区的热能更高，这种现象就是亚表面城市热岛效应。这增加了地热潜力，但也使地热能估算更为复杂。

城市地下未开发的地热能有可能直接利用。

地热能潜力与城市制定可再生能源目标之间似乎不存在明显关联（表 4）。与其他大多数可再生能源不同的是，准确评估地热能潜力不仅复杂，而且成本高昂。现有的立法、监管和环境法规也可能阻碍地热能项目的发展。这些因素限制了地热在城市可再生能源目标中的作用。目前，只有五个城市在其目标中规定了使用地热。

表 4： 每个数据集中地热潜力高的城市的数目

百分位	地表热流 (MW/m^2)	研究的城市 (数据集)	有可再生能源目标 的城市数目	有 100% 目标 的城市数目
前 10 名	80.00	658	129	76
前 20 名	66.75	1 416	243	140
前 30 名	63.00	1 900	293	165

基于 IRENA 的分析

根据国际地热协会的数据库，在距离市中心 50 千米半径范围内，共有 69 座地热发电厂，超过全球装机容量的 60%¹⁰。地热发电厂大多位于亚洲 (39%) 和北美 (32%) (图 17)，这些地区分别占地热发电装机容量的 43% 和 28%。

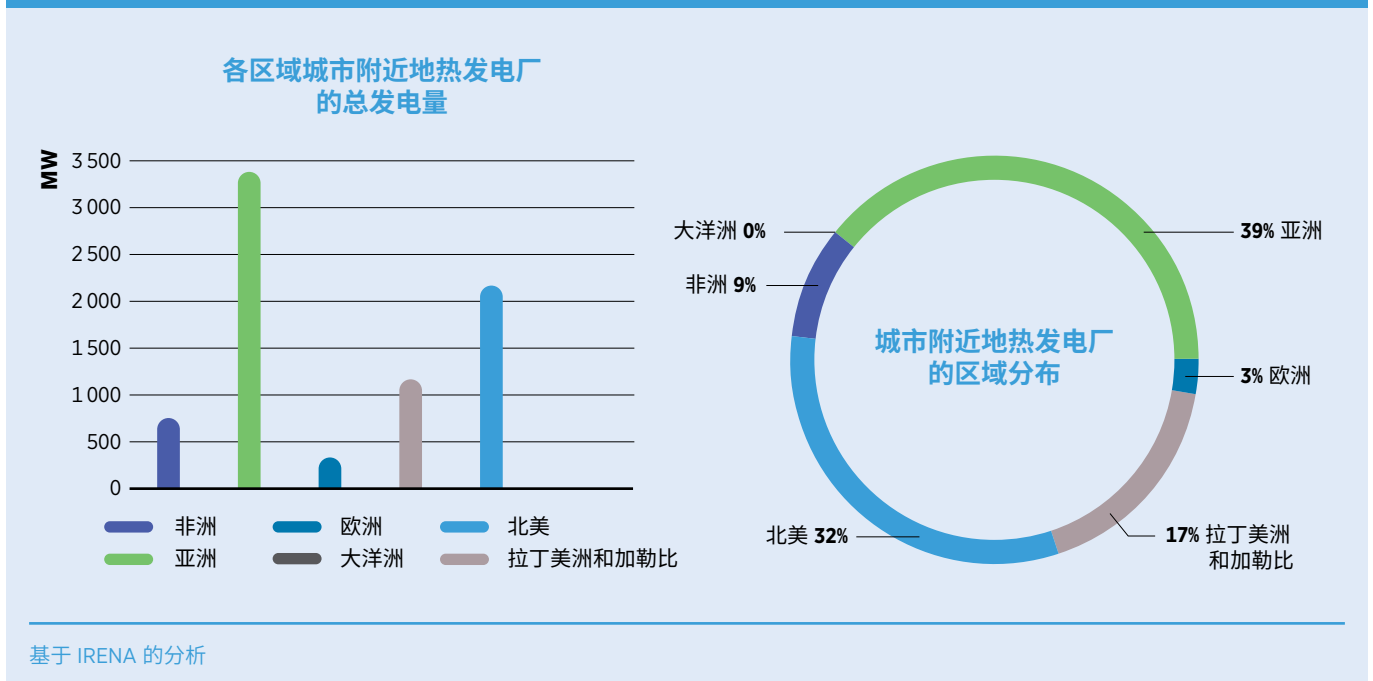
这表明，这两个地区的地热发电厂的平均产能大致相似，这主要是由于经济效益要求地热发电厂必须规模较大。

鉴于这些地热发电厂位于城市附近，其中大部分很可能是热电联产 (CHP)，通过级联应用 (通常与区域供热网络相关) 和经济表现来提高能效。

与地热发电相比，可直接利用的地热能是一种更容易获取的资源。据估计，这一技术的全球潜力是地热发电的 100 倍以上 (Hoogwijk 和 Graus, 2008)。地热的直接利用 (通常与热泵相结合) 可以利用低温地热能来满足供热和供冷需求；这约占全球地热能产量的一半 (Lund 和 Toth, 2020)。

10 请参阅地热发电数据库: www.geothermal-energy.org/explore/our-databases/geothermal-power-database。

图 17: 城市附近地热发电厂的分布 (按区域划分)



总结

总体而言，城市在其直接管辖范围内开发一种或多种可再生能源的潜力巨大。无论是否制定了可再生能源目标，城市都应在技术和经济上评估这些潜力，因为部署可再生能源不仅可提供实际的能源载体，还会带来许多其他益处。

对于那些对可再生能源雄心勃勃的城市而言，制定目标可以向市场发出明确信号，从而吸引更多投资，特别是在同时出台了法律框架和行政程序的情况下。仔细评估本地可再生能源会产生一些可开发项目，这将鼓励投资者和项目开发商投入更多的资源来部署城市可再生能源。

对于行动落后的城市，如果它们拥有丰富的可再生能源资源，并预计其能源需求将会增长，那么挖掘这些潜力可以实现技术跨越，带来巨大的长期收益。

城市、省/州和国家各级政府需要加强沟通，协调可再生能源目标，促进知识共享。在非洲和中亚等普遍未制定可再生能源目标的地区，各国政府和国际倡议将扮演关键角色，鼓励城市制定目标并提供实现目标的工具和信息。

最后，最大程度利用本地可再生能源绝不是禁止从其他地区购买可再生能源商品（例如可再生能源电力）。在大多数情况下，本地可获取的可再生能源无法全面满足城市的能源需求，因此有必要从外地额外引入能源。

面对这些挑战和机遇，必须在城市规划中明确制定可再生能源使用战略。要为城市能源系统转向低碳可持续、能适应气候变化的未来开辟一条清晰的道路，这至关重要。（更多有关城市能源规划的信息，请参阅第 4 章。）

3.

城市可再生能源技术



3. 城市可再生能源技术

城市整合可再生能源技术面临各种挑战，包括立法、政策、监管、融资、人力、美学、设计和城市规划等障碍。《扩大城市中的可再生能源：市政府的机会》（IRENA 与 ICLEI 和德国国际合作署 (GIZ) 合作出版）的一系列案例研究表明，包括可再生能源采购、法令和命令在内的一系列工具是应对这些挑战的有效政策措施（IRENA 等，2018）。

某种程度上而言，这些障碍也源于对利用本地可获取的可再生能源的机会和益处（例如增强能源安全性和创造本地就业机会）、对城市可再生能源应用缺乏了解，有时还由于公众对在城市或城市附近建设电站缺乏认可。本章旨在为技术提供商、能源系统规划人员和市政决策者提供这些方面的关键知识。

3.1 太阳能

有两类转换技术¹¹ 可用于收集太阳能产生能量：光伏 (PV) 发电和太阳能集热器产生热能。两者均可应用于各种规模，且可通过独立或联网配置运营。太阳能光伏发电仅可提供电力，而太阳热能则适用于城市地区的许多应用。本节介绍城市地区常用的现有技术解决方案，例如光伏系统、光伏建筑一体化 (BIPV)、各种太阳热能技术（包括集中式太阳热能系统）和太阳能光伏-光热 (PV-T)。

¹¹ 被动式太阳能也得到广泛使用，但未纳入本研究。

城市太阳能光伏

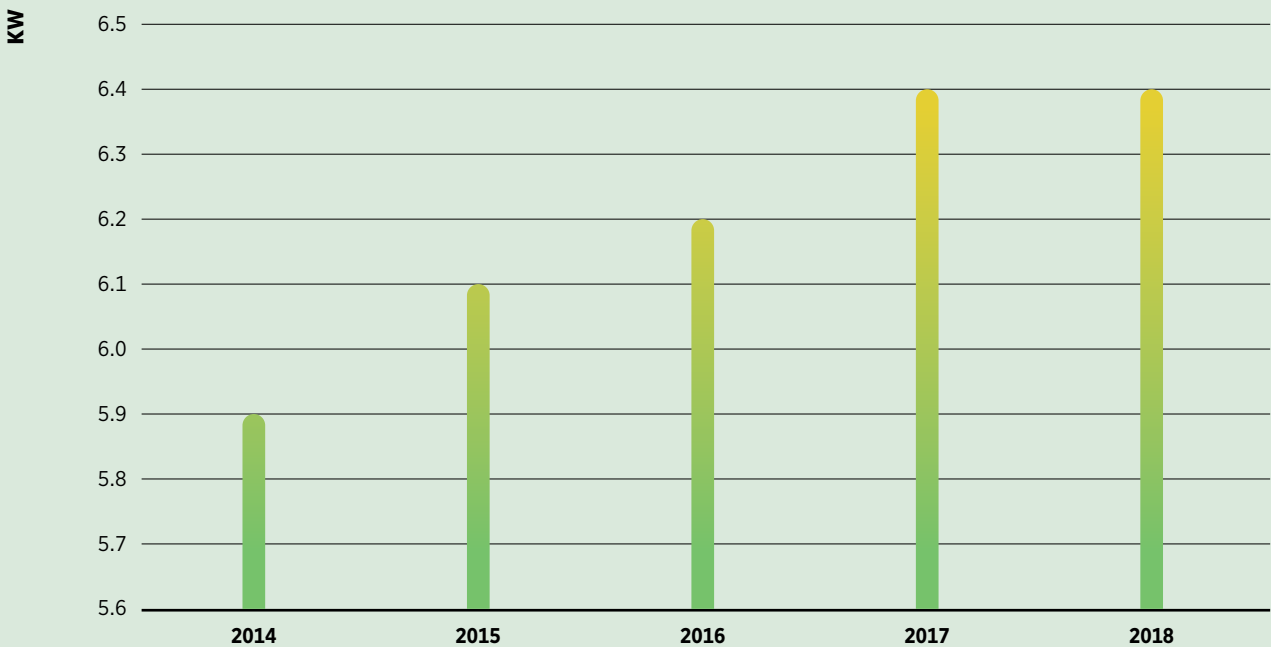
过去十年中，全球太阳能光伏装机容量迅速增加，从 2010 年的 40 GW 增长到 2019 年的 580 GW (IRENA, 2020c)。其中大多数是大型太阳能电站，但也有一些国家（例如德国）主要是在城市及其周边部署规模较小的分布式太阳能光伏系统。

城市中的太阳能系统通常安装或集成在建筑物屋顶和立面上。这些系统通常比郊区的地面光伏系统规模要小。

2018 年，住宅光伏系统的平均装机量约为 6.4 千瓦 (kW)，比 2014 年增长了 8%，这主要得益于成本下降 (图 18)。

住宅系统的主要技术优势是靠近负荷中心，避免了长距离输电造成的能量损失和过网费。此外，城市也越来越了解这些系统带来的许多社会环境效益，包括提高对极端天气事件和气候变化影响的适应能力。

图 18： 全球已安装的住宅太阳能光伏系统的规模中位数



来源：数据来源于 Barbose 和 Darghouth, 2019

虽然太阳能光伏系统能给城市带来许多益处，但若要进一步扩大城市地区的光伏应用规模，仍存在很多独特的挑战。

首先最大的挑战是土地限制。在大多数情况下，城市或由于农业或生态保护等竞争性用途而没有可用的土地来建设地面太阳能光伏电站，或土地成本高到离谱。

因此，将太阳能光伏系统集成到现有或已规划的城市建筑物或其他基础设施中仍将是首选做法。但是，为实现政治承诺，也有一些城市通过在与农村社区合作等方式，在其郊区安装地面太阳能光伏电站（通常由社区或城市所有）（能源城市，2018）。

其次，大多数城市担心集成波动性可再生能源（例如太阳能光伏）对电网运营的影响，因为这可能给电网运营商的城市电力系统管理造成挑战，并可能影响电网稳定性。对于特定配电系统，如果太阳能光伏发电比例增加到一定水平，则可使用 PowerFactory¹² 和 FlexTool¹³ 工具来评估其对电网稳定性和所需电网灵活性的影响。

12 PowerFactory 旨在分析电网连接和电网影响。

13 IRENA FlexTool 旨在分析电力系统的弹性要求。其优点包括计算时间短，可轻松配置工具来分析太阳能光伏等可变可再生能源集成等级各异的多种替代方案。等计算机仿真

这些结果可以让我们更好地了解不同光伏安装方案对电网的影响，以及通过增强电网灵活性来解决困难的可用措施。此外，世界各地的试点项目表明，结合了各种创新的解决方案可以帮助分布式资源集成到电网中。例如，只要拥有必要的关键技术和支持框架，聚光太阳能光伏电站及电池，就可以通过提供服务来帮助系统运营商平衡系统。

第三，地方政策制定者和决策者需要加深了解太阳能光伏系统对当地电力供应商和电网的经济影响。必须创建创新商业模式，协调现有参与者和新兴参与者之间的利益。这些新兴参与者包括既消费电力又生产电力（自用或卖给电网）的产消者；将电力系统中的多种新兴参与者进行分组，让他们像单个参与者一样参与市场活动的整合商；以及旨在将单个分布式能源生产设施的投资经济效益最大化的点对点交易商（IRENA，2019a；IRENA，2019c）。

屋顶太阳能光伏是城市中最受欢迎的可再生能源技术方案，但存在固有的技术局限性和挑战。例如人口密集的城市环境中人均屋顶产能空间有限、屋顶结构的不利条件、意想不到的遮阳损失和安装质量不合格等。

尽管如此，屋顶光伏系统仍然是城市中前景良好的解决方案，并且越来越多的工具已经开发出来，可帮助地方政府和其他利益相关者评估屋顶发电政策及融资方案。例如，IRENA 的 SolarCity Simulator 的应用范围很广，从家庭级别的单个屋顶分析到市政当局和其他大型实体的整合分析均适用（IRENA，2019f）。

除屋顶光伏外，新一代城市太阳能技术和产品正在兴起，旨在更充分地利用太阳能潜力，尤其是在新建和规划建筑物上。它们的目的是将光伏从发电设备转变为既可发电也可作为建筑物的建筑材料。光伏建筑一体化便是其中一种形式。

光伏建筑一体化 (BIPV) 涉及两类主要产品：立面集成（例如光伏墙体/立面）和屋顶集成（例如光伏顶板和瓦片）。透明和半透明立面集成式 BIPV 是建筑物的理想解决方案。为确保这些解决方案获得成功，必须正确设计透光率和窗墙比，以最大程度提高发电量（北卡罗莱纳州立大学，2018）。

对于垂直安装的立面集成式 BIPV，其峰值发电量与大多数屋顶安装系统均不相同。因此，平滑了建筑物中整个光伏系统的输出曲线。

屋顶的太阳能光伏顶板和瓦片既可发电，又可作为建筑结构，特别适用于无法使用常规光伏系统的建筑物。此类产品不仅美观，而且易于安装，通常也不需要太多维护；此外，更换单块瓦片比更换整个面板成本更低。

其他正在开发的 BIPV 技术包括自适应太阳能立面和跟踪器技术。这些技术全天跟踪太阳路径，并相应调整其角度，从而提高效率。与固定式 BIPV 技术相比，它们相同面积的发电量更高（Nagy 等，2016）。

但是，BIPV 仍处于技术开发的初始阶段，还有各种市场和技术障碍有待克服。从 2004 年到 2015 年，BIPV 的成本下降了 60%，但仍然高于传统光伏系统（Maturi 和 Admi，2018；EASME，2019）。评估 BIPV 时遇到的主要问题包括整体系统转换效率、设计灵活性以及作为发电技术的耐久性和寿命。

其他问题涉及建筑材料、温度系数和热性能、时间稳定性和退化情况、安全性和成本效益，以及缺乏统一的性能评估与验证技术标准和认证程序（麻省理工学院，2015；瑞士南方应用科技大学等，2019）。

太阳热能

一般情况下，太阳热能系统可用于供热和供电。太阳的热能通常通过聚光太阳能发电 (CSP) 技术转换为电能，该技术通常要大规模运营方能经济可行，因此需要大片土地。但是，大多数 CSP 设施安装在太阳直接辐射良好的地方，远离城市。它们在城市中的应用（及重要性）非常有限，除了用于市内的区域供热系统或工业设施的集中式太阳热能技术。

相反，主要用于供热的非集中式太阳热能系统则可小规模使用，只需较小的空间，因而通常安装在城市地区。这项技术包括太阳热能集热器，可吸收太阳辐射并将其转化为热，效率最高可达 80%，具体取决于运行温度 (Tripanagnostopoulos, 2012)。

城市中的单个或独立系统通常使用三类太阳能集热器：平板集热器，真空管集热器（产生温度低于 120 °C）和非聚光集热器（120 °C 以上且可高达 200 °C）(Weiss 和 Rommel, 2008)。每种技术都有其优缺点，需根据所需温度和其他标准进行选择。长期以来，太阳热能系统一直用于为建筑物提供水加热和空间采暖，但也可以为工业过程供热。在城市中，这些系统可以放置在屋顶、立面、阳台和任何建筑外部区域。

集热器还可以用作建筑物围护结构的隔热材料，从而减少供热和供冷需求 (Maurer 等, 2017; Li 等, 2015; Mohajeri 等, 2016; Huide 等, 2017)。

太阳能供热系统：在低纬度国家，单个太阳能热水系统即可能满足 100% 的住宅需求 (Mathiesen 和 Hansen, 2017)。而高纬度地区的辐射量随季节变化较大，如果没有季节性储能系统，单个系统仅能满足 20%-60% 的家庭用水和空间采暖的供热需求 (国际能源署 Task 55, 2019)。

对于供热需求持续较高的商业和服务性建筑物，例如旅馆、医院和购物中心，这类系统通常用于节约成本和/或彰显社会责任。在加利福尼亚，太阳热能可提供的水加热平均比例为 70% 至 80%，季节变化范围为 25% 至 90% (Hopkins 等, 2018)。

越来越多的城市和国家在建筑法规中强制规定所有新建建筑必须使用太阳能热水器。中国的太阳能热水器装机容量达 337.6 吉瓦热 (GW_{th})，占世界总装机容量的 70%，目前仍是该技术的最大市场，第二大市场是欧洲，装机容量是中国的六分之一 (Weiss 和 Spörk-Dür, 2019)。

有些国家天然气价格便宜，且以天然气为主要热源，缺乏激励政策或提振方案来支持其社会环境效益，因此，太阳热能系统的竞争力不强 (Rosas-Flores 等, 2016; Wang 等, 2015; Sathishkumar 和 Balusamy, 2014)。

