

张家口

能源转型战略 2050

通往低碳未来之路



© IRENA 2019

除非另有说明，本出版物中的材料可以自由使用、共享、复制、印刷和/或存储，前提是需恰当确认国际可再生能源署 (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。

国际标准图书编号 (ISBN): 978-92-9260-322-9

引用: 张家口能源转型战略 2050 : 通往低碳未来之路

下载地址: www.irena.org/publications

本文件为“Zhangjiakou Energy Transformation Strategy 2050: Pathway to a low-carbon future” ISBN: 978-92-9260-157-7 (2019)。如中文译本与英文原版的内容不一致，概以英文版为准。

要获取更多相关信息或提供反馈: info@irena.org

关于 IRENA

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

关于 CNREC

中国国家可再生能源中心 (CNREC) 是协助中国能源部门进行可再生能源政策研究、产业管理与协调的国家机构。CNREC 研究可再生能源的发展战略、规划、政策和法规；协调、规范和实施产业标准；跟踪可再生能源产业和技术的发展趋势；推动建立和完善可再生能源技术、产品测试和认证系统；实施、监测和评估国家试点项目；以及管理和协调国际和区域合作。CNREC 的任务是进行全面的政策、战略和规划研究以支持国家和地方政府决策，并为可再生能源行业提供服务。

www.cnrec.org.cn

IKI 支持

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

免责声明

本文件所使用的名称和材料的表述均按“原样”提供，仅供参考之用。IRENA 的官员、代理人均不提供任何明示或暗示的条件、担保或承诺，包括但不限于对此类内容的准确性、完整性和对于特定目的或用途的适用性的担保。

本文件所含信息不一定代表 IRENA 所有成员的观点，也不代表对任何项目、产品或服务提供商的认可。本文件所使用的名称和材料的表述并不表示 IRENA 对任何地区、国家、领土、城市、区域或其当局的法律地位，或边界及边界的划定的任何意见。

除非另有说明，否则照片均来自张家口市或 Shutterstock。

目录

图片	4
表格和文本框	5
缩写	6
致谢	7
执行摘要	8
1 简介	13
1.1 城市概况	13
1.2 国家和地区背景	18
1.3 研究目的	20
1.4 方法	21
2 张家口市能源系统	23
2.1 能源消费	23
2.2 能源供应：发电和供热	29
2.3 张家口本地和冀北区域电网	36
2.4 2022 年低碳冬奥会	37
2.5 可再生能源目标及推广计划	38
2.6 改善能源系统性能的主要短期行动	39
3 到 2050 年打造低碳张家的战略路径	41
3.1 低碳城市：全球和国家视角	41
3.2 能源前景：分析见解和讨论	44
3.3 关键技术方案	56
3.4 城市能源系统战略规划的重要性	60
3.5 政策创新和全新商业模式的作用	62
4 展望未来	64
4.1 能源规划	65
4.2 通过氢气使可再生能源的终端用途多样化	66
4.3 加强机构能力	67
4.4 与国际社会接轨	67
5 结论	69
参考文献	71

图片

图 1 张家口市地理位置.....	13	图 17 张家口各地区可再生能源开发.....	34
图 2 张家口市行政区划和人口分布.....	16	图 18 张家口市可再生能源目标.....	38
图 3 各县区的人口密度和 GDP 密度.....	17	图 19 2050 年全球能源相关碳减排量：当前规划 vs. 能源转型.....	42
图 4 2010-2017 年张家口市区城乡人口.....	17	图 20 基于 EnergyPLAN 模型的情景概述.....	44
图 5 2011 年 1 月至 2018 年 7 月每日温度.....	18	图 21 2017 年张家口市用电量参考.....	45
图 6 2017 年温度.....	19	图 22 2017 年供热度日数和平均温度.....	46
图 7 用于系统转型的 EnergyPLAN 模型.....	22	图 23 2022 年可再生能源发电量.....	48
图 8 2008-2017 年一次能源消费总量和用电量.....	24	图 24 2035 年可再生能源发电量：正常情景.....	49
图 9 2008-2017 年部门最终能源消费量.....	24	图 25 2035 年可再生能源发电量：电气化情景.....	50
图 10 2008-2015 年按能源来源/载体分类的 住宅部门最终能源消费量.....	26	图 26 2035 年可再生能源发电量：氢能情景.....	51
图 11 2008-2015 年各部门用电量.....	26	图 27 2050 年可再生能源发电量：电气化情景.....	52
图 12 2017 年室内供热需求（基于建筑面积）.....	27	图 28 2050 年可再生能源发电量：氢能情景.....	53
图 13 2013-2017 年张家口市煤炭产量.....	30	图 29 不同可再生能源情景的成本影响.....	54
图 14 以直接辐射 (DNI) 衡量的太阳能资源潜力 (kWh/m ² /年).....	31	图 30 2035 年至 2050 年累计装机容量： 张家口市的不同情景.....	55
图 15 以 Weibull A (m/s) 和 Weibull K 衡量 的风能资源潜力.....	31	图 31 能源转型的技术方案：张家口市的 不同情景.....	56
图 16 张家口市风能和太阳能发电装机容量.....	33		

表格

表 1	2016 年张家口十大工业能源消费企业.....	25
表 2	不同县区的供热供应商	28
表 3	太阳能和风能资源潜力	32
表 4	冀北地区和张家口市电网.....	36
表 5	废物回收利用的能源潜力.....	40
表 6	2017 年张家口市电力需求.....	45
表 7	2017 年家庭装置和集中供热网络的热能需求	46
表 8	2017 年张家口已安装系统的实际电力产出 vs.模拟总供电量	47