太阳能区域供热：在这一应用中，大型太阳能集热器通过区域热能网络传输热量。通过将供热网络转变为低温（60-70 °C 以下）区域供热系统（即第四代），可以实现太阳能区域供热。太阳能系统可以安装在地面或建筑物屋顶上，为建筑物、社区、地区或城市供热。太阳能区域供热占区域供热系统总供热量 10% 至 50%（Pauschinger, 2016）。

可将该系统与储能设施（例如季节性储热库）结合配置，以在需要时供热。由于这些系统的规模较大，它们的特定投资成本通常比较小的应用设施更低。

欧洲在这方面处于领先地位，到 2019 年已有数百座太阳能区域供热厂，总容量超过 1.1 GW_{th}。丹麦、奥地利、德国和瑞典属于第一梯队，其次是其他欧洲国家，这得益于欧盟“地平线 2020”计划的支持（SDH, 2019）。太阳能区域供热的主要益处是，在太阳能资源较少的地区也可以安装，至少 25 年维持成本稳定，并可使用业已成熟的可用技术实现零排放。

太阳热能供冷：太阳能热能的应用已逐渐扩展到供冷领域，与吸收式供冷机结合使用。由于需要的温度较高，因此通常采用吸收直接辐射的真空管或聚光太阳能集热器。在最理想的条件下，太阳能供冷系统可以将供冷所需的一次能源减少 50%（Bellos 等, 2016）。为了提高系统效率和利用率，混合系统似乎更有前景。太阳热能在夏季可用于供冷，在冬季可用于空间采暖或热水供应（Buonomano 等, 2016）。

太阳能供冷的主要优势除环保外，还可能降低酷暑期间电网的高峰需求，从而减少停电和电网升级成本（Lim, 2017）。在澳大利亚，由于酷暑期间高峰需求天数增加，用电量几乎翻了一番，致使电网需要升级才能满足高峰负荷。然而，据澳大利亚联邦科学与工业研究组织（CSIRO）估计，每增加一台空调机组，电网为此升级的边际成本是空调机组成本的三倍（Lewis, 2016）。因此，出于系统成本考虑，未来应该让太阳热能供冷发挥更大的作用。

1990年，全球建筑物供冷需求为600太瓦时(TWh)，到2016年增长了两倍，达到2,000 TWh，预计到2050年至少还将增长两倍¹⁴。随着经济社会的发展，未来三十年中，住宅领域的制冷需求预计将占制冷需求增长总量的70%，且二十年后将超过住宅供热需求（国际能源署，2018；Dreyfus等，2020）。随着越来越多的城市加大使用可再生能源，预计对可再生能源制冷解决方案的需求将不断提高。

太阳能工业过程供热：太阳能系统可以为许多工业过程供热，例如化学制品、纺织工业、食品和农业等。现有的工业过程供热系统主要使用化石燃料，例如石油、天然气和煤炭（IRENA，2015d）。太阳能系统可以满足工厂的部分供热需求，具体取决于太阳能资源的可用情况和系统规模。该系统通常需要储存热能或备用燃料，以防没有太阳辐射时供热中断。可以使用下列软件模拟最佳系统设计：TRNSYS、T*SOL、POLYSUN和SOLTERM¹⁵。

例如摩洛哥安装的COPAG系统，使用61千瓦热的装机热能供热，在80-90℃条件下为乳制品进行巴氏灭菌处理¹⁶。

太阳能光伏-光热(PV-T)

光伏-光热技术是一种集成设计与运行特性的混合系统，既能供电，又能供热。其目的是为了提高整体太阳辐射能量转换效率，解决城市可用土地面积有限的难题。夏季高温期间，接触液可以冷却光伏板，提高发电效率，而吸收的热量则可用于直接供热。

新型PV-T混合技术包括使用空气加热器预热空气，并使用纳米颗粒和水作为基液（AL-WAELI等，2017）。此外，Ecomesh第二代混合太阳能板是一种屋顶太阳能混合系统，它特别配备了一个透明的绝缘面，以避免热量损失（图19）。该项目旨在满足多栋公寓建筑的热热水需求（DEL AMO等，2017）。

¹⁴ 请参阅 <https://climate.nasa.gov/vital-signs/global-temperature>。

¹⁵ 为进一步了解这些软件之间的差异，选出更合适的软件，请参阅 <https://task49.iea-shc.org/article?NewsID=246>。

¹⁶ 了解更多示例和所有工业供热太阳能系统数据库，请参阅 <http://ship-plants.info>。

太阳能 PV-T 混合系统的另一项新进展是与热回收系统一起组装的发电模块。热回收系统是底层，可生产热水，同时太阳能光伏将继续供电（Nastasi 和 Di Matteo, 2016）。

混合系统研究仍处于起步阶段，某些方面的知识仍然匮乏。投资成本高昂、知识匮乏和系统实施仍是潜在市场增长的主要障碍（Ramos 等, 2017）。

图 19： 安装在屋顶的太阳能光伏光热混合系统



来源：del Amo 等人, 2017

3.2 生物能源和转废为能

从环保和物流角度考虑，城市使用生物能源的首选原料是本地可获取的原料。用于能源生产的本地生物质可以来自城市废物流（例如城市固体废物）、污水处理厂和城市树木/森林¹⁷，以及城市周边的农林区（例如城市附近畜牧场的残渣、木柴和废物）。所有这些都可以大致归类为转废为能的生物质原料（与种植专门的能源作物截然相反）。转废为能对城市尤为重要，因为这种方法非常实用，不仅鼓励垃圾回收，还可减少废物量，这方面的环境效益通常比能源回收的环境效益还要大。对城市而言，城市生物能源可提供三重附加值：

- 与太阳能光伏或风能等可变可再生能源相比，生物能源本身即具备储能性质，因此其能量供应相对稳定可靠。
- 转废为能是一个不错城市废物管理解决方案，同时还可城市提供能源。它是实现循环经济的一种方式，特别是对欧盟而言 — 欧盟就减少垃圾填埋制定了 2030 目标¹⁸（Ecoprog，2018）。通过燃烧，城市固体废物量通常可以减少 85-90%，具体取决于原料成分（Chaliki 等，2016；Rogoff 和 Screve，2019）。

- 上述各项组合又可以减少温室气体和其他环境污染物的排放。

但是，生物能源的应用有其局限性。鉴于废物管理系统的不确定性以及农林废弃物的收集半径有限，确保原料的可持续供应绝非易事。选址也可能是个难题，因为大规模的转废为能设施的可用土地有限，公众也可能因其对空气质量和健康的潜在影响而难以接受。

解决这些问题将需要能源部门和废物管理部门合作，确保采取一致行动。使用致密化技术，可在现场将原始生物质原料转化为木质颗粒和团块，为提高将原料运输到城市消费者手中的经济性和原料（用于可控和清洁燃烧）质量提供了有效途径（IRENA，2018）。为推动公众认可转废为能发电厂，必须提高认识，开展教育，并制定严格的环境法规。这些方面对城市成功应用生物能源至关重要。但这些都超出了当前讨论的范围，必须单独进行分析。

城市转废为能的关键转换技术包括直接燃烧/焚化、厌氧消化和气化。使用这些手段可将原料转化为能源，例如转化为直接作为热源的热能，或电和沼气等能源载体。总体而言，这些转换技术取得了不错的进展，在最近几十年中已经发展得很成熟了。

17 城市树木/森林也可以供应部分生物质，例如因暴风雨、虫害和疾病感染而坏死或损坏的树木或树枝

18 “循环经济一揽子计划”指出，城市固体废物 (MSW) 可生物降解部分的垃圾填埋量应减少 65%，MSW 的整体填埋量应减少 90%。
请参阅 <https://ec.europa.eu/environment/circular-economy>。

考虑到各种应用的优缺点以及成本情况，仍然需要对不同成分的原料进行技术和系统配置调整，而且通常还需要考虑使用环境（WBA，2016；Rogoff 和 Screve，2019）。如果锅炉位于城内，则可能给当地造成粉尘排放问题，正在开发技术进一步减少此类排放。将来，城市中只会在区域供热网的大型锅炉中燃烧木柴。

直接燃烧/焚化

直接燃烧技术，也称焚化，涉及在有氧环境中燃烧废物中的生物质和可燃烧的无机物，以此生产蒸汽。大型焚烧炉通常与 CHP 或热电联产装置结合使用，以提高系统能效。在某些情况下，例如瑞典的 Dåva 发电厂，联产装置也可以通过吸收式制冷机提供制冷所需能量（文本框 3）。

文本框 3： 瑞典于默奥和哥德堡的地区 CHP 和供冷系统

瑞典于 2002-2005 年禁止了可燃和有机废物填埋，而选择通过回收和焚烧来改变废物的用途（Miliotis，2013）。在不懈的努力下，瑞典成为了欧洲人均转废为能水平最高的国家，2017 年将 760 万吨废物转化成了能源（Crouch，2019）。

在于默奥，市政公用事业 Umeå Energi 公司分别于 2000 年及 2010 年运营了两家转废为能 CHP 工厂。Dåva 1 号和 2 号热电联产电厂位于市中心东北 9 公里处，通过当地能源网络向城市居民提供电力、热能和冷能。该设施使用生活和工业废物、农林废料以及其他类型的废弃生物质作为主要原料。

对废物的利用，加上高系统能源效率和极其严格的碳排放控制，使得 Dåva 一跃成为世界领先的节能环保电厂。

Dåva 电厂总装机发电容量达 175 MW，每天消耗约 1,000 吨原料，每年为近 5 万户家庭供热，为 2 万多户家庭供电。该电厂也帮助市政当局解决了日益严峻的垃圾难题，还有利于回收炉底渣中的重金属及其他材料。该电厂从根本上推动了 Umeå 的循环经济。

来源：Smart City Sweden，2020a；Umeå Energi，2019

瑞典哥德堡早在 1974 年就采用了转废为能技术。在过去的几十年内，这个城市已经能够将每年市政、工业和商业领域所产生的 345,000 吨城市废物转化成热能和电能。哥德堡因此每年减少了 200,000 多吨 CO₂ 的排放，占城市能源相关的 CO₂ 排放的四分之一。

2017 年，市议会的一项决议预计将转废为能技术应用扩展到区域集中供冷领域。这就需要大力扩展网络，采用吸收式制冷机，对在夏季产能未得到充分利用的现有废物发电厂以及免费的制冷资源（比如当地河流）加以利用。

该系统计划到 2035 年开始为哥德堡的办公楼、医院和工业供冷。

一旦建成，该系统不仅将大大降低该市制冷行业的碳排放，还将降低可持续和可再生能源终端用户的水电费。它也将减少酷暑时节传统空调机组的用电负荷，从而缓解高峰用电需求对配电网造成的压力。最后要提到的是，市政公用事业 Göteborg Energi 公司将从当地的可再生能源中产生洁净的能源，同时也将为当地创造就业机会，通过实现无化石燃料的目标，为社会和环境带来效益。

来源：Smart City Sweden, 2020b; C40 Cities, 2011

在发达国家，使用木质颗粒和团块的小型独立式生物质锅炉和现代柴火炉最常用于住宅供热。相反，在发展中国家，特别是在非洲（包括城市），传统的柴火炉更常用于取暖和烹饪。小型应用¹⁹，特别是没有烟气净化装置的火炉，与大量排放颗粒物和其他主要排放成分有关（国际能源署，2008）。例如，传统柴火炉产生一兆焦耳能量排放的颗粒物可能是大型流化床锅炉的 1,000 倍（van Loo 和 Koppejan, 2002）。因此，在没有控排措施的城市地区，一般不建议使用小型生物质燃烧应用。

中大型燃烧设施通常使用燃烧效率更高、操作程序合理并配备有效的烟气净化措施（例如静电除尘器、袋式除尘器或酸气洗涤塔）的先进燃烧技术。即便如此，仍然需要定期监测排放水平，注意原料成分变化等因素的影响（Nussbaumer, 2010; Mikus 等, 2016）。作为烟气净化的副产品，通过烟囱排放的飞灰中含有细颗粒物、有毒重金属和持久性有机污染物（如二噁英），这个问题仍有待解决。仅在欧洲，转废为能发电厂每年飞灰排放量超过 200 万吨，大致相当于欧洲每年废物总产量的 1%。这方面已取得了一些进展：例如，NORSEP 正在测试将有毒飞灰转化为可用于其他行业的无毒残渣和原材料的工艺（EEA, 2016; Crouch, 2019）。

19 小型应用中的燃烧不充分问题是颗粒物排放增加的主要原因。

该工艺减少了飞灰，但会产生更多炉渣。通常，混合的城市固体废物有 18%-25% 最终会成为炉渣，其中有一部分（包括铁和非铁金属）可以通过技术回收，具体比例取决于废物成分和特定国家的法律（国际固体废物协会，2015）。残留的炉渣通常可用于生产建筑材料，但必须遵守相关法规且经济可行。

在各种直接燃烧/焚化技术中，城市转废为能设施最常使用的是团块燃烧、模块化焚烧炉和垃圾衍生燃料系统。它们的关键技术特征如下。

自 1876 年英国诺丁汉建设了世界上第一座焚烧设施以来，**团块燃烧**应用已广泛普及，特别是在欧洲、美国和日本（德国环境署，2008）。全世界有成千上万个团块燃烧系统，废物日处理量从不到 100 吨到超过几千吨不等（Mikus 等，2016）。

该技术通常用于焚烧未处理的固体废物，排放物因废物成分而异。尽可能充分燃烧需要过量空气，以确保在燃烧炉中充分混合，形成足够的湍流。为提高燃烧效率，焚烧炉的设计已有所改进。但是，系统的整体效率不仅取决于热转换性能（水冷式焚烧炉高达 60%），还取决于发电效率（通常低得多）。系统的平均净效率为 18% 至 27%，高效的系统可以达到 32%（Mikus 等，2016；国际固体废物协会，2013；美国国家环境保护局，2018）。

模块化焚烧过程（也称为缺氧焚烧）也是在两段式焚烧室内燃烧未处理的废物，但大多在缺氧条件下进行。但也有一些配置可以在过量氧气条件下运行。不同于团块燃烧，模块化焚烧炉往往较小，日处理量为 10 至 200 吨。废物短缺时，可以将它们移至另一地点，废物增加时也可以将其扩容。由于为预制组装，安装时间较短，因此模块化焚烧炉还具有成本优势，尽管其寿命仅为团块燃烧系统的三分之一至二分之一（Mikus 等，2016）。

而**垃圾衍生燃料**燃烧系统是使用悬浮式或半悬浮式锅炉和流化床锅炉等，以专用²⁰燃烧配置燃烧处理后的可燃废物。虽然废物预处理有助于提高热效率，但也带来了技术和物流方面的挑战，这主要与废物流中金属和玻璃的去除程度有关。预处理要求因垃圾衍生燃料的应用而异，例如，是用作热电联产的燃料，还是为工业过程供热（Giugliano 和 Ranzi，2016；Mikus 等，2016）。

总体而言，废物预处理似乎是改善原料/燃料热性质的好方法，但也会带来许多问题，很多情况下都难以经济有效地解决这些问题。

²⁰ 在大多数情况下，在传统燃烧室中与其他燃料（例如煤）一起燃烧会降低性能，并造成机械问题，例如产生炉渣或损坏炉壁。

厌氧消化产生城市沼气

厌氧消化是另一种成熟的转废为能技术，在城市运用的较普遍。在该工艺中，可生物降解的废物在厌氧条件下，通过生物消化器中的一系列细菌消化过程转化为能量。其主要能源产品是沼气，这是一种气态能源载体，通常含 55%-75% 的甲烷，具体取决于原料成分和生物消化器的设计。沼气可用于发电，或用作加热或汽车的燃料，或去除杂质²¹、品质达到天然气等级后注入天然气管道（Mikus 等，2016）。

在城市中，厌氧消化技术已普遍应用于市政污水处理厂、市政固体废物处理厂以及食品或畜牧业附属的废物处理设施。沼气是废物处理系统处理污水污泥和可分解的城市固体废物时的副产品。也可以从妥善管理的垃圾填埋场收集沼气，但通常用于发电而非其他用途，这主要是因为垃圾填埋场位置偏远。

在食品加工、畜牧、屠宰和制药等行业，厌氧消化系统是确保设施排放的废物符合环保法规的关键部分。

21 杂质主要由 CO₂ 和少量的水蒸气、氧气、氮气和硫化氢组成。

生成沼气这种副产品，可以提高这些行业中此类设施的经济效益（Al Seadi 等，2008；Bachmann，2015）。利用这些设施产生的沼气，不仅可以通过转废为能来提高资源管理的系统效率，还可以将甲烷转化为 CO₂²²，从而减缓气候变化。

许多欧洲国家（包括奥地利、德国和荷兰）在该领域处于领先地位。例如，在荷兰梅珀尔，一家热电联产厂（为 3,400 户家庭的区域供热网络服务）使用废水处理设施产生的沼气作为燃料（van Leeuwen 等，2015）。

市政污水处理厂、市政固体废物处理厂和食品加工业的大型城市沼气生产主导着全球市场。全世界共有超过 20,000 个沼气设施，每年新增约 1,000 个项目。另一方面，通常专为单个家庭设计的小型生物消化器正日益成为处理城市有机废物的新兴技术。例如，已有 90 多个国家/地区部署了近 1,000 个家庭规模的 HomeBiogas 生物消化系统，该系统最多可处理 12 升的厨余垃圾（Lemonde，2020）。

22 甲烷的温室气体排放系数是 CO₂ 的 25 倍。

3.3 城市风能

尽管风能在过去十年中取得了长足发展，但几乎没有渗透到建筑环境中。城市风能应用的障碍包括主流风力涡轮机的尺寸较大，在风速较低、湍流较弱时无法捕获风能；对城市风的空气动力学缺乏了解；以及视觉和噪音干扰等。

尽管也有一些城市风力发电的示例，但其性能仍有待改善，而且没有大规模实施的例子。风力涡轮机在城市环境中的应用目前主要还在研发 (R&D) 阶段。缺乏实验数据是城市风力发电机发展的一大阻碍。

但是，随着新风力涡轮机设计的实施及其性能评估，可能会推动其朝商业可行的解决方案发展 (Dilimulati 等, 2018)。风力涡轮机优化所需的研究采用了风力的计算流体动力学 (CFD) 模拟。使用该技术，可以较好地估计建筑物周围的风力状况。随后便可计算出风能潜力，并优化轮毂高度和成本 (Yang 等, 2016)。但是，由于城市地区的情况可能非常复杂，因此，这些模拟非常耗时，且需要性能强大的计算机。对这些模型进行简化的研究正在如火如荼地展开着。此外，许多 CFD 研究仅关注一栋建筑或简化的城市环境，不确定性可能高达 45%。Toja-Silva 等人 (2018) 综述的报告中，只有 14% 处理了真实的城市环境 (Simoes 和 Estanqueiro, 2016; Toja-Silva 等, 2018)。

城市中的风力涡轮机应用主要有三种方案：独立式、在现有建筑物上改装，以及集成到建筑物中。后面两种又归类为建筑风力涡轮机一体化 (Stathopoulos 等, 2018)。风力涡轮机本身也可以分为两大类：水平轴或垂直轴。最近几十年中，水平轴风力涡轮机占据了主导地位，垂直轴风力涡轮机仅在过去五至八年间才取得进展，但它们的市场份额仍然相对较小。

垂直轴风力涡轮机的平均额定容量约为 7 kW，而水平轴风力涡轮机的平均额定容量则小得多 (Pitteloud 和 Gsanger, 2017; Stathopoulos 等, 2018)。最新研究表明，垂直轴风力涡轮机在城市应用中很有前景，因为它们可以利用城市的湍流和各个方向的风来发电 (Dilimulati 等, 2018)。

2015 年，全世界（不仅限于城市应用）小型风力涡轮机的总装机容量约为 948 MW。中国、美国和英国在风电发电量和装机容量市场占据领导地位 (Pitteloud 和 Gsanger, 2017)。但是，城市应用受到限制，部分原因是社会认可问题。尽管如此，在城市安装风力涡轮机具有诸多益处，例如，能够在与用电地点相同的地方发电（不会造成输电或配电损失），减少对电网的依赖，减少温室气体，支持可持续发展。近几十年来取得了一些小成绩，表明城市风电正朝着积极的方向发展 (Kumar 等, 2018)。

2015年，Grieser等人发现，当今的小型风力涡轮机可能只有在特定理想的情况下才能盈利。其经济可行性取决于许多因素，特别是平均风速、轮毂高度和建筑物密度，因为这些是影响风力涡轮机输出功率的主要因素。对私人家庭而言，只有在平均风速达4-4.5米/秒的情况下，投资小型风力涡轮机才能获利。而且，建筑物密度也会影响风力涡轮机的盈利能力。此外，Grieser等人研究发现，添加电池系统可以增加小型风力涡轮机投资的净现值。上网电价补贴也提高了私人家庭投资小型风力涡轮机的吸引力（Grieser等，2015）。

水平轴风力涡轮机在城市中的效率比在空旷地区要低得多。风力涡轮机效率随风的湍流增强而迅速降低。对于传统风力涡轮机，可以使用扩散器或直立边缘来优化产量（Stathopoulos等，2018）。城市应用还面临制造噪音、视觉干扰和公共安全等方面的挑战（Kumar等，2018）。

水平轴风力涡轮机利用的是风的升力原理。由于涉及许多不同组件，包括塔架、转子、偏转制动器、叶片、轮毂、变速箱等，风力涡轮机设计可能非常复杂。塔架高度也是风力涡轮机设计的一个重要考量因素。风力涡轮机越高，效率越高，输出功率就越高。但是，噪音也随风力增加而增加。水平轴风力涡轮机的主要优点是效率高，容量高，且可轻松扩大规模以提高发电量。

其缺点除上述问题外，还包括可能击中野生生物、雷达干扰、维护和用地等（Óskarsdóttir，2014）。

在严格水平的气流和表面粗糙度尽可能小的情况下，水平轴风力涡轮机是现有风力涡轮机技术中运行效果最好的。在单向风的情况下，它们的效率可以达到很高，在空旷地区大规模采集风能时效率最高（Dilimulati等，2018；Óskarsdóttir，2014）。

垂直轴风力涡轮机是城市应用中很有前景的一项技术，部分原因是它们与风向无关，而且城市地区的风非常紊乱且方向不定。垂直轴风力涡轮机不需要偏转器，并且设计简单，维护成本较低，易于生产。有几类垂直轴风力涡轮机可以使用直叶片，大大降低了制造成本。垂直轴风力涡轮机便于模块化使用，既可作为独立装置，也可集成到电网中（Saeidi等，2013）。

尽管技术或经济上存在一些困难，但垂直轴风力涡轮机在屋顶上的效率比在空旷地区更高。而且垂直轴风力涡轮机产生的噪音更小，设计也更具吸引力。其主要缺点是，垂直轴风力涡轮机在大风条件下会停止运行，启动扭矩差，自启动性能差，以及动态不稳定性问题。此外，垂直轴风力涡轮机设计的是在低处运行，因此仅限于风速较低的条件（Óskarsdóttir，2014）。目前，垂直轴风力涡轮机在偏远的离网应用中最常见（Óskarsdóttir，2014）。

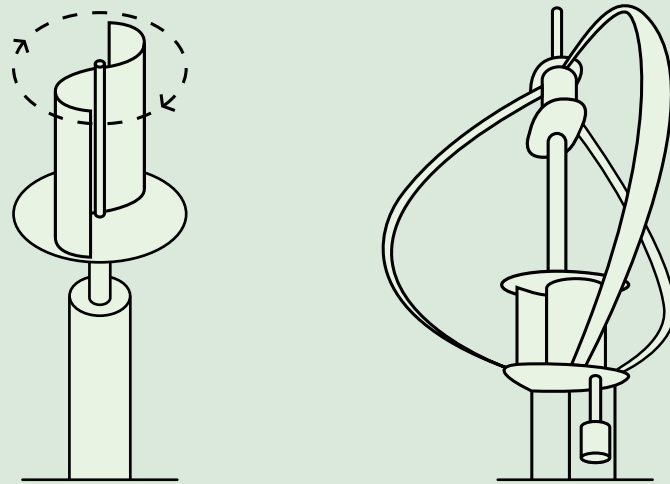
最著名的垂直轴技术是 Savonius 风力涡轮机和 Darrieus 风力涡轮机（图 20）。垂直轴风力涡轮机利用的是风的阻力原理，而非升力原理。Savonius 风力涡轮机似乎很适用于城市应用，因为它具有简单的微型涡轮机设计，且启动风速相对较低。Darrieus 风力涡轮机噪音低、视觉干扰小，非常适用于屋顶安装（Dilimulati 等，2018；Óskarsdóttir，2014）。

乍一看，根据上述特征，垂直轴风力涡轮机比水平轴风力涡轮机更适用于城市应用。但是，即便在城市中，也是水平轴风力涡轮机更加高效，因而使用更加普遍。

而且，平均而言，水平轴风力涡轮机的切入风速比垂直轴风力涡轮机要低，这在城市环境中更有利，而且启动扭矩也较低（Stathopoulos 等，2018；Tummala 等，2016；Toja-Silva 等，2013）。

可以使用涡轮机控制器来克服垂直轴风力涡轮机的操作困难。充分了解城市的风力状况后，可以设计专门的控制器来应对风速和扭矩的快速变化（Dilimulati 等，2018）。随着垂直轴风力涡轮机的发展和技术的不断进步，其认可度和成本很可能得到改善（Kumar 等，2018）。

图 20: Savonius 垂直轴（左）和 Darrieus 垂直轴（右）



来源：www.reuk.co.uk/wordpress/wind/savonius-wind-turbines/（左）和 www.reuk.co.uk/wordpress/wind/darrieus-wind-turbines/（右）

3.4 直接利用地热能

地热能可直接用于满足热能服务需求，主要是空间采暖和供冷以及城市热水。只需提取储存在地下（从 10 米至数百米或更深²³）岩石或土壤中的能量，具体取决于供应温度和地热资源的质量。业内专家普遍认为，低温地热能（约 10 °C 至 150 °C）更适合直接利用而非发电，因为发电需要更高温度的地热能才能实现理想的效率和经济性；大多数国家都有不少低温地热资源（Lund, 2016; ESMAP, 2012; Moya 等, 2018）。

中低温地热也是区域供热的理想热源，在许多情况下，只需将化石燃料热源替换为地热热源，即可使用现有区域供热系统。事实证明，对于城市区域供热，地热能是可以替代化石燃料的可再生能源，既能满足基本负荷，而且有利可图。

由于供热行业需要脱碳，而直接利用地热能存在巨大潜力和优势，因此，城市中的地热能应用不断增长。2010 年以来，全球直接利用地热能的装机容量增长了一倍以上。到 2019 年，88 个国家部署的地热能达到 107,727 兆瓦热 (MW_{th})。这一增长主要是因为地热（地源）热泵增多，地热热泵占总装机容量的 71.6%，其次是空间采暖应用，占 12%（Lund 和 Toth, 2020）。全球地热联盟希望到 2030 年实现地热供热增长两倍以上，因此，直接利用地热能预计将继续增长（文本框 4）。

²³ 目前浅层和深层地热之间尚无明确界限。一般来说，只要在地下 15 至 400 米之间，就是浅层地热资源。请参阅 <https://geothermalcommunities.eu/assets/elearning/6.22.Shallow%20Geothermal%20Systems.pdf>。

文本框 4： 全球地热联盟

在 2015 年 12 月的《联合国气候变化框架公约》第二十一届缔约方大会 (UNFCCC COP21) 上，全球地热联盟发布了一个包容中立的多方利益相关者平台，旨在加强公共、私营、政府间和非政府行动者之间的对话、合作和协同行动，以实现他们的共同愿景，即加快地热发电的部署和直接利用。

该联盟制定了一个雄心勃勃的目标，即到 2030 年，使地热发电装机容量增长五倍，地热供暖增长两倍以上。

更具体地说，该联盟的目标是：

- 打造有利的环境，吸引地热能投资；
- 为具有地热市场潜力的地区和国家提供个性化的支持；
- 为地热价值链上的关键利益相关者们提供交换见解和经验的便利；
- 确定和推广分担和减轻风险的模式，以吸引私人投资并将地热设施纳入能源市场；以及
- 提高地热能在全球能源和气候辩论中的关注度。

目前，该联盟聚集了 70 多个成员国以及来自地热行业、发展伙伴、国际金融机构和学术界的合作机构。详情请访问 www.globalgeothermalalliance.org。

在应用方面，直接利用地热能可以集成到城市区域供热和/或供冷系统中，或在供热需求不足以支持投资新的热能网络时，作为单个建筑物或建筑区的独立系统。地热区域供热依赖于平均深度约为 2 千米的地热井，但表面积几乎可以忽略不计，这些地热井及其供热中心可以轻松融入城市景观，几乎不留一丝痕迹。仅在欧洲，就有至少 25% 的人口居住在地下蕴藏着丰富地热资源的地方。这些资源非常适用于地热区域供热，可以取代当今的化石燃料区域供热²⁴。

与对已有建筑物进行改造安装相比，在新建房屋、街区或城区中采用直接利用地热能系统要更容易的多（因而成本更低）。但这并不是说，不能在现有建筑或社区中部署这些系统。例如，瑞士每 100 平方千米的地热容量为 5.32 MW_{th}，是全球地埋管换热器密度最高的国家。2019 年，瑞士是每单位土地面积直接利用地热能最多的国家。自 2011 年以来，瑞士超过 30% 的地热井用于现有建筑，预计新增地埋管换热器 700-800 千米（Scanner, 2017; Lund 和 Toth, 2020）。

地热（地源）热泵系统是最常用的地热系统，热泵一端与地面系统相连，另一端与建筑物内部提供热服务的配热网络相连。

最常见的地面系统类型有开环系统和闭环系统，后者又可以分为水平系统和垂直系统。表 5 介绍了它们的关键特性。

大多数情况下需要地热钻孔；但是，水平地源热泵系统通常仅需要去除土壤或开凿深度小于 5 米的浅沟。两项工程都非常昂贵，占项目总成本的很大比例，虽然水平配置相对便宜，但浅沟需要更大的土地面积，这在城市中可能极具挑战。

鉴于地热能可在不同季节或不同时间段用于供热和制冷，混合系统能够用浅层地面来储存热能，基本上可以补偿地热能自然补充的不足。地埋管热能储存系统 (BTES) 和含水层热能储存系统 (ATES) 是常用的两种技术（Bayer 等, 2019）。

最后需要注意的是，从地热发电厂排出的废热通常以级联方式用于各种供热服务，从区域供热到水产养殖。因此，如果可以在城市或其周边开发高焓地热资源，将可提高系统的能源效率和经济效益（Moya 等, 2018）。2019 年，全球地热发电总装机容量达 14 GW，其中大部分配置为热电联产（IRENA, 2020c）。

24 请参阅 www.geodh.eu “Potential”（潜力）项下。

表 5： 开环和闭环地源热泵系统的主要特点

地面系统	热源	载热流体	规模	深度	
开环 (受限于合适的含水层的可用性)	含水层 (地下水)	地下水作为与地面交换热量的介质	大型 (例如, 10 MW _{th} , 美国肯塔基州路易斯维尔)	大多数情况下, 深度不足 50 米的两口井/双井	
闭环	水平	吸收/储存在地球表层的太阳辐射	在热泵的蒸发器中循环的制冷剂	小规模	通常不足 5 米深
	垂直	上部为太阳辐射, 下部为地热	合成载热流体	大小取决于地下热交换器的数量 (BHE); 欧洲每个电厂的密度最高为: 154 个 BHE, 每个 70 米深; 全球最高为: 400 个 BHE, 每个 130 米深	使用 BHE 时, 深度一般为 15-20 米至几百米, 通常约 100 米
其他:	垂直立井 新理念	和垂直闭环一样 来自矿井和隧道的水	和垂直闭环一样	大型	几百米

基于 Scanner, 2005

3.5 智能电网的创新发展

为在城市内实施上述可再生能源方案，城市能源基础设施（尤其是配电网）必须具有灵活性，以适应城市中高比例的可再生能源（特别是太阳能光伏以及城市附近潜在的风力发电）。同时，能源基础设施必须足够“智能”，以整合应用于其他领域，比如运输、供热和供冷领域。

数字技术越来越广泛地应用于电力系统，并展示出巨大的潜力，即通过对资产的自动化监测和操作，最大程度地提高可再生能源技术的效益和整合。（Hossain 等人，2016）。

数字技术可用于平衡某些可再生能源的波动性 — 特别是带有负荷的波动性可再生能源，比如小型太阳能光伏和微型风电机组 — 通过数据驱动的预测技术、储能系统、电动汽车和行业耦合技术，增强波动性可再生能源 (VRE) 在地方能源网络的整合（Hossain 等人，2016）。

尽管如此，智能电网的持续发展和其优化的运营和管理需要一些关键技术和配电系统运营的创新，如节能蓄电池、电动汽车智能充电和先进的天气预报工具；另外，新的商业模式和市场设计及监管，例如净计费方案和分时电价等，也同样重要（IRENA，2019a）。随着城市能源系统日益复杂化，越来越依赖可再生能源并逐渐分散化，这一点愈加重要。

因此，智能电网为波动性可再生能源份额的增加和系统效率的改进创造了新的机会。通过优化运营和管理，估计可为建筑物节省 20-30% 的能耗，而无需对建筑物内部的主要硬件进行更改。同样，具有良好需求响应策略的智能电网 — 以各种激励及分时定价方案相关的技术为基础 — 能够在降低电耗的同时，将能耗（或生产）转变为低（或高）需求时段并有效利用储能系统，从而更好地整合更高份额的 VRE。大多数情况下，有效的需求响应方案预计可让峰值用电需求减少 10-15%。（Reynolds 等人，2017）。

然而，要实施具体的创新解决方案，配电网中的智能电网要与现有市场设计和监管的改变以及资产和系统间互操作性相关的智能电网协议相辅相成（DNV GL，2019a）。

借助数字化，我们实现了新的商业模式，为消费者和系统运营商均创造了机会。例如，为了扩大城市 VRE 的规模，将分布式能源资源合并成一个虚拟发电厂的聚合商等新参与者的出现成为该解决方案必不可少的一部分（IRENA，2019c）。另一个与城市高度相关的创新解决方案，尤其是在分散式电力行业内，是打造地方电力弹性市场，其中的配电系统运营商可以从网络市场获得灵活性，从而汇集配电层面的所有可用资源。在英国和德国，各种利益相关者正在持续地试行这些举措（IRENA，2019g）。

随着数字化终端用电行业的不断发展，将人工智能的前瞻性技术突破集合至智能电网管理系统中，能够最大程度地提高未来能源系统和市场的效率，使得高份额的 VRE 资源与储能系统以及其他行业耦合技术得以结合（DNV GL，2019b）。

电动汽车的智能充电就是一个很好的例子。随着电动汽车数量的不断增长，不可控充电造成电力需求的迅速激增，导致电网高度拥堵，因此给配电网的运营带来了越来越大的挑战。这就引发了应当如何处理高峰充电负荷的问题，以及需要制定什么样的政策和监管框架，以确保城市中交通和电力部门的有效整合。

IRENA 的 *创新展望：电动汽车智能充电* 说明数字技术支持的智能充电能够促进高比例波动性可再生能源发电的整合。智能充电利用了电动汽车的电池储存能力，这必然会提高电网灵活性，同时与其他技术相比，降低了峰值负荷以及充电成本。（IRENA, 2019b）。

目前可用的一些数字技术相对较新，需要更好地融入城市能源系统。智能电网仍在努力解决非标准化、稀疏分布的数字化技术以及不完善的监管制度等困难。Eurelectric 的一份报告指出了欧盟在限制智能电网投资方面的监管漏洞（Rodrigues da Costa 等人，2011），包括回报率不佳和监管不稳定。

监管部门还采用了有限的成本效率评估方案，报告认为该方案打压了对研发或智能电网试点项目的支出，而鼓励继续保持往常的支出（Rodrigues da Costa 等人，2011）。

此外，个别市场参与者对其角色和责任缺乏明确的认识延缓了智能电表的推出。这种电表是向参与者提供终端用户电力消费方式详细信息的一种关键设备，因此也是智能电网和新商业模式的重要组成部分（Rodrigues da Costa 等人，2011）。Reynolds 等人，2017）。据观察，北欧国家的一项重要进展是创建了所谓的电能计量数据集成中心，在公平的竞争环境中为电力行业的各种参与者，包括消费者提供数据（IRENA, 2019g）。

我们拥有应对这些挑战的方案。第一步是认识到有必要将硬件、软件和通信协议的技术要求与扶持性政策和支持性监管要求结合起来，并明确界定市政电力系统中既有的和新出现的行为者的角色和责任。例如，为促进智能电网的发展和实施，通过理论与应用之间的反复学习过程，实施和完善统一的控制和管理策略，将系统运营商、消费者、技术供应商和发电厂等都纳入到策略之中。

3.6 区域热能网络

区域供热早已在全世界得到应用。其非常适合具有高线性热密度的城市地区，因此在这些城市里，对热网基础设施的投资都能得到合理的财政和经济支持，也能实现更高的能效。目前为止，90%的区域供热需求都是通过化石燃料（采用 CHP）和一般生产高温热水的热电厂满足（Werner, 2017）。

近年来，可再生能源在区域供热中发挥了越来越大的作用。这很大程度上归功于新一代的热网技术。该技术可以使用低温热源（通常低于 70 °C），例如可再生能源（包括结合了蓄热系统和电热泵的太阳热能和地热能）。当区域供热管网需要低温供热时，可采用热泵来提高系统效率，由此增加经济效益。

利用电锅炉和热泵等传统技术将多余的可再生电力转化为热能，提供了另一种热能生产选择，而且这种应用越来越多。将其集成到与区域供热系统相连的 CHP 系统中，可平均减少 30% 的燃料消耗。如果为确保稳定的供热而安装了热能储存系统，它也可以在独立的供热设施中运行。在当前几代区域供热技术中，作为城市能源结构脱碳措施的一部分，CHP 或工业过程中产生的废物转制能源和废热可以发挥更大的作用。

由于缺乏技术成熟度和不适宜的规模经济，区域供冷不如区域供热应用广泛。但是，未来几十年内供冷需求预计将迅速增加，这种情况也会相应改变。如果供冷需求沿用电空调的日常使用方式，随之产生的高峰需求激增将对电力系统构成巨大挑战。因此，我们必须寻求替代的解决方案。这种情况下，可再生能源驱动的区域供冷具备巨大的潜力。

免费的冷源，如河流、湖泊和环境空气，可以作为冷能的来源。此外，太阳能热驱动的吸收式制冷机可以产生冷能，通过供冷管网供应冷水，以满足城市内空间冷却或工业过程冷却的需求，特别是在大型公共和服务建筑物中，如办公楼和酒店。