文本框

文本框 1	京津冀地区协同发展.....	20
文本框 2	100% 可再生能源：以瑞典马尔默为例.....	43
文本框 3	日本和欧洲的氢气使用.....	58
文本框 4	智能充电的发展现状和前景	59

缩写

oC	摄氏度	kW	千瓦
AC	交流电	kWh	千瓦时
BEV	电池电动车	LPG	液化石油气
BTM	电表后端	m	米
CHP	热电联产	m²	平方米
CNREC	国家可再生能源中心	m³	立方米
CO₂	二氧化碳	MW	兆瓦
COP	性能系数	MWh	兆瓦时
CSP	聚光太阳能热发电	MSW	城市固体垃圾
DC	直流电	NDRC	国家发改委
DNI	直接辐射	PV	光伏
EV	电动车	R&D	研发
FCEV	氢燃料电池电动车	SGCC	中国国家电网公司
gce	克煤当量	tce	吨煤当量
GDP	国内生产总值	TFEC	最终能耗总量
GIS	地理信息系统	TPEC	一次能耗总量
GW	吉瓦	TWh	太瓦时
GWh	千兆瓦时	UK	英国
HVDC	高压直流输电	UN DESA	联合国经济和社会事务部
ICE	内燃发动机	US	美国
IRENA	国际可再生能源署	USD	美元
kg	千克	V	伏
kgce	千克标准煤	V1G	单向充电
km	公里	V2G	车辆到电网
km²	平方公里	V2H/B	车辆到住宅、建筑
kV	千伏	VRE	波动性可再生能源
kVA	千伏安		

致谢

国际可再生能源署、中国国家可再生能源中心 (CNREC) 和张家口市人民政府向能源专家、政府官员、行业代表和利益相关方在筹备本合著出版物中所做的宝贵贡献表示由衷的感谢。其中包括 IRENA 2019 年 3 月 14 日张家口多方利益相关方磋商研讨会的所有与会者；2018 年 10 月 22 日北京专家组会议的所有与会者；以及整个项目期间三个实地研究的所有参与者。

本报告汲取了技术审核专家有见地的评论、建设性的提议和宝贵的意见，这些见解对报告的改进起到了极大的作用。其中包括：赵勇强和胡润青（国家发改委能源研究所）、杜广平（北京鉴衡认证）、祁和生（中国可再生能源学会）、奚巍民和朱婵霞（中国国家电网公司城市能源研究院）、Alina Gilmanova（中国科学院）以及 Michael Renner、Ricardo Gorini、Francisco Boshell、Alina Eprimian、Luca Angelino、Abdulmalik Oricha Ali、Enzia Schnyder 和 Fabia Miorelli (IRENA)。Paul Komor、Neil MacDonald 和 Elizabeth Press 也为本报告提供了宝贵意见和反馈。本报告的编辑是 Lisa Mastny。

撰稿人：

本报告在 Dolf Gielen (IRENA) 和王仲颖（国家发改委能源研究所）的指导下，由陈勇和 Julien Marquant (IRENA) 撰写，郭俊峰、刘峰（张家口市人民政府）及陈雷杰（顾问）为本报告提供了额外的贡献和支持。

此外，IRENA 还要感谢德国的 IKI 项目对本出版物的支持。



执行摘要



张家口市是一座中等城市，人口约为 440 万人，位于中国河北省西北部，与北京毗邻。该城市凭借其丰富的可再生能源资源和优越的滑雪条件，被选为北京 2022 年低碳冬奥会的承办城市。这是一次绝佳机会，张家口可借此充分展示过去几年间其可再生能源产业的蓬勃发展。

从长远来看，中国国务院已批准张家口为中国首个国家级可再生能源示范区。这为该市开发丰富的可再生能源资源以满足本地能源需求提供了政治和政策支持。更深远来看，值此机会，张家口能够成为先进的、创新的可再生能源技术应用试验台，也为电力部门改革提供了机会，有利于在全国范围内扩大可再生能源发电和使用规模。

从制度上讲，国家发改委 (NDRC) 副主任、河北省副省长、国家能源局副局长共同领导成立了示范区发展督导委员会。从而保证了在地方政府提出的旨在扩大示范区内可再生能源规模的创新政策和法规方面进行跨部门的有效协调。

张家口在设计创新政策时可以利用的另一优势是，与中国科学院达成的、旨在促进城市可再生能源的规模化发展的长期合作关系，这可以刺激新技术和新应用的开发和部署。

此外，政策创新和市场创新在为发展和应用先进技术及系统创造健康的生态系统方面，可以发挥重要作用。同时，也在创造实现高比例可再生能源的新型商业模式，以及促进张家口在 2050 年前建成低碳城市方面，发挥着重要作用。同时，张家口市取得的经验和教训可以并且应该在全国范围内进行分享，这是赋予国家可再生能源示范区的一项重要任务。



这对中国而言具有重大意义，因为预计到 2050 年，中国城市人口将会增加 2.55 亿人，中国目前正在寻求一种可持续的发展动力，来推动未来三十年中持续的城市化进程。中国如今选择如何为城市供电将对未来的能源和环境可持续发展产生深远影响。

在此背景下，许多中国城市迫切需要一种新的模式，使其能源系统能够摆脱煤炭的束缚，并利用可再生能源技术和其他使能技术，如电动车、制氢及应用，电池储能系统和智能电网等。鉴于全国范围内推动能源转型的力度不断增强，该项研究有望推动中国城市战略能源发展规划的浪潮。

张家口有丰富的可再生能源资源，其中太阳能光伏技术潜能为 30 吉瓦 (GW)，风能发电技术潜能为 40 GW，生物质能和地热能潜力巨大，抽水蓄能电站地质条件也相当优越。

过去的十年中，张家口加大了可再生能源系统的部署力度。2017 年，可再生能源占张家口总装机容量的 73%，约占总发电量的 45%。然而，尚有大量可再生能源潜力未得到开发。从未来能源需求来看，张家口产业结构战略的形成和实施、部分终端用能部门的电气化、能源效率的提高以及地方和区域电网的提升和扩展等方面仍存在不确定性。总体而言，增加本地可再生能源的使用，需要更多地应用与可再生能源发电相协同的创新终端用能技术。

本研究表明，作为该市迈向新一代产业发展的变革性举措，张家口已经积极采取措施升级当前产业部门，因此，城市能源系统规划必须与产业部门发展进行战略性协调，以确保可再生能源尽可能满足新的能源需求。

例如，随着宣钢公司计划停产或由高炉向电弧炉升级改造，工业能源需求将大大降低。同样，随着张家口部分县建立大数据中心，用电量分布也将发生变化。

根据该市的大数据发展规划，未来几年内张北县数百万台服务器的投入使用将增加约 14 太瓦时 (TWh) 的年用电量，为目前用电水平的两倍。随着物联网、云计算和大数据等先进信息技术的发展，该类技术的生产行业用电量也将持续快速增长，预计 2020-2030 年间的年用电量增长将超过 20 TWh。

同时，可再生能源制氢的电力需求也将增加。此外，智能制造将替代传统的生产设施，带来更好的能源和环境绩效。对于包括电和热在内的能源生产，生产应尽可能接近负荷，以减少传输损耗。在这方面，分布式发电可能极具优势。张家口可通过颇具前瞻性的战略规划为企业提供独特的机会，帮助企业扩大可再生能源使用规模，减少对环境的影响。

本报告中的 EnergyPLAN 模型分析，按照发电装机容量以及对整体和不同部门能源供应的贡献而言，

电力和氢气是扩大本地 可再生能源资源使用规模的主要能源载体

研究了本地可再生能源的利用程度。电力和氢气已被确定为扩大本地可再生能源使用规模的两个主要能源载体。基于对终端用能部门电气化程度提高的预期，电力显然在任何情景下都是重要的能源载体。但是，如果电力主要由波动性可再生能源 (VRE) 产生，那么使能技术（尤其是储能技术）将会是关键的决定性因素。区域电力交换也被认为是一个重要因素，但将在另一项研究中进行讨论，此处不再赘述。此外，由于预计功率密度和电力储能规模都不会出现革命性的技术突破，氢气在未来能源版图占据重要位置。

本研究已确定相关关键领域，一旦具体行动设计得当并有效实施，便可以促进张家口当前能源系统沿着指定的战略路径转型。

制定长期能源系统规划

长期能源规划是能源部门以及国家和市级能源政策制定过程的重要组成部分。长期能源规划以满足总体政策目标的能源组合量化情景和目标为特点，有助于建立稳定和可预测的投资环境，并为投资指导建议提供框架。长期能源情景背后的城市能源系统建模可充分考虑这些因素，对城市进行系统的战略性政策评估。

考虑到风能、太阳能等可再生能源独特的地区性和生产模式，在应用能源系统规划工具或模型时，城市环境还需要适当水平的的时间粒度和空间分界。

采用基于 GIS 的空间规划工具和方法

基于地理信息系统 (GIS) 能源规划工具可以帮助优化可再生能源的发电、分布和分配，同时满足能源需求和城市发展。必须从空间和时间上进行权衡评估。城市模型的开发，包括基于 GIS 数据的不同层级，可以为城市规划部门提供全方位的视觉量化，以促进能源转型的实现。

通过将地理信息系统与先进的统计软件相结合，可以进一步加强其分析能力，允许其对能源需求模式进行深入分析和预测，特别是对于张家口的情况，要求采用更为先进的方法，实现对于能源系统（包括高比例的波动性可再生能源 (VRE)）的最佳控制。

发展更强劲、更灵活的区域电力交换电网将有助于更好地理解可再生能源发电及消耗的区域平衡。整体电网系统不同部分的灵活性将提供敏锐的洞察力，以了解在不采取电网增强措施的情况下，哪些区域可以容纳多少波动性可再生能源，而不会破坏电网的稳定性和可靠性。再者，对区域电网稳定性的认识也值得单独研究。

通过氢气使可再生能源的终端用途多样化

为了增加电网的灵活性，以消纳更高比例的可再生能源，终端部门需要更多地参与电网运营。终端部门的电气化是一种公认的有效方法，能够让电网运营商在电力需求方面拥有更多参与者，以维护电网的稳定。此外，可再生能源制氢也已被视为一种有效的解决方案，以增加电力系统需求侧的灵活性，这是因为波动性可再生能源可以通过电解槽转化为能源载体，在需要时使用。

加强机构能力

加强本地能源规划对于可再生能源的长期发展至关重要。然而，这样的城市能源规划往往是由一家签约公司制定的，该公司可能会使用无法转让的专利工具或方法。这可能会导致制定的规划不能更新，因为该规划依赖于外部的支持。一个城市的能源系统应当由规划使用者来规划，应该培养他们掌握制定规划的能力，或至少应弄清规划的过程，从而在必要时对规划进行独立的和及时的更新。通过应用城市能源系统规划中的建模结果，可以加强政府机构的情景开发能力。然而，要做到这一点，制定张家口能源系统规划的机构能力与人的能力是同样重要的。

建立先进的可再生能源系统示范和培训基地

鉴于张家口已被批准建立国家级可再生能源示范区，拥有一个配备先进可再生能源系统的强大示范和培训基地是非常重要的，它能够使该市承担起其作为示范区的重要责任，推动中国其他地方城市扩大可再生能源的使用规模。