冷水的分配通过冷水供应温度和返回温度之间较低的设计温差实现。因此，相同的产能需求下，区域供冷管道要比区域供暖管道宽很多。欧洲的冷损非常小，因为那里的年平均地面温度几乎等于配冷温度。中东地区地面温度较高，管道需要更好的绝缘。

无论是否有热交换器，供冷都由各连体建筑物的分站管理。由于供回管道之间的温差很小，为了不降低供冷管网的输送能力，各分站均采用热长度更长的热交换器。较短的热长度可以降低回水温度和供冷管网的温差。

即将出版的 IRENA 知识产品《可再生能源供热和供冷盈利项目开发技术指南》(Technical guidelines for the

development of bankable renewable energy heating and cooling projects) 将详述关于供热和供冷管网的基本原理，以及如何与供热和供冷生产单元/工厂共同进行设计（文本框 5）。另一份即将发表的报告《区域供热和供冷系统的热能储存》(Thermal energy storage in district heating and cooling) 将对这一技术、典型案例和前景作全面的综述（文本框 6）。

文本框 5: 可再生能源供热和供冷盈利项目开发技术指南

即将出版的《可再生能源供热和供冷盈利项目开发技术指南》(Technical guidelines for the development of bankable renewable energy heating and cooling projects) (IRENA, 即将出版的 b 册) 将为可再生能源供热和供冷解决方案的发展提供支持，使其能够应用于城市住宅、工业和商业用途。

本指南着重阐述了每个配置和负荷需求下的盈利项目方案，并提供了实用的细节，比如能源审计、流程集成、技术选择、技术设计、成本估算和财务模型。本报告涵盖了从项目确认到停运的项目发展周期中的关键步骤。

文本框 6： 区域供热和供冷系统的热能储存

热能储存 (TES) 能够极大地加速热能系统脱碳，尤其是在人口密度高到可以采用区域供热和供冷系统的城市。由于 TES 能够让热/冷能的产生与消耗分开，我们可以强化它的这个作用。另外，TES 能够提高一系列时间尺度内区域供热和供冷的系统效率，不管是短尺度（每小时）还是长尺度（每季节），这种灵活性将让冷热供应与实际需求更好地联系起来。

TES 也可以帮助我们对非高峰可再生能源电能加以利用。它也能够减少可能需要另行安装的新型供热或供冷设备的建设成本。

即将出版的《IRENA 对 TES 的展望》(IRENA outlook on TES) (IRENA, 即将出版的 c 册) 基于对当前和未来研究和发展方向的分析，思考了供热和供冷系统的不同技术和用例，并对不同 TES 技术的短期、中期和长期前景进行了展望。

与使用两个独立的热管网来提供供热和供冷服务的传统方法不同，将被并入下一代热网的创新型设计，例如 ectogrid™，采用单一的热力管网连接不同的终端用户，来回移动废弃的热能（例如，从数据中心、医院和办公楼等使用的冷却系统排出的余热）。同时，热泵可用于开发低温热能以提高所需的温度，而冷却机或逆循环热泵可将温度降低到一个理想的水平。

这种方法的主要优点是，可在需要增加额外的能源之前，重新利用系统中不同终端用户排放的废弃热能，从而提高总体能效。

此外，由于管道中热能温度较低，这种方法即使不能完全消除分配损耗，也能减少分配损耗，使可再生能源热能作为补充来源的适用性更强。

这种热网可以独立运行，连接两个以上的终端使用设施，且凭借其模块化的配置，其能力可随着需求的增长而扩展。

虽然此系统也可以集成到现有的热力管网中，为现有城市地区带来更高的能效和系统灵活性，但其经济合理性在很大程度上取决于能源燃料价格，特别是天然气价格。对于新地区和天然气价格较高的国家，与常规热能系统相比，其经济优势是显而易见的。

4.

城市能源系统规划建模工具

4. 城市能源系统规划建模工具

城市能源系统的独特之处在于，它不仅涉及有形的能源基础设施，而且还涉及重要的社会因素，如公众接受度、消费者偏好和行为、支付意愿和支付能力。要建立有效的地方电力系统并实现可再生能源的目标，取决于是否能使用健全的流程和工具进行城市能源系统规划。

规划流程可帮助我们制定一个合理的可持续性城市能源系统计划。许多机构制定了有效的框架和实用的工具，为地方主管部门提供贯穿整个规划流程的指导（Saheb 等人，2014；Hemis，2017；UN-Habitat 和 ICLEI，2009）。

此外，能源规划必须尽早纳入城市规划，因为城市形态、功能和分区对能源需求有着重大影响，对能源生产的影响也越来越大，特别是生产性消费者激增的情况下（Zanon 和 Veronesi，2013；Rickwood 等人，2008；Nuorkivi 和 Ahonen，2013）。此外，提高城市应对气候变化的弹性需要在长期规划中加以考虑，因为城市能源基础设施的使用寿命一般可达 50 年或以上（Reckien 等人，2018；Mirakyan 和 De Guio，2015）。

城市能源系统开发的健全流程还需适当的规划工具。尽管可支持城市能源系统规划的建模工具选择广泛，但其在处理不同时空尺度问题的能力上、在技术表达的能力上以及底层方法和分析范围上有所不同。城市能源系统中地方可再生能源份额的增长，也要求我们提高对城市能源系统规划可用工具的认识。这些工具可以帮助我们确定早期规划阶段可再生能源解决方案的可行性，后期规划阶段可再生能源系统的设计（如规模和运行），以及特别侧重可再生能源的战略规划。

因而地方主管部门和能源专家必须更好地了解最适合城市能源系统规划的建模工具，根据其考虑、确定、整合和扩展城市可再生能源技术的能力进行确定和评估。除开发可用的工具外，本章还讨论了在应用工具时可能面临的数据难题，以及应对这些难题的途径。最后，我们以发展中国家为背景讨论了建模难题，因为预计未来 30 年 90% 的城市人口增长将来自这些国家，主要是亚洲和非洲。（UN DESA，2018）

4.1 数据挑战：所需数据、时间与空间粒度及其可访问性

所有的能源系统模型都至少需要一些数据，而且很多模型需要大量的输入数据集。任何模型的输出质量在很大程度上都取决于它的输入数据。参考数据库可以在某种程度上解决数据缺口，但仍然存在重大挑战。与大型模型相比，城市能源系统规划中需要更精细的数据，收集或获取此类数据往往更具有难度。由于各种原因（从不存在到不公开），数据的可用性和可访问性有限，因此存在数据缺口。

接下来的章节主要介绍城市能源系统建模所需的关键数据集，以及在城市和可再生能源系统规划中常见的难题。

需求数据

按小时计量的城市能源模型要求至少涵盖一年时间的每小时需求曲线。需求数据包括能源终端使用（包括电力、供冷供热、生活热水和工艺用热）的每小时曲线以及分区行业的每小时曲线（如住宅、商业、工业和交通）。在分区行业内，还需要关于不同空间尺度的不同能源消费方式的需求数据（例如，不同住宅建筑物类型，如单户或多户住宅，以及不同的商业类型、工业和运输模式）。长期模型需要对未来数年的需求进行预测。预测时还必须考虑当地气候变化的影响（如气温上升时供冷需求增加但供热需求减少）。

需求侧管理模型还需要有关需求弹性和灵活性的数据。能源系统的需求弹性是指能源需求对经济变量（如能源价格）变化的敏感性。建模人员需要能源商品（如热能、电力、天然气和其他燃料）的需求弹性因素，包括应用方面（如不同电器的用电、电动汽车的充电和制冷）以及分区行业（如住宅、商业、工业和交通行业对电力表现出不同的需求弹性）。

需求灵活性指用户停止、更换或替代某些负荷的能力。如用户可能拥有停止或更换热需求的安全性（例如在不同的时间打开不同的加热设备），这取决于建筑物热容量和绝缘特性或者是否可以蓄热。用户也可通过调整建筑物的舒适水平来停止需求。如需替代，用户可根据长期价格信号改用替代能源和技术（例如将化石燃料锅炉改为热泵，改用效率更高的家电或替代燃料汽车）。

增效措施也会影响能源需求，包括对具有翻修潜力的建筑物进行不同程度的改造（如更换窗户、改善隔热和全面的建筑物改造）。为此，我们需要获得有关建筑物类型的数据，以及一段时间内的成本数据和可行改造价格。

考虑增效措施的长期模型还需要有关终端技术和转换器效率收益和成本的未来趋势数据（如有关商业/服务行业和工业行业内照明、烹饪、制冷、洗碗机、其他电器及终端技术的数据）。

供应数据

每小时供应曲线提供了关于（潜在）能源生产和燃料供应的信息（如电网供电、天然气、木材、生物燃料、运输业燃料和其他燃料），包括分区行业和最终应用两方面。现有的电力供应结构（即来自不同的不可再生或可再生能源发电厂）作为未来结构的基础，也是供应数据的一部分，根据能源资源类型的不同，具有不同的时空尺度要求。

就太阳能和风能而言，至少需要全年的每小时发电量数据，而水力发电则可以按季节估测，木材和废物的潜力可以按年计算。空间信息对太阳能、风能和水资源尤为重要。

城市能源模型也需要有关供应技术的详细信息。包括现有分散式可再生能源技术、热电厂和储存解决方案的装机容量、效率和可用系数以及潜在的装机容量等信息。此类数据包括了高峰供应技术和备用容量。

对于建筑物层面的太阳能应用，在估测潜在的太阳能供应时，也需要屋顶和/或屋面的安装潜力、周围建筑物、树木和其他基础设施的遮蔽情况以及建筑物分区限制（例如，文物类建筑）等方面的数据。

还需要有关安装潜力的数据来估测较大型分布式可再生能源的装机容量。包括地面型太阳能光伏集热器、生物质或转废为能 CHP 机组、大型地源热泵、区域级储能系统（例如，季节性热能储存和大规模电池储存系统）、风电机组和小型水力发电站。后者通常位于城市/区域的郊区，或与工业区建设协同发展。

城市基础设施数据

城市基础设施数据包括配电网的网络布局（线路输送能力、变压器、变电站及其配置）、区域供热、供冷和燃气管网（管道输送能力和温度）、运输网（公路、铁路、地铁、公交、加油站和停车场）以及网损和生命周期数据。这些数据对于确定现有城市基础设施可容纳的 VRE 数量，以及估测改善基础设施所需的投资至关重要。

建筑物作为城市基础设施的一部分，塑造着城市的形态。建筑物功能和结构（例如，楼层、居住者人数、施工日期、翻修历史、供热面积、屋顶面积、屋面面积等）、现有能源转换器（例如，供热源技术和现场发电）以及能源网络的接入（如天然气、区域供热、配电和运输网络接入）都需要数据库。

城市运输模型需要有关运输车队的资料，例如车辆数目和类型（车队组成）、年龄、人公里和车公里、驾驶情况和油耗率。

城市基础设施数据也包含空间（即地理信息系统，或称 GIS）信息。但是，详细的空间和网络基础设施数据库通常都很大，且很多城市面临着城市能源系统规划的数据收集和处理难题（Zhou 等人，2016）。另外，许多建模工具缺乏对空间和网络的描绘，通常是在规划的后期阶段使用专业的工具来处理（例如，电力系统模型和利用 GIS 的建筑模型）。

能源技术数据

同时采用可再生和不可再生燃料的能源发电技术以及储存技术数据共同构成城市能源模型的核心部分。数据要求包括不同系统规模（例如，从以千瓦计的单个家庭到以兆瓦计的城市小型发电厂）的地方成本（例如，投资、运营和维护以及处理费用）和性能系数（例如，效率、可用系数和损失）。还需要估计成本和性能系数的未来趋势。

根据 IRENA 的研究，在长期模型中，特别是可再生能源技术和储能解决方案，其成本近年来下降的速度要快于预期。

微气候和天气数据

城市微气候指当地气候条件与周边区域不同的方面。这些方面会影响当地的温度、湿度、气压、云形成和风场类型。长期城市能源系统规划模型还需要反映出未来全球气候预测将对这些微气候方面的影响。

城市热岛效应也属于城市微气候。这指的是由于地表变化和余热的产生而导致城市温度比周边地区更高的现象。当地热能被纳入技术组合时，需要考虑近地表城市热岛效应。

我们需要用微气候和天气数据来支持城市的智能能源管理。太阳照辐射量、云量、风速和温度数据可用于模型中的可再生能源发电预测、需求预测和系统故障识别（Zhou 等人，2016）。

数据的时空粒度

时间粒度

特别侧重 VRE 的城市能源系统规划通常都需要更高的时间分辨率。根据应用程序的不同，电力系统详细规划的每小时尺度，以及城市能源系统规划中水电技术的季节尺度也都会有所不同。每小时数据通常在规划工具中采用，尽管其中许多工具能够修改时间步长的时长或描绘。

但是，与建模所需的数据相比，通常可用/收集的数据具有较低的时间分辨率。能源相关组织（例如，能源机构、政府机关、国家统计局和能源系统运营商）一般按年提供能源供应统计数据，而非按较高的时间分辨率提供。因此，提高分辨率的解聚方法（例如，根据年度能源需求数据和其他统计数据估测或模拟每小时的需求）也会被采用。

随着智能电表和传感器在电厂层面的不断推广，需求和供应数据的差距有望得到弥补。智能电表收集数据的时间从每小时到几秒不等（Stegner 等人，2016；FERC，2008）。这些数据具有较高的时空分辨率，因此非常适合城市能源建模。

然而，并非所有数据都需要高粒度。某些情况下，年度或绝对数据就适用于城市能源系统规划，如总可再生能源装机容量潜力、某些可再生能源资源潜力（例如，全年废物、木材和粪便的潜力）、建筑物翻修潜力和城市基础设施数据。

空间粒度

城市能源系统中针对特定场地的可再生能源规划需要高空间分辨率的数据。与时间上的情况一样，城市能源系统的供给侧和需求侧也常常缺乏高粒度的数据。这些情况下，可运用解聚和聚集方法估测数据缺口，或采用比预期更粗略的建模解决方案。

当城市能源模型采用高时空分辨率（例如，用每小时需求描绘单个建筑物）时，建模人员必须确保建筑物需求曲线均能描绘实际的差异条件。按照技术术语，该系统的同时性（差异性）系数应略大于 1²⁵。这样可确保城市能源系统不会因高估了峰值需求而过于扩大规模。

25 在技术方面，系统的同时（或差异）系数大于 1 才合理。同时或差异系数的定义是：在一定时期内一群消费者个人最大需求总量与该组消费者在同一时期内的同时最大需求量（即系统的最大值）之比。此数值大于等于 1。

有些专业的规划工具，可根据其范围的不同提供更大的空间深度。例如，侧重于城市规划而不是能源规划的工具（如 UMI）以及专业系统分析工具（如功率流网络模型）需要重要的空间信息（例如，城市环境中所有组件的 3-D 模型及配电网详图）。但是，这些工具对整体能源系统提供的观点/分析通常有限。

数据可用性和可访问性

大多数国家还没有系统地建立城市一级的能源统计，皆因许多国家的中央政府尚未提出要求。同时，关于建筑物、地区或城市层面可再生能源资源潜力和技术安装潜力的数据收集工作也鲜少进行。即便是在欧洲，需求弹性数据也很少见（Silva 等人，2018）。关于建筑物翻修潜力的数据也很少。

在全球范围内，尽管对智能电表的投资正在迅速增长，特别是在欧洲和亚洲，但大多数城市很少用信息和通信技术(ICT)，比如智能电表,来收集数据。

适当的 ICT 基础设施对于分散的可再生能源整合尤其重要。在这种情况下，需要获取新数据集和既往未监测的数据集（例如，在地方能源网络中有关生产、消费和交换数据的收集）。

像综合建筑库存数据这种基础设施数据库，未必适用于城市。这在发展中国家预计会是一个更突出的问题，因为这些国家的很大一部分城市人口居住在贫民窟 — 例如，目前亚太地区近 30% 的城市居民生活在贫民窟地区（Heyzer，2014）。

即使在收集数据时，由于缺乏关于如何收集、处理和报告这些数据的集中监管标准和度量标准，数据格式会存在很大差异。数据也可以跨多个数据源私有，对数据隐私和滥用的关注和监管限制，限制了数据的可访问性。

隐私、所有权、度量标准和其他数据管理问题必须得以解决，同时还需加快应用数字技术，以收集可用于城市能源系统规划的能源数据。

4.2 建模工具

城市能源系统规划有各种各样的模型和工具，跨越不同的空间尺度、时间尺度、技术表达、底层方法和分析范围。在一项综合性研究中，我们对这些模型和工具进行了评估，确定了该领域目前的差距和难题，并提出了改进这些工具/方法的相关建议，以方便城市能源规划者采用。

基于对与地方可再生能源应用相关工具的全面评估（例如，从项目到城市规模），以下七种工具脱颖而出，具有广泛而普遍的适用性：OSeMOSYS、Balmorel、EnergyPLAN、HOMER、TIMES、MESSAGE 和 LEAP。我们根据这些工具在城市中考虑、确定、整合和扩展可再生能源技术的能力，对其进行识别和评估，并在下文作进一步讨论。

OSEMOSYS

简要介绍：OSeMOSYS（开源能源模拟系统）自 2010 年以来一直在进行开源开发。这是一个成本最低的线性优化程序，可为长期投资和运营决策提供支持。用户可以定义切片（精确到小时级）和建模层面。该程序可为所有可再生能源技术、常规能源技术和储存技术建模（Groissböck, 2019）。

考虑：OSeMOSYS 在可再生能源和其他能源技术建模方面具有很高的灵活性。任何技术都可以定义为具有转换效率和投入产出份额的单到多投入产出过程。可用系数可以按时间切片指定（支持对维护计划和部分负荷运行条件的描绘），缓变率也可以建模。用户可以灵活地为其应用定制时间步长（时间切片），可以精确到每小时尺度，因此非常适用于 VRE 技术（例如，利用太阳能和风能的技术）。但是，它不能设置低于小时级的时间步长。

该工具可以描绘所有可再生能源，也可限制可再生能源发电。通过建立模型，可以方便地借助约束条件来确定可再生能源发电目标。所有成本都可以描绘，未来成本可以随着年份而变化；但它的一个缺点是可变成本似乎不能由时间切片指定（例如，每年以下的级别）。正因为如此，分时定价/峰荷电价很难实施。建模的另一个缺点是：环境或部分负荷条件无法影响可再生能源技术的性能（例如，环境温度对光伏性能的影响）。但是，可对技术退化/老化进行建模。

技术特性：OSeMOSYS 使用线性优化方法，可最大程度地降低系统总成本。这是一个完全预见模型，假设使用完全的市场条件，且仅有减少成本的单一目标，因而可能会限制某些类型的分析（例如，多目标决策分析）。

这些都属于底层方法的局限性，在许多能源建模工具中很常见。（总的来说，所有模型都不擅长模拟社会行为和非理性决策。）尽管已经开发了随机扩展，OSeMOSYS 并不太侧重随机和不确定性分析，但能执行敏感性分析。在其优化框架内，该工具有助于优化可再生能源技术的长期投资规划；技术的规模可以采用整数或实际变量值。

情景可用来评估不同的政策和目标，以鼓励采用可再生能源技术（例如，碳税、排放目标和可再生能源发电份额）；然而，并非所有的政策机制都很容易进行建模（比如上网电价补贴和可变电价）。