此类示范和培训基地可以从现有的类似机构中，例如从拥有太阳能、风能以及储能综合能源系统的中国国家电网培训中心汲取经验。也可以通过与在张家口开发的实际项目业主或开发商签订合作协议，从这些可再生能源项目中汲取经验。此外，该示范和培训基地还可以作为张家口与世界其他地区进行知识交流、技术合作、培训其他发展中国家相关部门以及技术创新合作的平台。

与国际社会接轨

城市正意识到需要通过能源转型来应对气候变化。但他们并不是单打独干。促进城市实现低碳未来需要许多积极的合作伙伴，除了国际环境理事会、C40 和全球市长公约等国际性社会团体，还有联合国人居署举办的世界城市日、国际环境资源研究大会和亚洲开发银行建立的亚洲清洁能源论坛等全球和区域性平台。

与这些合作伙伴交流知识、分享经验教训，张家口将受益匪浅。更重要的是，加入这样的组织，参与这些活动，可以帮助张家口加快可再生能源的开发和部署，探索更多机会，建立不同规模的联合研发项目。



1. 简介

要点：

- 近年来，张家口作为一个拥有 440 万人口并与北京毗邻的中国中等城市，对中国政府倡导的绿色、低碳和可持续发展概念做出了积极响应。中国的国家政策方向非常明确：通过提高非化石能源，尤其是可再生能源的使用比例促使能源结构多样化，进而增强能源和环境安全。

中国如今选择如何为城市供电将对未来的能源和环境可持续发展产生深远影响。

- 张家口市凭借其丰富的可再生能源资源和优越的滑雪条件，被选为北京 2022 年低碳冬奥会的承办城市。

- 2015 年，中国国务院批准张家口市为全国首个国家可再生能源示范区，张家口作为先进的、创新的可再生能源技术应用试验台，为电力部门改革提供了机会，同时有利于在全国范围内扩展可再生能源的发电和使用。
- 作为中国首例，《张家口能源转型战略 2050》将为许多其他渴望摆脱煤炭能源系统并利用可再生能源技术和其他使能技术的城市提供新的范式。

本报告的这一节介绍了张家口的概况，并提供了如何结合地理和时间尺度分析和理解城市能源系统的一般背景。接着是对应用方法的描述。

1.1 城市概况

张家口是一个位于中国河北省西北部的中等城市，与北京毗邻。（图 1）几十年来，该市一直努力将生态保护置于经济发展之上，其任务是负责供应和保护该地区经济增长所需的自然资源（Li 等人，2017 年）。1995 年 5 月，张家口从中国 1978 年开始实行的“改革开放”政策中受益。¹在那之前，该市经济不景气，相比省内其他城市的贫困人口更多。（Zhang 等人，2011 年）。

图 1 张家口地理位置



来源：谷歌

免责声明：该地图上显示的边界和名称并不意味着 IRENA 官方认可或接受。

¹ 这是中国经济改革进程中的一个重要里程碑，使中国从计划经济转变为市场经济。

为什么选择张家口？

张家口是一个资源丰富的城市，不仅有大量的矿产（例如煤炭）资源，而且还蕴藏着诸如太阳能、风能、地热和生物质等丰富的可再生资源。随着中国在过去十年逐步提高可再生能源的利用比例，张家口也迅速扩大了可再生能源的开发规模，推动了该市的经济发展。2010年至2013年期间，该市的地区生产总值（GDP）年增长率增至两位数，此后一直保持在全国平均增长水平之上。

2015年是张家口重要的里程碑。这期间发生的一系列事件给这座城市带来了独特机遇，并且毫不夸张地说，甚至已经改变了该市未来的发展轨迹。

1. **京津冀地区协同发展：**经过数十年经济的快速发展，中国最高决策者意识到，以北京和天津等大城市为中心的两极分化发展带来的利益并未在该地区得到有效分配，这导致京津地区的不平等现象加剧、生态系统恶化，给社会和经济的可持续发展带来了极大挑战。²例如，北京和天津人口约占该地区的三分之一，但这两个特大城市在2012-2016年期间的人口增长数量却占到该地区人口增长数量的一半以上（Zhou, 2018年），其承载能力面临越发严峻的挑战。

在此背景下，习近平主席于2014年提出了“京津冀地区协同发展”的构想。次年，代表国家最高决策水平的中共中央政治局批准了该计划的指导方针，

并于2016年发布了京津冀“十三五”规划，设定了2020年的明确目标。这是中国第一个该类型的五年计划，根据惯例，五年计划应在国家和省级制定，此前也从未制定过跨省发展计划。

根据该项计划，张家口市的具体职责是确保为首都北京及京津冀地区提供清洁的水资源及带来生态效益。同时，对张家口为区域可持续发展作出贡献的总体认可为该市提高经济增长，降低环境影响提供了一个战略机遇。

2. **2022年低碳冬奥会：**2015年，北京被选为2022年冬奥会的主办城市，张家口崇礼区需承办大部分奥运会雪上项目赛事。北京为2022年冬奥会设定了宏大的低碳目标。凭借其丰富的可再生能源资源，张家口将在支持北京实现这一目标方面发挥重要作用。
3. **张家口国家可再生能源示范区：**同样在2015年，中国国务院批准张家口市设立全国首个国家可再生能源示范区³。随后该市设定了短期和中期可再生能源目标。