整合：OSeMOSYS 可用于对整个城市的能源系统进行建模，整合所有行业和系统的交互作用，以确定可再生能源技术可以在哪些方面得到最佳整合。城市细分领域建模也可成为相互作用的独立区域。

所有的能源需求和供应（如可再生能源）资源均可以描绘；然而，需求是从外部定义的，所以无法对需求弹性进行建模。虽然 OSeMOSYS 不是一个潮流模型，但可以模拟网络连接和能源进口/出口，且不能明确地描绘大多数运行细节（如线电压）。

很多储能技术（对 VRE 集成很重要）可以通过充分的技术细节来进行建模（例如，放电深度和储存效率），但有些参数（如无载损失）未包括在内。

扩展：OSeMOSYS 是一个灵活的框架，可以适应从单个建筑物到大城市的任何规模。它适用于可再生能源的绿地和棕地投资和运营规划（例如，对新型及现有的城市细分领域均适用），不管是短期（比如一年）还是长期（比如 50 年）。用户还可以描绘可再生能源技术的规模经济。

可用性：OSeMOSYS 是一款免费的开源工具，透明度很高。然而，就像许多开源工具一样，这意味着它缺乏对用户的技术支持。使用 OSeMOSYS 需要具备优化建模和计算机技能（例如，GAMS 和 Python）的背景，尽管它已经开发了一个基本的图形用户界面以弥补这个缺陷。与其他工具相比，OSeMOSYS 可能需要更多的培训，而且用户必须提供所有的建模数据。

总体：OSeMOSYS 是一款强大的免费优化工具，可以用来模拟整个城市的能源系统。用户可以通过考虑一系列气候、技术和政策情景，确定长期整合可再生能源的最优成本路径。尽管结构相似，这个工具不具有 TIMES 模型那样的灵活性（见下文）；但是，OSeMOSYS 相对不够成熟，处于不断发展的阶段。它最大的缺点可能是不适合没有经验的建模人员。

BALMOREL

简要介绍：Balmorel 是一个支持长期和短期投资和运营决策的局部均衡模型。可将其作为线性的最低成本优化问题来完成。此工具于 2001 年开发，自此一直作为一个开源模型加以维护。Balmorel 可以作为各种可再生能源技术和其他技术选项的模型。它主要应用于分析和扩展现有的能源系统，如将热泵集成到哥本哈根的区域供暖系统或分析该市的 CHP 系统。现有的大多数研究侧重于可再生能源的整合以及能够推动可再生能源技术得以广泛采用的政策机制的有效性。

考虑：Balmorel 可以模拟几乎所有的可再生能源技术（潮汐除外）。它提供了描绘多输入/输出技术的灵活性，并且可以指定关键技术参数，包括可用性系数和所有成本（包括平衡成本）。但是，不能指定随年度变动和随时间步长变动的成本。用户可以灵活地定义从一小时到五年的时间步长。可再生能源可以削减，但不会随着时间的推移而退化，环境和部分负荷条件也不会影响技术性能。

技术特性：Balmorel 是另一种线性优化的局部均衡模型，但受到完全预见和市场假设的限制。该工具有助于建立长期城市能源情景模型，以确定成本最优的可再生能源路径。

对大多数气候政策措施（例如，碳税、排放目标、可再生能源份额、自给自足措施和化石燃料消耗限额）进行评估可以促进可再生能源技术，但某些政策工具（例如时变电价政策）无法进行描绘。Balmorel 可用于可再生能源技术的能力和运营规划，它可将这些技术作为整数或实际变量来衡量。

整合：Balmorel 可以用来模拟整个城市的能源系统，但是除住宅和交通行业之外，还存在大量行业聚集的现象。该工具侧重于电力和区域供暖的可再生能源整合，但也可以描绘其他需求。还可以对需求弹性和响应进行建模。Balmorel 可以描绘各种储能设备，包括短期和长期的储电、储热、储氢，甚至是碳捕集与封存。网络连接可以描绘为简单的传输过程（比如在多区域城市模型各细分领域之间），也可将能源交易（进口/出口）考虑进来。

扩展：Balmorel 使可再生能源技术能够在长期的情景（长达 50 年）中进行多年投资和运营规划。它可以用来描绘任何尺度上的城市细分领域，但更适合用于棕地分析。也可以在建模框架中描绘规模经济。

可用性：Balmorel 是一款免费的开源工具，透明度很高。因此，其技术支持也很有限。它没有完善的图形用户界面，且用户的技术必须很娴熟。高级用户可以在开源代码的基础上进行开发，推荐的培训周期通常是一周。

总体：Balmorel 已经开发了近二十年，经评估是最早的免费开源模型之一。Balmorel 不像其他工具那样可以进行大量的行业解聚，也不能模拟潮汐能技术，但在其他方面是一个非常强大的工具，可以对城市的可再生能源容量和调度进行成本优化规划。



ENERGYPLAN

简要介绍：EnergyPLAN 是一款自底向上的仿真工具，用于评估绿地和棕地（即新型和现有）能源系统。可让用户以每小时的时间分辨率探索为期一年的能源系统情景。

EnergyPLAN 自 1999 年以来一直由奥尔堡大学开发和维护，可再生能源技术不断发展的作用在该工具中得以充分体现。2004 年，该工具仅侧重于对风能、太阳能和热泵技术的建模。而到 2009 年，除了运输选项、电解槽和供冷技术外，还增加了储能选项（例如，电池、压缩空气储存、储氢）。到 2012 年，增加了废物转制能源、地热、吸收式热泵、抽水蓄能电站、生物质能转换和合成气体技术，以及有关电网的考虑因素。到 2017 年，又增加了海水淡化、碳捕集和区域供冷功能。

如今，EnergyPLAN 可对所有关键的可再生能源技术、常规能源技术和储存技术进行建模。

人们利用 EnergyPLAN 开展了从城市到国际范围的广泛研究（Aalborg University, 2018）。大多数研究侧重于将可再生能源技术纳入能源系统。侧重这一点的地区主要集中在欧洲国家，但美国和非洲国家（比如肯尼亚和坦桑尼亚）、中美洲（墨西哥）和中国（香港）也有应用。

在城市规模的研究中，就丹麦而言，该工具为奥尔堡、哥本哈根和萨姆斯岛制定了 100% 可再生能源政策，并对腓特烈港调查了地区供热转为可再生能源的问题。此外，还调查了综合能源系统和丹麦当地能源市场。此外，该工具还进行了多项其他研究，包括荷兰为实现社区自给自足的可再生能源整合、美国加州洪堡的可再生能源整合以及香港的可再生能源情景。

考虑：EnergyPLAN 可描绘所有可再生能源技术，但与推荐的大多数其他城市能源规划和建模工具相比，其技术细节有限。它可以用基本参数描绘多输入/输出过程（如效率），但不考虑可用性（例如，维护规划或被迫停电）、削减、缓变率、机组组合或收回次优资产的可能性等。将时间步长设定为一小时，可适用于许多可再生能源的应用场合。然而，EnergyPLAN 描绘了所有成本，包括固定或变动商品成本的可能性（即每小时）。所有可再生能源资源也可以在供给侧指定。

技术特性：EnergyPLAN 是一个自底向上的确定性仿真模型，旨在帮助用户探索不同的能源情景，侧重于可再生能源技术。其主要用途是分析这些技术的运营，而不是优化投资。

为此目的，不同的政策机制和监管战略可以在相对有限的短期内描绘出来。尽管建模人员可以将各单年运营结合起来以模拟更长期的运营，但该工具并非为长期分析而设计。它也不适合纳入不确定性或生命周期分析，并且仅考虑二氧化碳排放。这些方面的缺失限制了 EnergyPLAN 的应用范围；尽管如此，由于能够快速评估和比较多种能源情景，该工具已被用于为多个城市规划可再生能源路径。

整合：EnergyPLAN 可以在一个单区模型中描绘一个城市的所有行业。可再生能源整合也可以通过一系列储电和储热设备进行评估，尽管储能模型不像其他评估模型那样详细。所有终端使用需量都考虑在内，但热需求是合计的（即不可以根据不同的加热类型来分类，比如生活热水和工艺用热）。但需求弹性可以指定。尽管系统交互是通过城市能源模型进行描绘，但网络描绘的建模非常简单。该工具考虑了进口和出口，但无法描绘网络元素或容量。

以上因素限制了用户对可再生能源整合到城市能源系统中的可行性的全面评估。

扩展：EnergyPLAN 适用于城市的绿地和棕地研究，但无法描绘城市能源系统的所有细节（比如网络）。该模型每年执行一次模拟，足以评估或优化以扩展未来可再生能源技术的规模为目的的能源系统设计；但也可以结合几个年度的模拟来粗略估计一个中期情景。

可用性：EnergyPLAN 的优势之一是它的用户友好性。这是一款免费的工具，具有良好的图形用户界面和透明的文档。作为一款免费的工具，其技术支持是有限的，但该工具在世界各地得到了广泛运用，并且使用前只需要经过几天的培训。它没有附带支持数据库，但可在开始时让用户使用技术参数的默认建议。

总体：EnergyPLAN 可帮助城市能源规划者在短期内快速探索一系列可再生能源方案和政策。EnergyPLAN 对可再生能源技术的运营见解可以与其他工具有力地结合起来（例如，利用 EnergyPLAN，根据 OSeMOSYS 等工具的长期容量优化模型的结果，分析每年最佳技术组合的运行性能）。EnergyPLAN 对从业者和专家均具有用户友好性。

HOMER

简要介绍: HOMER (多种能源资源的混合最优化) 是以地方为尺度进行能源系统建模的最常用工具之一。这是一款自底向上的模拟和枚举法优化工具, 是指在给定的约束条件和特征下模拟所有可能的系统配置, 然后确定最优解决方案。HOMER 主要用于建立独立型和并联型电力系统模型, 并可按每分钟级别对一年的时间进行模拟。

当今的能源系统中, 可再生能源技术、储能解决方案和环境问题的重要性日益增加, HOMER 的持续发展便印证了这一点。2000 年, 该模型中增加了考虑排放的能力, 到 2005 年其增加的内容包括新技术 (水电、生物质和氢转换器)、改良版电池储能建模、储氢、实时电网定价、碳排放约束和处罚, 以及所有可再生能源技术的具体结果。由于专注于可再生能源整合, HOMER 在 2007 年将模拟时间步长降低到一分钟, 同时还能够模拟温度对光伏和新电网/电池控制参数的影响。

到 2015 年, 该工具已经在储能模拟方面做出了显著的改进, 包括能够模拟飞轮储能, 指定初始电池荷电状态, 并增加了 50 多个新的电池模型。它还对太阳能和风能系统的建模进行了改进 (例如, 针对太阳能和温度对风能资源的影响, 扩展了最大功率点跟踪能力)。2015 年起, 该工具添加了一个新的氢模块和先进的电网功能 (例如, 计划停电和每速率选项), 以及得到极大扩展的组件库。

世界各地无数的研究都使用了 HOMER。该工具为印度的城市社区提供了优化可再生能源技术规划的新系统示例, 包括微电网应用和混合系统 (Fulzele 和 Dutt, 2012; Phurailatpam 等人, 2018; Kumar 和 Bhimasingu, 2014)。在中国, Liu 等人研究了一种用于并联型微电网的太阳能-风能混合系统(2013)。非洲的应用包括将可再生能源技术用于撒哈拉以南非洲缺水的城市地区 (Brandoni 和 Bošnjaković, 2017)。

美国的研究包括为卡特琳娜岛优化设计了一个光伏-风能混合式储存系统, 在加州不同地点与风能储存进行整合, 以及在科罗拉多州博尔德将分布式可再生能源整合到居民家庭中 (Huang 等人, 2011; Lipman 等人, 2005; Johnson 等人, 2011)。

最后, 研究人员还是用该工具在欧洲意大利罗马附近的一个社区调查了城市热电冷联产和远程供暖系统 (Salata 等人, 2015)。

系统模型需要反映出
日益增长的可再生能源使用率
及其储存方案, 以及随时间推移
日益加深的环境担忧。

考虑：在这项研究中，HOMER 采用了一种最详细的方法来为可再生能源技术进行建模。它是为数不多的可按每小时以下级别（即，低至每分钟）进行分析的工具之一，对于可再生能源的详细调度分析非常有用。该工具还考虑了低层技术细节；例如，太阳能光伏的最大功率点跟踪、温度对性能的影响和光伏板方向（比如方位和斜率）；水力发电的水头和流量；以及风电机组的轮毂高度、空气密度和威布尔分布。

还包括了可再生能源削减选项和详细的成本模型。HOMER 在建模方面的优势与其局限性密切相关。HOMER 可用于分析城市可再生能源项目分析，但不能用于模拟整个城市，或进行长期分析。它也侧重于分布式发电，并非仅关注传统能源技术的建模。然而，对于那些想要在城市中实施可再生能源项目并需要投资和运营决策支持的城市能源规划者来说，HOMER 仍然是一个强大的分析工具。

技术特性：HOMER 旨在通过枚举法优化方法，帮助规划者确定可再生能源系统的最佳规模和运行。还可通过其方法支持不确定性分析。HOMER 使用户能够评估一系列政策措施（包括碳税、排放目标和上网电价补贴政策），但仅一年期间的政策。它并非设计用于情境建模；相反，它的优势在于项目规模和运营。

整合：HOMER 侧重的是可再生能源技术的系统分析，因此是一套用于非典型性考虑的工具。它侧重于电力行业，无法对多个城市行业及其交互作用进行清晰的建模。

HOMER 的一大优势体现在能够分析可再生能源技术如何整合到能源系统中，这归功于其储能建模的能力。多种储电装置可以通过重要的技术细节来建模（例如，与速率相关的损耗、随温度变化的容量、循环寿命的不同放电深度以及在较高温度下增加的退化速率）。HOMER 还有一个电网模型，虽然不是潮流模型，但却考虑了安全等因素（例如，停电、电网恢复力和可靠性），大多数城市能源规划和建模工具并不具备这一功能。

扩展：HOMER 适用于城市环境中可再生能源项目的绿地及棕地分析。尽管不适用于为整个城市的能源系统建模，但它不会限制项目的规模。由于时间步长较短，它只适合短期（最高一年）分析。

可用性：HOMER 具有良好的图形用户界面，支持资源和组件库/数据库。作为一款商用工具，它提供了强大的技术支持，尽管其代码并非开源代码，但其文档中的底层计算很透明。用户使用前推荐的培训时间较短（1-2 天）。

总体：HOMER 是分析城市可再生能源项目的有力工具，为能源规划者提供深入的投资和运营决策支持。本研究中的大多数其他工具关注于城市范围内的能源系统建模和可再生能源技术的整合，但这些方法没有像 HOMER 那样提供高水平的技术细节。HOMER 填补了这一空白，为城市能源规划者提供了更丰富的工具集。它可以在高级别研究完成且城市决定实施一项可再生能源项目之后提供低级别分析。

TIMES

简要介绍： TIMES（集成式 MARKAL-EFOM 系统）是 MARKAL 模型系列的一部分，自 1980 年以来由国际能源署开发和维护。它是另一个使用最广泛的能源规划建模工具，可用于从地方到全球的所有尺度。目前有 80 多个国家的 300 多个机构在使用 TIMES。

TIMES 属于最低成本线性优化的局部均衡模型，可用于进行各种分析。其建模框架可让用户自由地定义任何流程（包括所有技术类型），可以将时间步长缩短到一个小时，也可以延伸到未来数年。它特别适用于长期能源系统规划和政策分析。

多个局部尺度的研究使用了 TIMES。在欧洲，该工具用于调查瑞士通过提高郊区和城市对可再生能源技术的采用而开展的长期脱碳路径。它还用来模拟家庭行为对法国住宅和运输行业的影响，模拟意大利某海滨小镇的能源情景，并减少城市运输行业模型中的排放（Cayla 和 Maïzi, 2015; Forsberg & Krook-Riekkola, 2017）。在美国，TIMES 用来调查在长岛引入碳税以及在纽约市引入低碳/可再生能源路径对环境和经济的影响（Cayla 和 Maïzi, 2015; Bhatt 等人; 2010）。

考虑： 正如 OSeMOSYS 一样，TIMES 为可再生能源和其他能源技术提供了高度灵活的建模选项。它具有 OSeMOSYS 模型的所有上述技术建模优势（因为 OSeMOSYS 很大程度上基于 TIMES 开发），包括可定制的多输入/输出技术、基于时间切片的可用系数、缓变率、可低至小时级的灵活时间切片、可再生能源削减和技术老化问题。它也可指定完全成本建模、每小时变动价格（如电价）以及上网电价补贴，这些都是分析可再生能源技术的重要因素。与 OSeMOSYS 一样，TIMES 也不能模拟环境对技术性能的影响。

技术特性： TIMES 的最低成本线性优化与 OSeMOSYS 方法相似，同时还可拥有完全预见性、完全市场和单一的成本最小化目标等限制性假设。然而，TIMES 可以对不确定性分析进行随机扩展，并通过辅助商品纳入生命周期的影响。当考虑可再生能源技术时，这些是值得分析的方面。TIMES 可用于进行短期或长期可再生能源容量和调度规划，也可利用线性和混合整数线性规划确定技术规模。TIMES（如 OSeMOSYS 一样）的理念是通过不同的情景探索未来的能源路径（例如，低碳和高可再生能源情景）。TIMES 可用于调查各种鼓励可再生能源的政策情景，包括使用碳税、排放目标、补助、上网电价补贴和分时计价。

整合：在这一方面，TIMES 和 OSeMOSYS 具有同样的优势。城市内的所有行业、技术和交互作用均可模拟，以对可再生能源整合进行整体分析。任何需求和供应资源（包括可再生能源）均可描绘，并将城市按各个交互区域进行模拟。尽管能够描绘网络连接和能源交易，但 TIMES 并不是一个详尽的潮流模型（在时间尺度和网络细节上均如此）。TIMES 的储存模型较之 OSeMOSYS 更先进；但它们仍受限于技术细节（例如，温度效应和与速率相关的损耗未包含在内）以及不同时间切片级别间（例如，每日和每月级别间）储存周期的有限灵活性。

扩展：如同 OSeMOSYS 一样，TIMES 可用于创建任意尺度的能源模型，从建筑物到合并的城市行业。它非常适合长期容量和调度规划以及绿地和棕地分析。可再生能源技术的规模经济也可纳入模型中。

可用性：TIMES 和 OSeMOSYS 之间最大的区别可能在于使用成本。TIMES 是一款更成熟的工具，具有更优异的建模灵活性和功能；但是，使用其前端接口的许可证费用高达每年 20,000 美元。尽管 TIMES 拥有用户界面，但对比大多数建模工具，用户需要更多的培训才能充分发挥潜力，因此也吸引了很多拥有强大技术背景和技能组合的建模人员。TIMES 本身的代码是用 GAMS 编写的，属于开源代码，专家用户可对其作进一步开发。用户必须提供所有模型输入数据，且技术支持大多通过社区论坛提供。

总体：TIMES 是一款强大的商业优化工具，能对整个城市的能源系统进行建模，以此确定长期内成本最优的可再生能源技术整合路径和政策。与 OSeMOSYS 相比，该工具更完善，功能更强，但其高昂的成本会让许多有预算限制的用户望而却步。该工具也适用于经验丰富的建模人员，其推荐的培训时间是本文所有模型中最长的（一至三个月）。

MESSAGE

简要介绍：MESSAGE（能源供应战略选择及其总体环境影响的模型）是一款使用广泛的综合性评估建模工具。它由国际应用系统分析研究所（IIASA）开发，并自 1980 年起投入使用。

MESSAGE 是一个最低成本线性优化的局部均衡模型，支持长期情景评估和投资决策制定。MESSAGE 有多个版本。其最近开发的版本为 MESSAGEix 模型，是对 MESSAGE 更通用的开源实现。MESSAGEix 可以为所有能源技术建模，可以精确到每小时尺度，非常适合城市尺度的建模。

在过去的四十年中，MESSAGE 已经适应了不断增长的能源技术和日益增长的环境问题（Huppmann 等人，2019）。IIASA 在此期间也开发了可分析风险的随机实现功能。2006 年，IIASA 开发了用于排放分析的污染物细致核算功能。二十一世纪一十年代中期，研究人员开发出了解决 VRE 技术难题的方法（Johnson 等人，2017）。

MESSAGE 传统上应用于国家和全球级别；但是 MESSAGEix 工具更灵活，可用于任何尺度。本文介绍了 MESSAGE 在印度的地方级应用，以研究印度河流域的生活用能（IIASA，2018）。



考虑：MESSAGE (MESSAGEix) 可使用 TIMES 工具中所述的类似技术细节对可再生能源技术进行详尽的建模。与许多其他能源工具一样，各种技术的技术性能不受环境条件（如温度）或部分负荷条件的影响。时间步长可灵活定义，可低至每小时的水平，且所有技术成本均考虑在内。

技术特性：MESSAGE 也是一个完全预见性的线性成本优化模型，其本身的完全条件假设较弱。但是，核心 MESSAGE 模型可与其他几个软件包和模块对接，包括用于不确定性决策的 MESSAGE Robust Decision-Making Framework。和 TIMES 一样，MESSAGE 有助于为可再生能源技术确定成本最优的容量规划路径，其方式是评估城市内的不同长期情景，包括排放目标和各种能源政策。它也可以用线性或混合整数规划来描绘随时间和规模系统变化的规模经济。

整合：MESSAGE 可用于对城市的整个能源系统进行建模，涵盖所有行业、任何能源需求类商品以及所有供应资源，以便对可再生能源技术的整合进行全面的评估。城市可建模为多个交互区域，这些区域可以交换能源并具有基本网络连接的。也可使用 MESSAGE 分析需求弹性和响应。所有储能类型都可建模，以帮助可再生能源进行整合，但这些模型在技术上不像 HOMER 中那样详细。MESSAGEix 还纳入了一个有关土地利用模型的通用仿真器，可用于探索城市内可再生能源系统整合中的土地使用限制。

扩展：MESSAGE 适合对城市的任何尺度进行绿地和棕地分析（然而，较低尺度的建筑物/邻域级别的分析并不典型）。该工具侧重于长期的多年投资和运营规划，因此它能够适当地扩展城市能源系统中的可再生能源技术。

可用性：MESSAGEix 是一款新的免费开源工具，搭建在 MESSAGE 核心模型之上。（原 MESSAGE 模型仅对国际原子能机构的学者和成员国免费。）该工具的开发目的是“提高科学工作流的效率并能够直接整合外部数据源和其他模型或工具”，并为用户提供针对特定用例添加新算式和参数的灵活性（例如可描绘可再生能源、碳排放核算或生命周期评估）（Huppmann 等人，2019）。

因此，MESSAGEix 具有极大的技术灵活性。它有一个网页界面，但是用户应具备较强的技术背景。培训时长估计为两周左右。

总体：MESSAGEix 也是一款强大的免费优化工具，全世界的用户均能使用这个工具来支持城市的长期可再生能源和政策规划。其独特之处还在于能够利用土地使用模拟器来评估土地使用情况。

MESSAGEix 备受高级用户的青睐，用户们可以尽享定制工具的技术自由，并将工具与其他平台和工具进行整合（包括其他 MESSAGE 模型），以充分发挥工具的分析能力。它的推荐培训时间也比 TIMES 短。

LEAP

简要介绍：LEAP（长期能源替代规划）模型也是目前使用最广泛的能源系统建模工具，在 195 个国家拥有 36,000 名用户（SEI, 2019）。它是一个主要用于探索长期情景的仿真工具，但也提供了与 OSeMOSYS 工具整合的优化功能。

LEAP 被大量用户（政府、非政府、研究、咨询和能源公用事业用户）用来对能源政策和气候变化缓解策略进行地方到全球尺度的分析。该工具由斯德哥尔摩环境研究所于 1980 年开发，在过去的四十年内经历了各种变化。随着能源系统的环境影响在 20 世纪 90 年代日益受到关注，LEAP 增加了一个环境数据库（主要由联合国资助）并成为了在能源系统建模上能解决该问题的首批工具之一。到 20 世纪 90 年代中期，LEAP 的温室气体减排评估能力得到进一步发展，许多国家在与 UNFCCC 的通讯中使用了 LEAP。2004 年，该工具引入了多区域建模功能。

LEAP 拥有许多地方尺度的应用，此文仅介绍了其中的一小部分。在中国，LEAP 用于探索北京的低碳（包括可再生能源）转型路径以及天津运输行业的脱碳（Zhang 等人，2011；Yu 等人，2015；Peng 等人，2015）。

印度调查了其城市交通运输脱碳策略，并开发了德里和马哈拉施特拉邦的低碳电力和住宅行业情景（Kadian 等人，2007；Kale 和 Pohekar，2014）。尼泊尔调查了加德满都的可持续性城市交通运输路径（Dhakal，2006）。LEAP 在非洲也得到了应用，那里的 SAMSET 项目利用该工具支持非洲城市开发其可持续性能源策略，包括乌干达两大城市（Kasese 和 Jinja）的可持续发展路径（Mann 等人，2015）。在美国和欧洲，LEAP 用于开发与能源和气候相关的策略以及行动计划，以实现次国家级的碳平衡（Beaton，2015；Lazarus 等人，2011）。

考虑：LEAP 能够为所有可再生能源技术及其基础技术特点建模。它在技术描绘方面不如其他工具广泛和灵活；例如，用户受限于下拉菜单的选项，仅能选择基本的技术特征，比如效率和年可用率。技术成本包括建设成本、固定及可变的运行和维护成本，以及搁置成本和利旧费。LEAP 专为使用年时间步长进行仿真分析而设计，但它也整合了 OSeMOSYS，能够提供低至小时级的优化分析。利用 OSeMOSYS 界面可指定额外的技术参数（例如，高分辨率可用系数）。如果在没有 OSeMOSYS 的情况下作为仿真工具使用，对 VRE 技术的分析受到年时间步长的限制，

技术特性：LEAP 是一款可探索中长期能源情景的仿真工具。好几个城市和区域（例如，哥本哈根、西雅图和美国的马萨诸塞州）利用 LEAP 开发了具体的城市气候和能源行动计划。

LEAP 使城市能源规划者能够评估各种能源政策和碳减排目标，进而促进可再生能源的发展。但是，该工具受到完全预见性假设的限制（如同大多数能源模型一样），并且不能用于随机或不确定性分析（尽管可进行敏感性分析）。

其年时间步长和底层仿真和核算法也意味着，如果没有其他模块或工具的支持（比如 OSeMOSYS），某些政策（比如分时电价）和优化能源规划将无法制定。年时间步长限制了对 VRE 技术、储能和其他能源系统交互的分析。

整合：LEAP 可用于建造城市级模型，用来评估可再生能源技术在长期情景中的地位。该模型囊括了所有行业、终端使用需量和供应资源（包括可再生能源），但用户必须从预定义的类别中选择（即，用户不能指定自定义商品）。它可将城市分割成多个区域。

LEAP 并不适用于储能建模（考虑到其年时间分辨率），但可以利用 OSeMOSYS 的扩展功能将储存模型合并进来。网络规格也非常基础（即，类似于净损耗，不同于显性技术）。但它可以追踪净能源交易（进口/出口）。



4.3 发展中国家面临的建模挑战

大多数发展中国家的能源系统模型采用的建模方法来自于工业化国家。这些方法大多由发达国家设计，或为发达国家所设计，因此往往忽视了与发展中国家有关的一些特点。对这些因素的忽视限制了模型在能源规划方面的效果。以下几章详述了现有方法在描绘发展中国家能源系统（包括城市能源系统）时所面临的各种挑战。章节的末尾对影响因素和困难做以总结。

模拟电力行业绩效低下的问题

许多发展中国家正在努力应对电力行业管理不善和绩效不佳的问题。电力系统的配置通常不够理想，无法满足地方需求，甚至存在产能过剩的现象。这可能是由于规划错误和运营维护不善，导致了机组故障、电压和频率波动、电力中断、用电限制等电网安全问题。供给侧表现不佳的另一个原因是在发电能力不足的情况下需求激增、融资不力、高技术和非技术性损失，以及其他组织问题。

定价机制设计不当导致许多发展中国家的电力行业出现严重的损失。上网电价有时会低于长期边际生产成本，

甚至低于平均运营成本。

缺乏有效的电费征收也导致了极大的损失；政府部门和国有企业享受保护政策，这意味着其可以免于承担因未支付电费带来的后果，因此有相当一部分欠缴电费没有征收到位。

在印度，不支付账单、搭接电网线路和输配电损耗等窃电现象几乎占到了发电总量的 30%（相比之下，经济合作与发展组织成员国的平均损失为 6%）；这使得印度电力行业面临着严重的破产风险（Urban 等人，2007）。

补贴使用不足也造成了融资方面的挑战，例如市场扭曲和有限竞争。补贴等融资机制也意在鼓励城市采用可再生能源，但在管理不善的情况下，这些机制的效果会受到影响。

许多城市能源规划和建模框架假设了完全的条件、市场和预见（比如，OSeMOSYS、TIMES、MESSAGE、LEAP、Balmorel 和 EnergyPLAN）。这些假设在最好的情况下也会引发怀疑，更不用说是在上述条件下。为取得有意义的结果，能源系统模型需要在明确地描绘电力行业在技术方面的问题（例如，通过低可用性因素或其他绩效规范），或隐含在能源模拟情景中的问题。

描绘非正规经济和转型经济

非正规经济包括了未纳入官方经济描述（如 GDP 或附加价值）中的所有非官方交易（货币和非货币形式）。其规模在发展中国家非常庞大。然而，极少数（个别）能源系统模型在描述能源经济系统时明确地考虑了非正规经济。将非正规因素考虑在内非常重要，有利于预测未来需求量、描绘能源系统经济和产生有意义的结果，为决策提供信息。

我们经常认为发展中国家正在走和工业化国家一样的发展道路，即减少农业比重，向大规模工业行业转型，然后再向服务行业转型。但是，许多亚洲发展中国家通过尽快向服务行业转型，走上了能源强度比预期更低的发展道路（例如印度）。这在发展中国家和城市的长期能源需求情景中是一个需要重点考虑的方面。

在描绘发展中国家非正规经济和转型经济时，最大的挑战是缺乏数据。这些数据难以收集，因为非正规经济涉及到非法活动、逃税或避税以及货币和非货币交易。收集这方面数据的政治意愿也不强烈。

建模挑战和可再生能源整合

用于制定城市能源系统规划的能源模型若忽略了上述因素，就很难对可再生能源技术提出有意义的规划建议。

一些研究分析了发展中国家很多失败的地方和大型项目，并将其原因归结为项目管理不善、腐败、运营失败、维护不善、投资失败、政府支持不足和地方能力建设不足（Okereke, 2017, Ikejemba 等人, 2017）。

鉴于这些失败案例，城市的可再生能源整合，尤其是与创新技术和管理策略（比如智能电网和需求侧管理）的结合，需要进行谨慎的建模和分析，以确定实际的实施成本、收益和风险。

这对吸引可再生能源项目的投资者非常重要，他们更相信将社会、技术和经济因素/风险考虑在内的建模结果。也就是说，城市不应过分担忧其首批 VRE 项目所带来的电网稳定性和可靠性问题，通常应由电网公司处理相关的运营难题。随着波动性可再生能源的份额增长到一定水平，建模会变得愈加有益和必要。

发展中国家建模时存在的上述差距和挑战背后还隐藏着几个因素。大多数发展中国家的模型采用的是发达国家建立和应用的方法。由于后者并未经历过这些因素所带来的巨大影响，因此在建模时往往会将其忽略。相关文献强调了发展中国家存在的以上建模差距，而且其建模方法也不够完善。发达国家和发展中国家缺乏科研协作，没有建立相应的方法将能源系统模型的上述方面涵盖进来。



4.4 城市能源系统规划展望

展望未来，随着城市化进程的加快以及全球气候变化对地方日益增长的影响，城市应更加重视城市能源系统长期规划中的这些要素，如城市密集化、地方能源资源整合、人建环境的效率、微气候和气候变化以及交通基础设施的变化。

城市密集化

未来城市的城市密度预计将稳步增长。城市越密集，土地利用率就越高，对私家车的需求就会减少，导致公共交通运输系统更紧密地结合在一起。这样也能减少发达国家和发展中国家的城市能源需求量和温室气体排放量（Güneralp 等人，2017）。然而，“密集化”也可能导致更严重的交通拥堵，增加局部的空气污染。土地利用交通运输模型与城市能源规划和建模工具的结合，可帮助研究人员评估城市密集效应以及对能源的影响。

当地能源资源整合

随着城市人口和密集度的不断增长，当地资源管理和与能源系统的整合将变得日趋重要。居民产生的废水、污水和其他固体废物等资源流应当纳入城市能源系统规划中。这对于发展中国家的城市非常重要。在这些城市中，有 60-80% 的固体废物是有机废物。据估计，这些废物中有 90% 可转换成沼气之类的有用物质；然而，目前地方政府将 30-40% 的预算投入在了收效甚微的废物管理系统上（Heyzer，2014）。这些尚未开发的资源流必须纳入城市可再生能源规划模型中。

建成环境的效率

提高人建环境中的能源利用效率（通过改造、翻修以及提高新建筑物的效率标准）是未来城市的另一个主要特征。许多城市能源规划和建模工具没有明确地模拟建筑物的增效措施，但是建模人员可以使用变通方法对其进行描绘（例如，通过将建筑物翻修模拟为人工供给技术，以降低对建筑物的最终用途需求）。尽管如此，更为明确的方法仍有助于这些工具对建筑效率措施进行描绘。

微气候和气候变化

在能源系统模型中，微气候和城市热岛效应往往不在考虑范围内，但却给当地带来重大的影响。城市热岛效应会让城市的温度升高几摄氏度，从而影响建筑物的供冷和供热能源需求（Masson 等人，2014；Santamouris，2014）。因此，忽略模型中的城市热岛效应会导致对供冷需求的低估和对供热需求的高估。这将导致城市能源规划和建模工具产生不精确的结果，以及欠理想的规划决策。

在长期能源模型中，也需要考虑全球气候变化对当地能源系统的影响。全球气温上升造成的直接影响是对建筑物供冷需求的显著增加；例如，Ortiz 等人（2018）研究发现，到本世纪末，纽约市的夏季供冷需求将比 2006-2010 年高出近 30%。除了需求的变化以外，城市必须努力应对气候对城市经济增长、资源稀缺和人口变化的影响。

交通基础设施的变化

交通运输行业的技术变化可能对城市规划产生重大影响。例如，随着发展中国家越来越多的人使用电动交通工具，城市需要建设新的充电基础设施，而理想情况下最好由可再生能源提供电力。自动驾驶和汽车共享项目还可以与公共交通运输系统整合，以缓解交通拥堵，减少人们对私家车的需求，并相应地降低土地和燃料的使用率。未来交通运输网络也可通过传感器和无人机进行智能管理；这些系统将整合车辆和其他交通运输系统，从而改善交通拥堵情况，提高能源效率和安全性。

参考资料

- 100% Renewable Energy Atlas (2019a)**, “城、镇、村” (“City, town, village”) www.100-percent.org/city-town-village (accessed 3 December 2019).
- 100% Renewable Energy Atlas (2019b)**, “哥伦比亚 Las Gaviotas” (“Las Gaviotas, Colombia”), www.100-percent.org/las-gaviotas-colombia (updated 20 February 2019).
- 100% Renewables (2019)**, “100% 可再生能源地图” (“100% renewables map”), www.go100re.net/map (accessed September 2019).
- Aalborg University (2018)**, “EnergyPLAN — 所有案例研究” (“EnergyPLAN—all case studies”), Aalborg University, Aalborg, www.energyplan.eu/category/allcasestudies.
- Al Seadi, T. et al. (2008)**, *Biogas Handbook*, University of Southern Denmark Esbjerg, Esbjerg, Denmark, www.lemvigbiogas.com/BiogasHandbook.pdf.
- Al-Waeli, A.H.A. et al. (2017)**, “光伏/热 PV/T 系统：综述” (“Photovoltaic thermal PV/T systems: A review”), *International Journal of Computation and Applied Sciences*, Vol. 2/2, Sutton, Surrey, pp. 62–67.
- Bachmann, N. (2015)**, *Sustainable biogas production in municipal wastewater treatment plants*, International Energy Agency Bioenergy, Paris, www.iea-biogas.net/files/daten-redaktion/download/Technical%20Brochures/Wastewater_biogas_grey_web-1.pdf.
- Barbose, G. and D. Darghouth (2019)**, *Tracking the sun: Pricing and design trends for distributed photovoltaic systems in the United States*, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California, <https://emp.lbl.gov/publications/tracking-sun-pricing-and-design>.
- Bayer, P. et al. (2019)**, “城市的地热潜力” (“The geothermal potential of cities”), *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 106 (May), Elsevier, Amsterdam, pp. 17–30.
- Beaton, M.A. (2015)**, *Massachusetts clean energy and climate plan for 2020*, Executive Office of Energy and Environmental Affairs, State of Massachusetts, Boston, Massachusetts.
- Beck, H. et al. (2018)**, “分辨率为 1 公里的现在及未来 Köppen-Geiger 全球气候划分分布图” (“Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution”), *Scientific Data*, Vol. 5, Springer Nature, London.
- Bellini, E. (28 April 2020)**, “阿布扎比 1.5 GW 项目投标电价为 0.0135 美元/kWh，创下历史新低” (“Abu Dhabi’s 1.5 GW tender draws world record low solar bid of \$0.0135/kWh”), *pv magazine*, www.pv-magazine.com/2020/04/28/abu-dhabis-2-gw-tender-draws-world-record-solar-bid-of-0-0135-kwh.
- Bellos, E. et al. (2016)** “对采用各种集热器类型的太阳能吸收式制冷系统的活用、能效和财务评估” (“Exergetic, energetic and financial evaluation of a solar driven absorption cooling system with various collector types”), *Applied Thermal Engineering*, Vol. 102 (June), Elsevier, Amsterdam, pp. 749–759.
- Bhatt, V. et al. (2010)**, “实现低碳城市的综合能源和环境系统分析法” (“Integrated energy and environmental systems analysis methodology for achieving low carbon cities”), *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, Vol. 2/3, AIP Publishing, Melville, New York, p. 031012.
- Brandoni, C. and B. Bošnjaković (2017)**, “对撒哈拉以南非洲缺水城市地区的水资源和可再生能源关系的 HOMER 分析” (“HOMER analysis of the water and renewable energy nexus for water-stressed urban areas in Sub-Saharan Africa”), *Journal of Cleaner Production*, Vol. 155 (July), Elsevier, Amsterdam, pp. 105–118.
- Brookings (2020)**, *Foresight Africa: Top priorities for the continent 2020–2030*, Brookings Institution, Washington, D.C., www.brookings.edu/wp-content/uploads/2020/01/ForesightAfrica2020_20200110.pdf.