重要的是，示范区作为先进的、创新的可再生能源技术应用试验台，为电力部门改革提供了机会，同时有利于在全国范围内扩展可再生能源的发电和使用规模。

² 该地区拥有1.11亿人口，占全国人口的8%（Zhou, 2018年）。该地区拥有1.11亿人口，占全国人口的8%（Zhou, 2018年）。

³ 此前，中国政府曾批准过类似的省级或市级可再生能源开发区。

随着国家级示范区的批准，该市得以获得中央政府的财政和政策支持。由此带来的效益也可以进行共享，并在全国范围内复制推广这一模式。从区域角度来看，张家口在发展其丰富的可再生能源资源方面获得了政治和政策支持，可利用清洁能源资源满足本地的能源需求，同时还具备向北京以及该地区其他城市提供清洁能源的潜力。这些还将为北京举办 2022 年冬奥会提供支持。

抓住上述机遇需要战略性的思考和规划，并采取创新行动。张家口需要制定明确、长期、合理的能源转型战略，并与城市产业和经济部门的可持续发展转型保持一致。

这项战略一旦制定，就能成为其他正在转型或计划转型城市遵循的有趣模式。

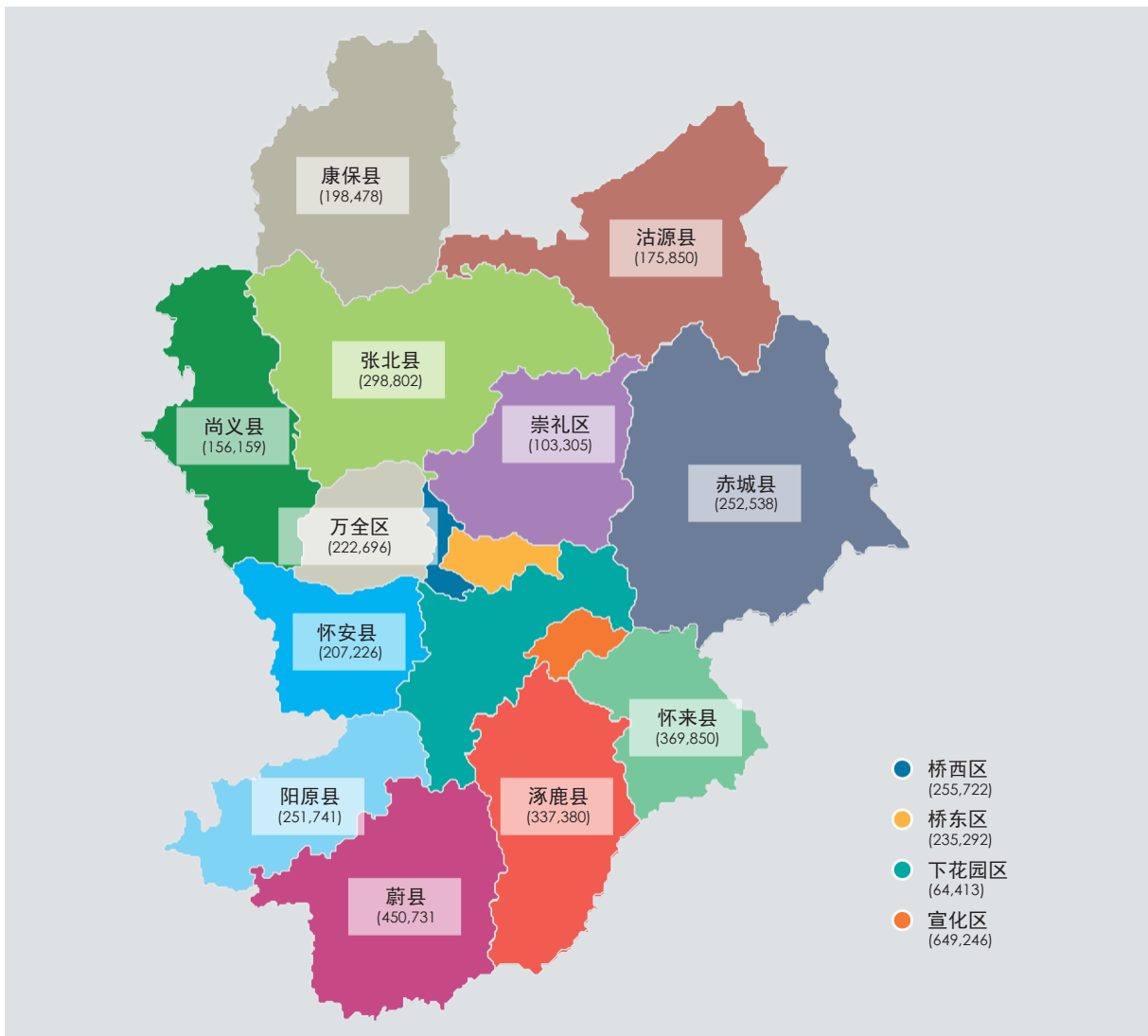


各区县人口分布和 GDP

1993 年，张家口地市合并，其行政区划扩大到近 38000 平方公里 (km²)，面积与荷兰相近。2017 年底，该市人口为 443 万，相比 2010 年增长了 2%（张家口市统计局，2018 年）。如图 2 所示，该市 16 个区县中大多数人口在 10 万至 20 万之间，而有五个区县（位于城市南部）人口超过 30 万，占该市总人口的一半。

张家口的平均人口密度约为 120 人/km²，略低于全国平均水平 144 人/km²。但是如图 3 所示，张家口市县区之间的人口密度存在很大差异。宣化、桥西和经开区的人口密度最高，其他地区的人口密度相对要低很多。大多数县区的人口密度与其 GDP 紧密相关。这表明这些地区的经济活动为劳动密集型。经开区例外，它是一个高新技术产业开发区。