Brown, D., S. Hall and M.E.Davis (2019), “后补贴时代的生产性消费者：英国对新型生产性消费者商业模式的探索” (“Prosumers in the post subsidy era: an exploration of new prosumer business models in the UK”), *Energy Policy*, Vol. 135 (December), Elsevier, Amsterdam, p. 110984.

Buonomano, A. et al. (2016), “一种新型高温太阳能制冷系统的实验分析和动态仿真” (“Experimental analysis and dynamic simulation of a novel high-temperature solar cooling system”), *Energy Conversion and Management*, Vol. 109 (February), Elsevier, Amsterdam, pp. 19–39.

Burmester, D. et al. (2017), “纳米电网的拓扑和技术综述” (“A review of nanogrid topologies and technologies”), *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 67 (January), Elsevier, Amsterdam, pp. 760–775.

Byers, L. et al. (2019), *A global database of power plants* (database), World Resources Institute, Washington, D.C., www.wri.org/publication/global-power-plant-database.

C40 Cities (2019), “关于我们” (“About”), www.c40.org/about (accessed 23 October 2019).

C40 Cities (2011), Case study: Waste to energy cuts 200,000 tCO₂ annually in Gothenburg, C40 Cities, London, www.c40.org/case_studies/waste-to-energy-cuts-200000-tco2-annually-in-gothenburg.

Carbon Neutral Cities Alliance (2019), “碳中和城市联盟成员” (“Carbon Neutral Cities Alliance Members”), <https://carbonneutralcities.org> (accessed 23 October 2019).

carbonn Center (2019), “carbonn 中心” (“carbonn Center”), <https://carbonn.org> (accessed 23 October 2019).

Cayla, J.M. and N. Maïzi (2015), “将家庭行为和异质性纳入 TIMES-家庭模型” (“Integrating household behavior and heterogeneity into the TIMES-Households model”), *Applied Energy*, Vol. 139 (February), Elsevier, Amsterdam, pp. 56–67.

CDIA (2020), “CDIA 是什么” (“What is CDIA”), <https://cdia.asia/who-we-are/what-is-cdia> (accessed 31 March 2020).

CDP (2019a), “2018 年城市可再生能源目标” (“2018 – Cities Renewable Energy Targets”), <https://data.cdp.net/Renewable-Energy/2018-Cities-Renewable-Energy-Targets/eai5-mrwy> (accessed November 2019).

CDP (2019b), “探索区域、州和市能源数据，掌握它们在低碳经济方面的进展” (“Explore city, state and regional energy data and discover their progress towards low-carbon economies”), <https://data.cdp.net/browse?category=Renewable%20Energy> (accessed 12 March 2019).

Chaliki, P., N.J.Themelis and C.S.Psomopoulos (2016), “在欧洲城市建立的 WTE 工厂：成功案例回顾” (“WTE plants installed in European cities: A review of success stories”), *Management of Environmental Quality: An International Journal*, Vol. 27/5, Emerald Publishing, Melbourne, pp. 606–620.

Chang, Y. and Y. Li (2014), Non-renewable resources in Asian economies: Perspectives of availability, applicability, acceptability, and affordability, Economic Research Institute for ASEAN and East Asia, Jakarta.

Cilliers, J., B. Hughes and J. Moyer (2011), *African futures 2050: The next forty years*, Institute for Security Studies and Pardee Center for International Futures, Pretoria and Denver.

Climate Mayors (2018), *Cities climate action compendium*, US Climate Mayors, Washington, D.C.

Covenant of Mayors for Climate & Energy (2020), “我们的城市” (“Our cities”), www.globalcovenantofmayors.org/our-cities (accessed 20 January, 2020).

Covenant of Mayors for Climate & Energy (2019), “盟约社区” (“Covenant community”), www.covenantofmayors.eu/about/covenant-community/signatories.html (accessed 3 December 2019).

Crouch, D. (11 March 2019), “北欧人应对垃圾焚烧发电软肋的解决方案” (“Nordics tackle ‘Achilles heel’ of incineration power schemes”), *Financial Times*, www.ft.com/content/21777666-248f-11e9-b20d-5376ca5216eb.

Data Driven Yale, NewClimate Institute and PBL (2018), *Global climate action from cities, regions and businesses*, Data Driven Yale, NewClimate Institute, PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, https://datadrivenlab.org/wp-content/uploads/2018/08/YALE-NCI-PBL_Global_climate_action.pdf.

Davies, J.H. (2013), “地表大地热流的全球分布图” (“Global map of solid Earth surface heat flow”), *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, Vol. 14/10, Wiley, Hoboken, New Jersey, pp. 4 608–4 622.

del Amo, A. et al. (2017), “由光伏/热混合太阳能装置构成的创新城市能源系统：设计、模拟和监测” (“An innovative urban energy system constituted by a photovoltaic/thermal hybrid solar installation: Design, simulation and monitoring”), *Applied Energy*, Vol. 186, Elsevier, Amsterdam, pp. 140–151.

Dhakal, S. (2006), *Urban transportation and the environment in Kathmandu Valley, Nepal: Integrating global carbon concerns into local air pollution management*, Institute for Global Environmental Strategies, Kanagawa.

Dhimish, M. et al. (2018), “对英国太阳能资源的初步评估” (“Preliminary assessment of the solar resource in the United Kingdom”), *Clean Energy*, Vol. 2/2, Oxford University Press, Oxford, UK, pp. 112–125.

DIE (2020), *NDC Explorer* (database), German Development Institute, Bonn, www.die-gdi.de/en/ndc, (accessed March 2020).

Dilimulati, A., T. Stathopoulos and M. Paraschivoiu (2018), “适用于城市的风力涡轮机设计：涡轮扩压器带冠壳体的案例研究” (“Wind turbine designs for urban applications: A case study of shrouded diffuser casing for turbines”), *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, Vol. 175 (April), Elsevier, Amsterdam, pp. 179–192.

DNV GL (2019a), *Energy transition outlook 2019: A global and regional forecast to 2050*, DNV GL, Oslo, <https://eto.dnvgl.com/2019/index.html>.

DNV GL (2019b), *Digitalisation and the future of energy*, DNV GL, Oslo, www.dnvgl.com/power-renewables/themes/digitalization/index.html.

Dreyfus, G. et al. (2020), *Assessment of climate and development benefits of efficient and climate-friendly cooling*, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California, https://eta-publications.lbl.gov/sites/default/files/ilovepdf_merged_11.01.02_am.pdf.

Dulal, H.B. et al. (2013), “可再生能源在亚洲扩散：没有政府支持能实现吗？” (“Renewable energy diffusion in Asia: Can it happen without government support?”) *Energy Policy*, Vol. 59 (August), Elsevier, Amsterdam, pp. 301–311.

EASME (2019), “综述：建筑集成光伏 (BIPV) 作为可再生能源的可行选择” (“Overview: Building integrated photovoltaics (BIPV) as a viable option among renewables”), Executive Agency for Small and Medium-sized Enterprises, Brussels, www.buildup.eu/en/news/overview-building-integrated-photovoltaics-bipv-viable-option-among-renewables.

Ecoprog (2018), “转废为能市场持续蓬勃发展” (“Dynamic development of waste-to-energy market continues”), Ecoprog, Cologne, www.ecoprog.com/fileadmin/user_upload/pressemitteilungen/ecoprog_press_release_Waste_to_Energy_2017-2018.pdf.

Edenhofer, O. et al. (2014), “技术摘要” (“Technical summary”). In: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_technical-summary.pdf.

Edo, M. and I. Johansson (2018), “有关废弃物能源的国际观点 — 挑战和趋势” (“International perspectives of energy from waste—challenges and trends”), *IRRC Waste-to-Energy Conference*, Vienna, pp. 47–61.

EEA (2016), *Air pollutant emission inventory guidebook 2016*, European Environment Agency, Brussels, www.eea.europa.eu/themes/air/air-pollution-sources-1/emep-eea-air-pollutant-emission-inventory-guidebook/emep.

Energy Cities (2018), *Cities heading towards 100% renewable energy*, Energy Cities, Brussels, https://energy-cities.eu/wp-content/uploads/2018/11/publi_100percent_final-web_en.pdf.

- ESMAP (2012)**, Geothermal handbook: Planning and financing power generation, Energy Sector Management Assistance Program, World Bank, Washington, D.C., www.esmap.org/sites/esmap.org/files/DocumentLibrary/FINAL_Geothermal%20Handbook_TR002-12_Reduced.pdf.
- Estrada, F. et al. (2017)**, “对减少气候变化影响的城市政策的全球经济性评估” (“A global economic assessment of city policies to reduce climate change impacts”), *Nature Climate Change*, Vol. 7/6, Springer Nature, London, pp. 403–406.
- FERC (2008)**, *Assessment of demand response and advanced metering*, US Federal Energy Regulatory Commission, Washington, D.C.
- Forsberg, J. and A. Krook-Riekkola (2017)**, “对城市减排策略的支持：在 TIMES 能源系统建模框架中模拟城市交通” (“Supporting cities’ emission mitigation strategies: Modelling urban transport in a TIMES energy system modelling framework”), *WIT Transactions on the Built Environment, Urban Transport XXIII*, WIT Press, Southampton, UK, pp. 15–25.
- Friedman, D.S. et al. (2012)**, 碳税对环境和经济的影响：长岛市场模型的应用” (“Environmental and economic impacts of a carbon tax: An application of the Long Island market model”), *Middle States Geographer*, Vol. 44, Middle States Division of the Association of American Geographers, pp. 18–26.
- Fulzele, J.B. and S. Dutt (2012)**, “利用 HOMER 优化混合可再生能源系统规划” (“Optimum planning of hybrid renewable energy system using HOMER”), *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, Vol. 2/1, Institute of Advanced Engineering and Science, Yogyakarta, Indonesia, pp. 68–74.
- German Environment Agency (2008)**, *The role of waste incineration in Germany*, German Environment Agency, Dessau-Roßlau, www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3872.pdf.
- Gilmanova, A. and Y. Chen (24 February 2020)**, “从国际角度看待中国塑造全球 CSP 发展的未来” (“China shapes future of global CSP development: From an international perspective”), China Energy News (中国能源报), http://paper.people.com.cn/zgnyb/html/2020-02/24/content_1973108.htm (in Chinese).
- Giugliano, M. and E. Ranzi (2016)**, “废物的热处理。废物转制能源 (WtE)” (“Thermal treatments of waste.Waste to energy (WtE)”), *Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering*, Elsevier, Amsterdam.
- Glasgow City Council (2014)**, *Sustainable Glasgow*, Glasgow, www.smartcities-infosystem.eu/files/step-up_energy_and_carbon_masterplan_-_sustainable_glasgow.pdf.
- Global Volcanism Program (2020)**, *Volcanoes of the World* (database), Smithsonian Institution Global Volcanism Program, <https://doi.org/10.5479/si.GVP.VOTW4-2013> (accessed 27 February 2020).
- Global Wind Atlas (2019)**, “3.0 版全球风能资源密度分布图 (100 m 分辨率数据集)” (“Global Wind Atlas 3.0 map of wind power density at 100m dataset”), <https://globalwindatlas.info/downloads/gis-files> (accessed 14 December 2019).
- GlobalData (2019)**, “发电厂” (“Power plants”), <https://power.globaldata.com/PowerPlants/PowerPlantsGrid> (accessed October 2019).
- Grieser, B. et al. (2015)**, “城市中小型风力涡轮机的经济学：对德国的实证调查” (“Economics of small wind turbines in urban settings: An empirical investigation for Germany”), *Renewable Energy*, Vol. 78 (June), Elsevier, Amsterdam, pp. 334–350.
- Groissböck, M. (2019)**, “开源能源系统优化工具是否足够成熟，可以投入真正的使用？” (“Are open source energy system optimization tools mature enough for serious use?”), *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 102 (March), Elsevier, Amsterdam, pp. 234–248.
- Güneralp, B. et al. (2017)**, “有关 2050 年城市密度及其对建筑能源使用的影响的全球情景” (“Global scenarios of urban density and its impacts on building energy use through 2050”), *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 114/34, US National Academy of Sciences, Washington, D.C., pp. 8945–8950.
- Güneralp, B., I. Güneralp and Y. Liu (2015)**, “城市遭受洪水和干旱灾害的全球模式的改变” (“Changing global patterns of urban exposure to flood and drought hazards”), *Global Environmental Change*, Vol. 31 (March), Elsevier, Amsterdam, pp. 217–225.
- Hall, S. and K. Roelich (2016)**, “电力供应市场的商业模式创新：复杂价值在英国的作用” (“Business model innovation in electricity supply markets: The role of complex value in the United Kingdom”), *Energy Policy*, Vol. 92 (May), Elsevier, Amsterdam, pp. 286–298.

- Hemis, H. (2017)**, *Integrating energy in urban planning processes—insights from Amsterdam/Zaanstad, Berlin, Paris, Stockholm, Vienna, Warsaw and Zagreb*, Synthesis report of Work Package 4 “城市综合能源规划的创新治理解决方案” (“Innovative governance solutions for integrative urban energy planning”), Urban Learning, European Commission, Brussels, www.urbanlearning.eu/fileadmin/user_upload/documents/D4-2_Synthesis-report_upgraded_processes_final_170807.pdf.
- Henley, J. and A. Giuffrida (13 November 2019)**, “威尼斯遭遇 50 年来最高水位的洪水，造成两人死亡” (“Two people die as Venice floods at highest level in 50 years”), *The Guardian* (UK), www.theguardian.com/environment/2019/nov/13/waves-in-st-marks-square-as-venice-flooded-highest-tide-in-50-years.
- Hepburn, C. (2006)**, “按照价格和数量或两者进行调控：更新与回顾” (“Regulation by prices, quantities, or both: An update and review”), *Oxford Review of Economic Policy*, Vol. 22/2, Oxford University Press, Oxford, UK, pp. 226–247.
- Heyzer, N. (2014)**, “未来城市面临的六大挑战” (“Six challenges for the future of our cities”), World Economic Forum, www.weforum.org/agenda/2014/02/six-challenges-future-cities.
- Hoes, O. et al. (2017)**, “全球水电潜力的高分辨率系统评估” (“Systematic high-resolution assessment of global hydropower potential”), *PLOS ONE* (8 February), PLOS, San Francisco.
- Hoogwijk, M. and W. Graus (2008)**, *Global potential of renewable energy sources: A literature review*, REN21, Utrecht.
- Hopkins, A.S. et al. (2018)**, *Decarbonization of heating energy use in California buildings*, Synapse Energy Economics, Inc., Cambridge, Massachusetts, www.synapse-energy.com/sites/default/files/Decarbonization-Heating-CA-Buildings-17-092-1.pdf.
- Hossain, M.S. et al. (2016)**, “智能电网在可再生能源中的作用：概述” (“Role of smart grid in renewable energy: An overview”), *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 60 (July), Elsevier, Amsterdam, pp. 1168–1184.
- Hott, A. (31 May 2018)**, “能源是非洲工业化的引擎” (“Energy as an engine of Africa’s industrialization”), African Development Bank, <https://blogs.afdb.org/energy-engine-africas-industrialization>.
- Huang, R. et al. (2011)**, “具有太阳能光伏/风力涡轮机/储能的混合能源系统优化设计：案例研究” (“Optimal design of hybrid energy system with PV/wind turbine/storage: A case study”), *2011 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*, Brussels, pp. 511–516.
- Huide, F. et al. (2017)**, 建筑物三种太阳能利用技术的对比研究：光伏、太阳能和光伏光热混合系统” (“A comparative study on three types of solar utilization technologies for buildings: Photovoltaic, solar thermal and hybrid photovoltaic/thermal systems”), *Energy Conversion and Management*, Vol. 140 (May), Elsevier, Amsterdam, pp. 1–13.
- Huppmann, D. et al. (2019)**, “MESSAGEix 综合评估模型和 ix 建模平台 (ixmp)：一个对能源、气候、环境和可持续发展进行综合和交叉分析的开放式框架” (“The MESSAGEix Integrated Assessment Model and the ix modeling platform (ixmp): An open framework for integrated and cross-cutting analysis of energy, climate, the environment, and sustainable development”), *Environmental Modelling & Software*, Vol. 112 (February), Elsevier, Amsterdam, pp. 143–156.
- ICLEI (16 November 2016)**, “为什么城市要设定 100% 可再生能源目标？” (“Why are cities setting 100% renewable energy targets?”) CityTalk, ICLEI–Local Governments for Sustainability, <https://talkofthecities.iclei.org/why-are-cities-setting-100-renewable-energy-targets>.
- IDB (6 March 2020)**, “与拉丁美洲和加勒比城市携手共同促进城市可持续发展” (“Connecting Latin American and Caribbean cities for sustainable urban development”), Inter-American Development Bank, Washington, D.C., www.iadb.org/en/urban-development-and-housing/idb-cities-network.
- IEA (2018)**, *The future of cooling: Opportunities for energy-efficient air conditioning*, International Energy Agency, Paris.
- IEA (2008)**, *Particulate emissions from biomass combustion in IEA countries*, International Energy Agency, Paris.
- IEA Task 55 (2019)**, *Solar heat for cities: The sustainable solution for district heating*, International Energy Agency Task 55, International Energy Agency, Paris, <http://task55.iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/Solar-Heat-for-Cities--The-Sustainable-Solution-for-District-Heating.pdf>.

IIASA (2018), “印度河的 MESSAGE 流域模型” (“MESSAGE-basin Model applied to Indus”), International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, https://iiasa.ac.at/web/home/research/iswel/4_MESSAGE_Basin_Model_Applied_to_Indus_-_Adriano_Vinca_-_IIA.pdf.

Ikejema, E.C.X. et al. (2017), “撒哈拉以南非洲可再生能源项目的经验现实及可持续性管理的失败（第 1 部分，共 2 部分）” (“The empirical reality and sustainable management failures of renewable energy projects in Sub-Saharan Africa (part 1 of 2)”), *Renewable Energy*, Vol. 102 (March), Elsevier, Amsterdam, pp. 234–240.

IMF (2019), “人均国内生产总值和时价” (“GDP per capita, current prices”), International Monetary Fund, www.imf.org/external/datamapper/NGDPDPC@WE0/AUS/CAN/FRA/DEU/GBR/USA/JPN.

IPCC (2019), *IPCC special report on the ocean and cryosphere in a changing climate*, Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, www.ipcc.ch/srocc/chapter/summary-for-policymakers.

IRENA (forthcoming a), *Renewable energy solutions for cities of the future*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

IRENA (forthcoming b), *Technical guidelines for the development of bankable renewable energy heating and cooling projects*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

IRENA (forthcoming c), *Thermal energy storage in district heating and cooling*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

IRENA (2020a), *Renewable power generation costs in 2019*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

IRENA (2020b), *Global renewables outlook: Energy transformation 2050*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

IRENA (2020c), *Renewable energy capacity statistics 2020*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

IRENA (2019a), *Innovation landscape for a renewable-powered future: Solutions to integrate variable renewables*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

IRENA (2019b), *Innovation landscape brief: Smart charging for electric vehicles*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

IRENA (2019c), *Innovation landscape brief: Aggregators*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

IRENA (2019d), *Global energy transformation: A roadmap to 2050*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

IRENA (2019e), *Renewable energy statistics 2019*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

IRENA (2019f), *Solar simulators: Application to developing cities*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

IRENA (2019g), *Innovation landscape brief: Innovative ancillary services*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

IRENA (2018), *Bioenergy from Finnish forests: Sustainable, efficient and modern use of wood*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

IRENA (2016), *Renewable energy in cities*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

IRENA (2015a), *Renewable energy target setting*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

IRENA (2015b), *Africa 2030: Roadmap for a renewable energy future*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

IRENA (2015c), *Renewable energy zones for the African Clean Energy Corridor*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

IRENA (2015d), *Solar heat for industrial processes*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

IRENA and IEA-ETSAP (2015), *Technology brief: Solar heat for industrial processes*, International Renewable Energy Agency and International Energy Agency Energy Technology Systems Analysis Programme, Abu Dhabi and Paris.

IRENA, ICLEI and GIZ (2018), *Scaling up renewables in cities: Opportunities for municipal governments*, International Renewable Energy Agency, ICLEI-Local Governments for Sustainability and German Agency for International Cooperation (GIZ), Abu Dhabi.

ISWA (2015), *Bottom ash from WTE plants: Metal recovery and utilisation*, International Solid Waste Association, Rotterdam.

ISWA (2013), *Alternative waste conversion technologies*, International Solid Waste Association, Rotterdam.

Johnson, N. et al. (2017), “一种描绘风能和太阳能光伏部署对电力系统结构和运营影响的简约型方法” (“A reduced-form approach for representing the impacts of wind and solar PV deployment on the structure and operation of the electricity system”), *Energy Economics*, Vol. 64 (May), Elsevier, Amsterdam, pp. 651-664.

Johnson, N. et al. (2011), “利用 HOMER 模拟分布式客户端可再生能源整合” (“Modeling distributed premises-based renewables integration using HOMER”), *Grid-Interop 2011*, 5-8 December, Phoenix, Arizona.

Kadian, R. et al. (2007), “德里家用行业内能源相关排放和减排计划” (“Energy-related emissions and mitigation opportunities from the household sector in Delhi”), *Energy Policy*, Vol. 35/12, Elsevier, Amsterdam, pp. 6 195-6 211.

Kale, R.V. and S.D.Pohekar (2014), “印度马哈拉施特拉邦 2030 年电力需求和供应情景：长期能源替代计划的应用” (“Electricity demand and supply scenarios for Maharashtra (India) for 2030: An application of long-range energy alternatives planning”), *Energy Policy*, Vol. 72 (September), Elsevier, Amsterdam, pp. 1-13.

Keirstead, J. and N. Shad (eds.) (2013), “第二章：城市能源系统构思” (“Chapter 2: Conceptualizing urban energy systems”), in *Urban Energy Systems: An Integrated Approach*, Routledge, Abingdon-on-Thames.

Kumar, R. et al. (2018), “对垂直轴风力涡轮机在城市应用的一项关键性观察” (“A critical review of vertical axis wind turbines for urban applications”), *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 89 (June), Elsevier, Amsterdam, pp. 281-291.

Kumar, Y.V. and R. Bhimasingu (2014), “利用 HOMER 对印度南部某城市社区建筑微电网制定的最优容量规划” (“Optimal sizing of microgrid for an urban community building in south India using HOMER”), *2014 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, Mumbai, pp. 1-6.

Lazarus, M. et al. (2011), *Getting to zero: A pathway to a carbon neutral Seattle*, prepared for Project Team: Scenario for a Carbon Neutral Seattle, Seattle, Washington.

Lemondé, M. (28 May 2020), “小型厌氧消化的前景是什么？” (“What is the future of small-scale anaerobic digestion?”), BiogasWorld, www.biogasworld.com/news/future-small-scale-anaerobic-digestion.

Lim, X. (2017), “如何利用太阳的热量为我们制冷？” (“How heat from the Sun can keep us all cool”), *Nature*, 31 January, Springer Nature, London.

Limberger, J. et al. (2017), “深层含水层的地热能：对可直接热利用的资源基础的全球评估” (“Geothermal energy in deep aquifers: A global assessment of the resource base for direct heat utilization”), *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 82 (February), Elsevier, Amsterdam, pp. 961-975.

Lipman, T.E. et al. (2005), *An assessment of battery and hydrogen energy storage systems integrated with wind energy resources in California*, University of California at Berkeley, Berkeley, California.

Liu, S. et al. (2013), “并网微电网中太阳能-风能混合分布式发电容量的优化配置” (“Optimal configuration of hybrid solar-wind distributed generation capacity in a grid-connected microgrid”), *2013 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*, Washington, D.C.

Lund, J. and A. Toth (2020), “对地热能直接利用的 2020 年全球综述” (“Direct utilization of geothermal energy 2020 worldwide review”), *Proceedings World Geothermal Congress 2020*, Reykjavik, Iceland, 26 April-2 May, www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2020/01018.pdf.

Lund, J.W. (2016), “地热能利用” (“Geothermal energy utilization”), in Kaltschmitt, M. et al.(eds.), *Renewable Energy Systems*, Springer, New York, New York.

Mann, D. et al. (2015), *Taking the LEAP in Uganda: Reflections on developing urban energy baseline and futures models for Kasese and Jinja municipalities*, SAMSET, Uganda.

Marsden, G. and P. Bonsall (2006), “交通政策的绩效目标” (“Performance targets in transport policy”), *Transport Policy*, Vol. 13/3, Elsevier, Amsterdam, pp. 191-203.

- Martinez, H., K. DeFrancia and A. Schroder (2018)**, Moving towards 100% renewable energy: Drivers behind city policies and pledges, 76th Annual Midwest Political Science Association Conference, Chicago.
- Masdar Institute and IRENA (2015)**, Renewable energy prospects: United Arab Emirates, REmap 2030 analysis, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- Masson, V. et al. (2014)**, “使城市适应气候变化：一种系统建模的方法” (“Adapting cities to climate change: A systemic modelling approach”), *Urban Climate*, Vol. 10 (December), Elsevier, Amsterdam, pp. 407-429.
- Mathiesen, B.V. and K. Hansen (2017)**, The role of solar thermal in future energy systems: Country cases for Germany, Italy, Austria and Denmark, Aalborg University, Aalborg.
- Maturi, L. and J. Admi (2018)**, *Building Integrated Photovoltaic (BIPV) in Trentino Alto Adige*, Springer International Publishing, Switzerland.
- Maurer, C. et al. (2017)**, “建筑一体化太阳能热能的进展” (“Progress in building-integrated solar thermal systems”), *Solar Energy*, Vol. 154 (September), Elsevier, Amsterdam, pp. 158-186.
- Mavropoulos, A. et al. (2012)**, Globalization and waste management. *Phase 1: Concepts and facts*, International Solid Waste Association, Vienna.
- Mikus, M., K. Dzedzic and M. Jurczyk (2016)**, “城市垃圾发电厂内的烟气净化” (“Flue gas cleaning in municipal waste-to-energy plants”), *Infrastructure and Ecology of Rural Areas* (October), Index Copernicus, Warsaw, pp. 1179-1193.
- Milios, L. (2013)**, *Municipal waste management in Sweden*, Paper for the European Environment Agency, Brussels.
- Mirakyan, A. and R. De Guio (2015)**, “第二章：城市和地区能源基础设施规划、基础设施规划方法的质量因素” (“Chapter 2: Energy infrastructure planning in cities and territories, quality factors of methods for infrastructure planning”), in *Three Domain Modelling and Uncertainty Analysis, Energy Systems*, Springer International Publishing, Switzerland.
- MIT (2015)**, *The future of solar energy*, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, <http://energy.mit.edu/wp-content/uploads/2015/05/MITEI-The-Future-of-Solar-Energy.pdf>.
- Mohajeri, N. et al. (2016)**, “城市紧凑性对太阳能潜力的影响” (“Effects of urban compactness on solar energy potential”), *Renewable Energy*, Vol. 93 (August), Elsevier, Amsterdam, pp. 469-482.
- Moya, D., C. Aldas and P. Kaparaju (2018)**, “地热能：发电厂技术和热能的直接应用” (“Geothermal energy: Power plant technology and direct heat applications”), *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 94 (October), Elsevier, Amsterdam, pp. 889-901.
- Nagao, T. and S. Uyeda (1995)**, “涵盖火山热能的东南亚热流的分布” (“Heat-flow distribution in Southeast Asia with consideration of volcanic heat”), *Tectonophysics*, Vol. 251/1-4, Elsevier, Amsterdam, pp. 153-159.
- Nagy, Z. et al. (2016)**, “自适应太阳能外墙：从概念到原型” (“The adaptive solar facade: From concept to prototypes”), *Frontiers of Architectural Research*, Vol. 5/2, Elsevier, Amsterdam, pp. 143-156.
- NASA (2019)**, “全球温度” (“Global temperature”), US National Aeronautics and Space Administration, <https://climate.nasa.gov/vital-signs/global-temperature>.
- Nastasi, B. and U. Di Matteo (2016)**, “意大利大型城市可持续能源行动计划中的太阳能技术” (“Solar energy technologies in Sustainable Energy Action Plans of Italian big cities”), *Energy Procedia*, Vol. 101 (November), Elsevier, Amsterdam, pp. 1064-1071.
- NC State University (2018)**, *Energy storage options for North Carolina*, North Carolina State University, Raleigh, North Carolina, <https://energy.ncsu.edu/storage/wp-content/uploads/sites/2/2019/02/NC-Storage-Study-FINAL.pdf>.
- Nuorkivi, A.E. and A-M. Ahonen (2013)**, “拥有可再生能源技能的城市规划者” (“Urban planners with renewable energy skills”), *TeMA - Journal of Land Use, Mobility and Environment*, Vol. 6/2, University of Naples, Naples, pp. 159-170.
- Nussbaumer, T. (2010)**, *Overview on technologies for biomass combustion and emission levels of particulate matter*, prepared for Swiss Federal Office for the Environment, Geneva, <https://pdfs.semanticscholar.org/4f8a/bc2e42c41d1a2be4c18f68af8972ff404712.pdf>.
- OECD (2009)**, *Competitive cities and climate change*, Kamal-Chaoui, L., Robert, A. (eds.), Regional Development Working Papers No. 2, Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris, www.oecd.org/cfe/regional-policy/44232251.pdf.

Okereke, O.C. (2017), “非洲项目和项目交付成果失败和放弃的原因” (“Causes of failure and abandonment of projects and project deliverables in Africa”), *PM World Journal*, Vol. 6/1, PM World, Addison, Texas.

Óskarsdóttir, M.Ó. (2014), *A general description and comparison of horizontal axis wind turbines and vertical axis wind turbines*, MSc Thesis, School of Engineering and Natural Sciences, Faculty of Industrial Engineering, Mechanical Engineering and Computer Science, Reykjavik, Iceland.

Pauschinger, T. (2016), “用于区域供暖的太阳能热能” (“Solar thermal energy for district heating”), in Wiltshire, R. (ed.), *Advanced District Heating and Cooling (DHC) Systems*, Woodhead Publishing Series in Energy, Elsevier, Amsterdam, pp. 99-120, www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781782423744000057.

Peng, B. et al. (2015), “城市客运节能减排的潜力：以中国天津为例” (“Urban passenger transport energy saving and emission reduction potential: A case study for Tianjin, China”), *Energy Conversion and Management*, Vol. 102 (September), Elsevier, Amsterdam, pp. 4-16.

Phurailatpam, C. et al. (2018), “印度农村和城市独立直流微电网的规划和优化” (“Planning and optimization of autonomous DC microgrids for rural and urban applications in India”), *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 82 (February), Elsevier, Amsterdam, pp. 194-204.

Porteous, A. (2005), “为什么废物焚烧产生的能源是环保型废物管理的重要组成部分” (“Why energy from waste incineration is an essential component of environmentally responsible waste management”), *Waste Management*, Vol. 25/4, Elsevier, Amsterdam, pp. 451-459.

Publicover, B. (27 January 2020), “太阳能在中东和北非地区越来越受欢迎，但仍面临许多障碍” (“Solar is gaining traction in MENA region—but plenty of obstacles remain”), *pv magazine*, www.pv-magazine.com/2020/01/17/mesa-outlines-past-progress-future-promise-in-sweeping-look-at-solar-across-middle-east-and-north-africa.

Ramos, A. et al. (2017), “用于城市环境中供热、供冷和供电的太阳能光伏光热混合系统” (“Hybrid photovoltaic-thermal solar systems for combined heating, cooling and power provision in the urban environment”), *Energy Conversion and Management*, Vol. 150 (October), Elsevier, Amsterdam, pp. 838-850.

Reckien, D. et al. (2018), “城市如何规划以应对气候变化？对欧盟 28 个成员国 885 个城市的地方气候计划进行的评估” (“How are cities planning to respond to climate change? Assessment of local climate plans from the 885 cities in the EU-28”), *Journal of Cleaner Production*, Vol. 191 (August), Elsevier, Amsterdam, pp. 207-219.

REN21 (2019a), *Renewables 2019 global status report*, Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, Paris.

REN21 (2019b), *Asia and the Pacific renewable energy status report*, Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, Paris.

REN21, ISEP and ICLEI (2012), *Global status report on local renewable energy policies*, Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, Institute for Sustainable Energy Policies and ICLEI-Local Governments for Sustainability, www.ren21.net/Portals/0/documents/Resources/REN21_Local_Renewables_Policies_2011.pdf.

Reynolds, J. et al. (2017), “从建筑到地区的能源控制升级：目前的限制和未来的展望” (“Upscaling energy control from building to districts: Current limitations and future perspectives”), *Sustainable Cities and Society*, Vol. 35 (November), Elsevier, Amsterdam, pp. 816-829.

Rickwood P., G. Glazebrook and G. Searle (2008), “对城市结构和能源的综述” (“Urban structure and energy—a review”), *Urban Policy Research*, Vol. 26/1, Taylor & Francis, London, pp. 57-81.

Rodrigues da Costa, M. et al. (2011), *Regulation for smart grids*, Eurelectric, Brussels.

Rogoff, M.J. and F. Screve (2019), *Waste-to-Energy: Technologies and Project Implementation* (3rd edition), Elsevier, Amsterdam.

Rosas-Flores, J.A. et al. (2016), “墨西哥城市和农村家庭使用太阳能热水器和使用地理信息系统可能节省的能源” (“Potential energy saving in urban and rural households of Mexico by use of solar water heaters, using geographical information system”), *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 53 (January), Elsevier, Amsterdam, pp. 243-252.

S&P Global Platts (2018), *UDI World Electric Power Plants Database (WEPP)* (database), Platts, Washington, D.C.

- Sadhishkumar, S. and T. Balusamy (2014)**, “对太阳能热水系统性能提升的综述” (“Performance improvement in solar water heating systems—a review”), *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 37 (September), Elsevier, Amsterdam, pp. 191–198.
- Saeidi, D. et al. (2013)**, “特殊应用场合的小型垂直轴风力涡轮机的气动设计与经济性评价” (“Aerodynamic design and economical evaluation of site specific small vertical axis wind turbines”), *Applied Energy*, Vol. 101 (January), Elsevier, Amsterdam, pp. 765–775.
- Saheb, Y. et al. (2014)**, *Guidebook: How to develop a Sustainable Energy Action Plan (SEAP) in South Mediterranean Cities*, Science and policy report of the European Union Joint Research Centre, Brussels, <https://e3p.jrc.ec.europa.eu/publications/guidebook-how-develop-sustainable-energy-action-plan-seap-south-mediterranean-cities>.
- Salata, F. et al. (2015)**, “城市规模三联供和远程供热系统的能源优化方法：案例研究” (“Method for energy optimization with reliability analysis of a trigeneration and teleheating system on urban scale: A case study”), *Energy and Buildings*, Vol. 86 (January), Elsevier, Amsterdam, pp. 118–136.
- Santamouris, S. (2014)**, “城市热岛效应和全球变暖对建筑的能源影响” (“On the energy impact of urban heat island and global warming on buildings”), *Energy and Buildings*, Vol. 82 (October), pp. 100–113.
- Scanner, B. (2017)**, “地源热泵的历史、发展、现状和未来展望” (“Ground source heat pumps—history, development, current status, and future prospects”) 12th IEA Heat Pump Conference 2017, Rotterdam, <http://hpc2017.org/wp-content/uploads/2017/05/K.2.9.1-Ground-Source-Heat-Pumps-history-development-current-status-and-future-prospects.pdf>.
- Scanner, B. (2005)**, “浅层地热系统” (“Shallow geothermal systems”), <https://geothermalcommunities.eu/assets/elearning/6.11.Shallow%20Geothermal%20Systems.pdf>.
- Scarlat, N. et al. (2015)**, “对非洲城市地区城市固体废物的能源潜力的评估” (“Evaluation of energy potential of municipal solid waste from African urban areas”), *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 50 (October), Elsevier, Amsterdam, pp. 1269–1286.
- SDH (2019)**, “太阳能区域供暖，获欧盟“地平线2020”研究及创新计划资助，项目编号 691624” (“Solar District Heating. The European Union’s Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 691624”), www.solar-district-heating.eu/en/about-sdh.
- SEI (2019)**, “LEAP”, Stockholm Environment Institute, <https://leap.sei.org> (accessed 6 March 2019).
- Sierra Club (2019)**, “州、县、郡的 100% 承诺” (“100% commitments in cities, counties, & states”), www.sierraclub.org/ready-for-100/commitments (accessed 12 February 2019).
- Sierra Club (2017)**, *Ready for 100%—2017 case study report*, www.sierraclub.org/files/blog/RF100-Case-Studies-Report-2017.pdf.
- Silva, S. et al. (2018)**, “葡萄牙城市及农村地区住宅用电需求弹性” (“Electricity residential demand elasticities: Urban versus rural areas in Portugal”), *Energy*, Vol. 144 (February), Elsevier, Amsterdam, pp. 627–632.
- Simoës, T. and A. Estanquero (2016)**, “一种新的城市风能资源评估方法” (“A new methodology for urban wind resource assessment”), *Renewable Energy*, Vol. 89 (April), Elsevier, Amsterdam, pp. 598–605.
- Sioshansi, F. (2019)**, *Consumer, prosumer, prosumer: How service innovations will disrupt the utility business model*, Academic Press, Cambridge, Massachusetts.
- Skalik, L. and I. Skalikova (2019)**, “在丹麦和瑞典进行长期的总辐射测量” (“Long-term global radiation measurements in Denmark and Sweden”), *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 471/10, IOP, Bristol.
- Smart City Sweden (2020a)**, “Dåva 热电联产电厂” (“Dåva cogeneration plants”), <https://smartcitysweden.com/best-practice/216/dava-cogeneration-plants> (accessed 20 May 2020).
- Smart City Sweden (2020b)**, “哥德堡智能区域供冷” (“Gothenburg smart district cooling”), <https://smartcitysweden.com/best-practice/386/gothenburg-smart-district-cooling> (accessed 20 May 2020).
- Stathopoulos, T. et al. (2018)**, “城市风能：关于潜力和挑战的一些看法” (“Urban wind energy: Some views on potential and challenges”), *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, Vol. 179 (August), Elsevier, Amsterdam, pp. 146–157.
- Stegner, C. et al. (2016)**, “智能计量与高时间分辨率的第一年 — 安装了太阳能电池的家庭的实际自足率” (“First year of smart metering with a high time resolution—realistic self-sufficiency rates for households with solar batteries”), *Energy Procedia*, Vol. 99 (November), Elsevier, Amsterdam, pp. 360–369.