图 2 张家口市行政区划和人口分布



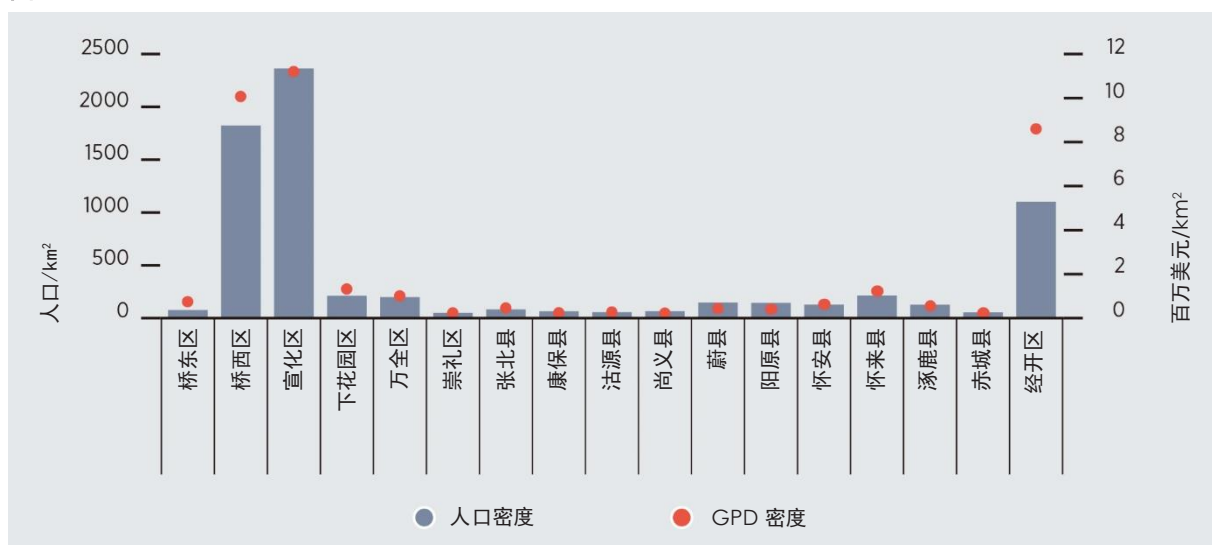
来源：基于张家口市统计局数据（注：经开区已并入其邻近区县。）

免责声明：该地图上显示的边界和名称并不意味着 IRENA 官方认可或接受。

城乡人口的区域性分布也应该作为考虑因素。张家口的平均城市化率⁴从 2011 年的 48% 增长到 2017 年的 56% (图 4)。与中国许多城市一样,农村人口,尤其是劳动力迁移到经济活动中心以寻求更好的工作机会这一趋势使农村地区老年人口数量众多,实际居住人口少于登记人口。如报告后文所述,人口结构的变化对农村和城市地区的能源使用都产生了影响。

随着 2019 年底高速铁路的建成,北京和张家口之间的 200 公里行程时间将从 3 小时缩减到只有 45 分钟,这可能使当前的人口分布发生变化。同时也有助于张家口吸引更多来自北京的人才。但是,人口分布的变化规模将取决于张家口目前经济赶超方面的进展及其包括能源部门转型在内的跨产业部门潜力。

图 3 各县区的人口密度和 GDP 密度



来源: 基于张家口市统计局数据

图 4 2010-2017 年张家口市市区城乡人口



来源: 基于张家口市统计局数据

4 根据中华人民共和国中央人民政府 (2013 年) 定义, 指一年中在城镇居住六个月以上的城镇居民人口与中国总人口的比率。

气候与天气模式

阴山将张家口市分为两个主要地理区域：海拔超过 1400 米的高原地区覆盖四个县区（康保县、沽源县、尚义县和张北县），而盆地区域则覆盖海拔较低的其他地区（图 2）。这一划分形成了两个不同的气候区及可再生能源潜力（尤其是风能）的不同情况。

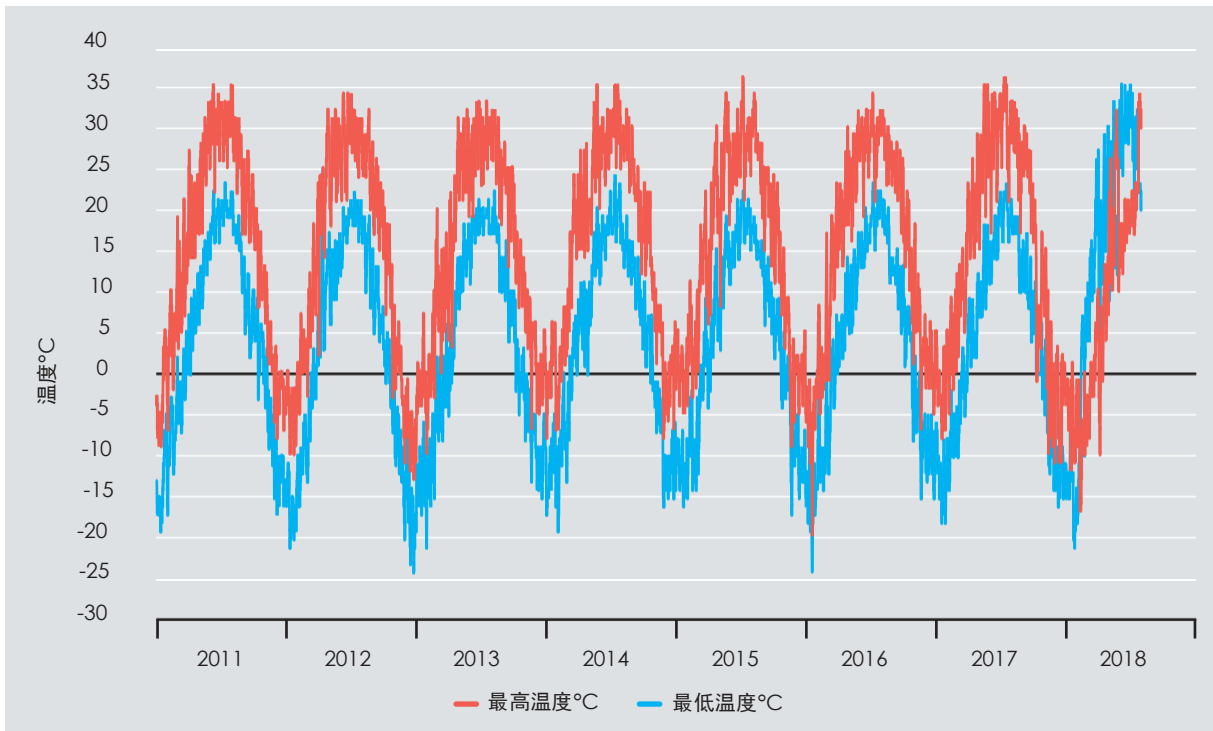
通常，冬天高原地区比盆地地区更冷。冬季长而寒冷，夏季短而凉爽。春秋两季干燥。图 5 和图 6 显示了不同时间范围内的温度变化。张家口目前供热需求大于制冷需求，尽管随着气候变化，这种需求可能会有所改变。

1.2 国家和区域背景

经过三十年经济的快速增长和城市化进程，中国在能源和环境安全方面已走到了十字路口。从国家层面来讲，中国的政策方向非常明确：通过提高非化石能源，尤其是可再生能源的使用比例促使能源结构多样化，进而增强能源和环境安全。最终使国家未来的能源体系主要依赖于可再生能源资源。

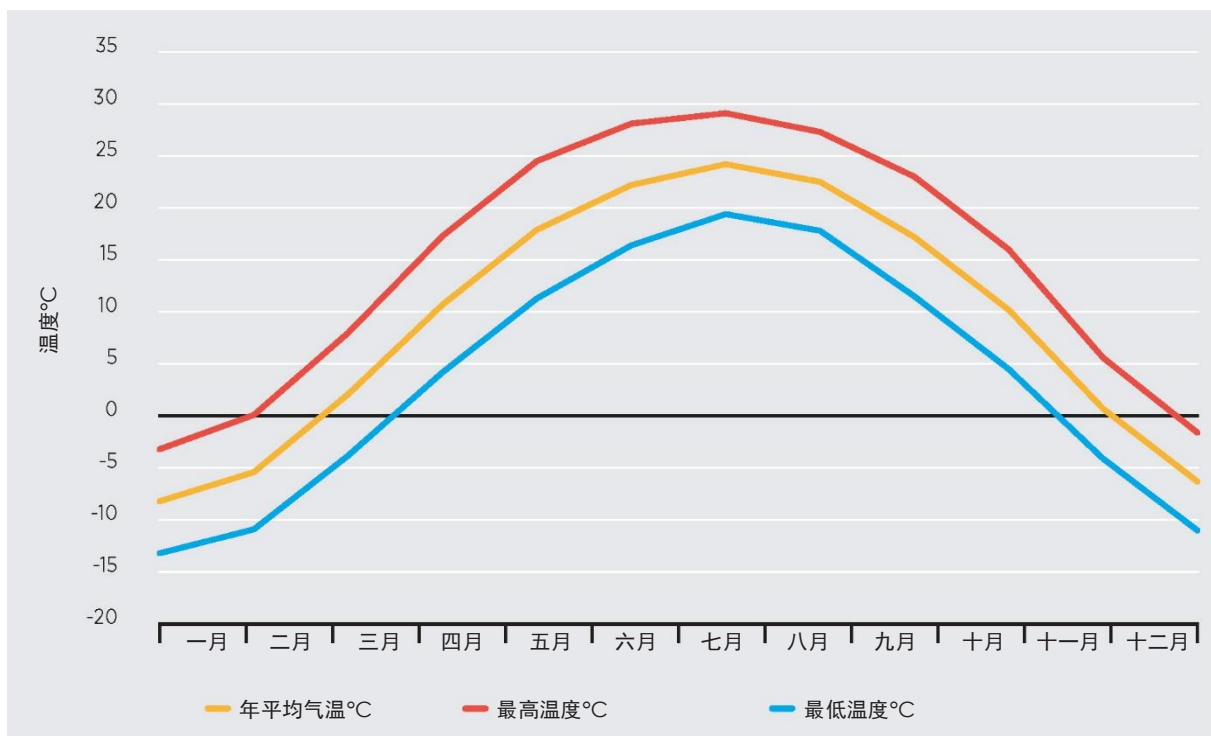
联合国经济和社会事务部 (DESA) 的数据显示，未来三十年，预计中国城市人口将增加 2.55 亿。增长速度最快的是人口在 30 万至 100 万之间的中等城市。据联合国经济和社会事务部估计，全球范围内有近 100 个这样的城市将以每年超过 4% 的速度增长——是世界中等城市人口平均增长水平的两倍，而这些城市中超过一半位于中国。总体而言，预计到 2050 年，全球城市人口将增加 25 亿。中国、印度和尼日利亚是引领亚洲和非洲未来城市化的主要国家，

图 5 2011 年 1 月至 2018 年 7 月的每日温度



来源：张家口市气象台，2019 年

图 6 2017 年温度



来源：张家口市气象台，2018 年

预计这些国家将实现 90% 的城市增长（UN DESA，2015 年）。

这些趋势会对中国正在进行的能源转型，尤其是中国城市能源基础设施发展产生重要影响。中国如今选择如何为城市供电将对未来的能源和环境可持续发展产生深远影响。

可再生能源，特别是太阳能和风能一直是推动中国能源转型的主要载体。截止到 2017 年，可再生能源占中国总电力输出的比例超过四分之一。尽管其中大部分来自水电，但过去十年太阳能和风能的迅速增长帮助中国提前三年实现了 2020 年碳强度降低⁵目标。用于室内供热的地热和生物质发展势头也十分强劲。在运输部门，电动车 (EV) 数量的增长正在缓解石油需求，且有助于减少碳排放。

2005 年至 2017 年期间，中国的碳强度降低了 46%，高于到 2020 年将碳排放强度降低 40-45% 的目标（国际合作中心，2018 年）。然而，中国要实现到 2030 年将碳排放强度降低 60-65% 的中期目标，仍需继续努力，这意味着可再生能源的发展仍然至关重要。根据《中国可再生能源展望 2018》，到 2050 年，中国可以并且应该在能源结构中实现高比例的可再生能源。

从区域来讲，另一个关键是需要解决北京和河北省许多城市所面临的严重雾霾和空气污染问题。北京于 2017 年 3 月关闭了最后一座燃煤热电厂，实现了《北京市 2013-2017 年清洁空气行动计划》中制定的成为中国第一座无煤城市的目标。

四个全新地方整体煤气化联合循环 (IGCC) 能源供应中心填补了煤炭淘汰带来的空白，这使该市每年得以减少燃烧约 1000 万吨煤炭（中国新闻网，2017 年）。

5 定义为单位 GDP 的二氧化碳排放量。

展望未来，北京有信心也有潜力在 2050 年成为低碳城市。电气化将在实现这一目标的过程中扮演重要角色⁶，从北京以外地区引进清洁电力也将发挥重要作用（鉴于其丰富的可再生能源资源，张家口可能是主要供应来源）。最近的一项研究表明，2050 年北京 81% 的电力需求将由其他地区提供，而今天这一比例为 57%（He 等人，2018 年）。这项工作也是《京津冀地区试点协同发展计划》（文本框 1）的一部分。

近年来，张家口市对国家倡导的绿色、低碳、可持续发展理念做出了积极响应。

文本框 1 京津冀地区协同发展

该项倡议由国务院批准，核心是北京、天津和河北省的整体协调发展，总体目标是应对北京作为特大城市的挑战，调整和优化城市布局 and 空间结构、构建现代交通网络体系、扩大环境容量和生态空间。京津冀地区在协同发展效应和区域治理方面已达成以下共识：

- 坚持生态优先前提、促进产业结构调整、营造绿色可持续的生活环境。
- 坚持区域一体化及协同发展原则、寻求城市系统、区域空间和主要基础设施的协同发展和布局。
- 消除阻碍该地区人口自由流动的体制障碍，并以多种形式促进跨区域合作。
- 建立新的体制和机制，以制定和实施跨区域计划。

来源：亚洲开发银行 (ADB)，2015 年。

同时它还承担北京水源保护和生态支持地区这一角色。中国于 2017 年规划了张家口市与雄安新区作为河北省未来发展的“两翼”，共同有效实施京津冀地区协同发展计划。

2015 年，基于张家口市的可再生能源潜力及邻近京津冀地区电力负荷中心的地理位置，国务院批准张家口市设立全国首个国家可再生能源示范区。目的是将该地区发展为可再生能源生产基地、以市场为导向的可再生能源改革试点地区、国际先进技术应用和可再生能源领先产业发展试点地区以及绿色转型与发展示范区。设立这一示范区的目的是为可再生能源技术、理念和模型提供可复制的经验，并成功地在全国范围内推广和传播。

1.3 本研究的目的

本研究是中华人民共和国河北省人民政府与国际可再生能源署 (IRENA) 根据谅解备忘录 (MoU) 开展合作计划的一部分。这项联合倡议的目的是为张家口市制定 2050 年长期愿景规划以探索能源转型的战略路径，张家口市不仅可以将其看作制定政策的总体框架，还可以利用它来指导未来的行动发展计划，促进城市向绿色、清洁和低碳能源系统转型。

作为中国首例，《2050 年张家口能源转型战略》将为许多其他渴望摆脱煤炭能源系统并利用可再生能源技术和其他如电动车、制氢及应用、电池储能系统和智能电网等使能技术的城市提供新的范式。鉴于全国范围内推动能源转型的力度不断增强，该项研究有望推动中国城市战略能源发展规划的浪潮。反过来，这项研究方法可以为中国其他城市提供可复制的模型（根据当地的具体情况和条件进行适当修改）。

6 可从 IRENA 和 SGCC (2019 年) 获取更多信息。

最后需要注意的是，借助这一战略，张家口将能够与国际社区和理念相近的城市进行有效沟通，互相交流城市能源转型的相关知识和经验。世界各地的其他城市都可以从张家口及其愿景中汲取宝贵的经验教训，以便利用可再生能源、实现能源独立、并探索在此过程中可能产生的协同效应。

1.4 方法

本研究由 IRENA、中国国家可再生能源中心 (CNREC) 和张家口市人民政府联合进行。能源转型需要战略思维、愿景以及长期规划。张家口市人民政府正在考虑按照这些方针制定战略，而 IRENA 与 CNREC 合作，应用这一方法提出了几种可行情景，从而可持续地满足城市未来能源需求。

所采用的方法包括专家组讨论及多方利益相关方磋商和访谈，从中获取定性见解并形成描述。2022 年、2035 年和 2050 年的前景展望以使用 EnergyPLAN 模型对所有相关能源形式进行定量分析为基础。

分析以张家口的现有能源系统为起点。随后，根据 2017 年的天气状况、风速和太阳辐射测量来推算风能和太阳能的可再生能源发电量。市政府直接提供了其他例如生物质和地热等可再生能源的年度潜力。

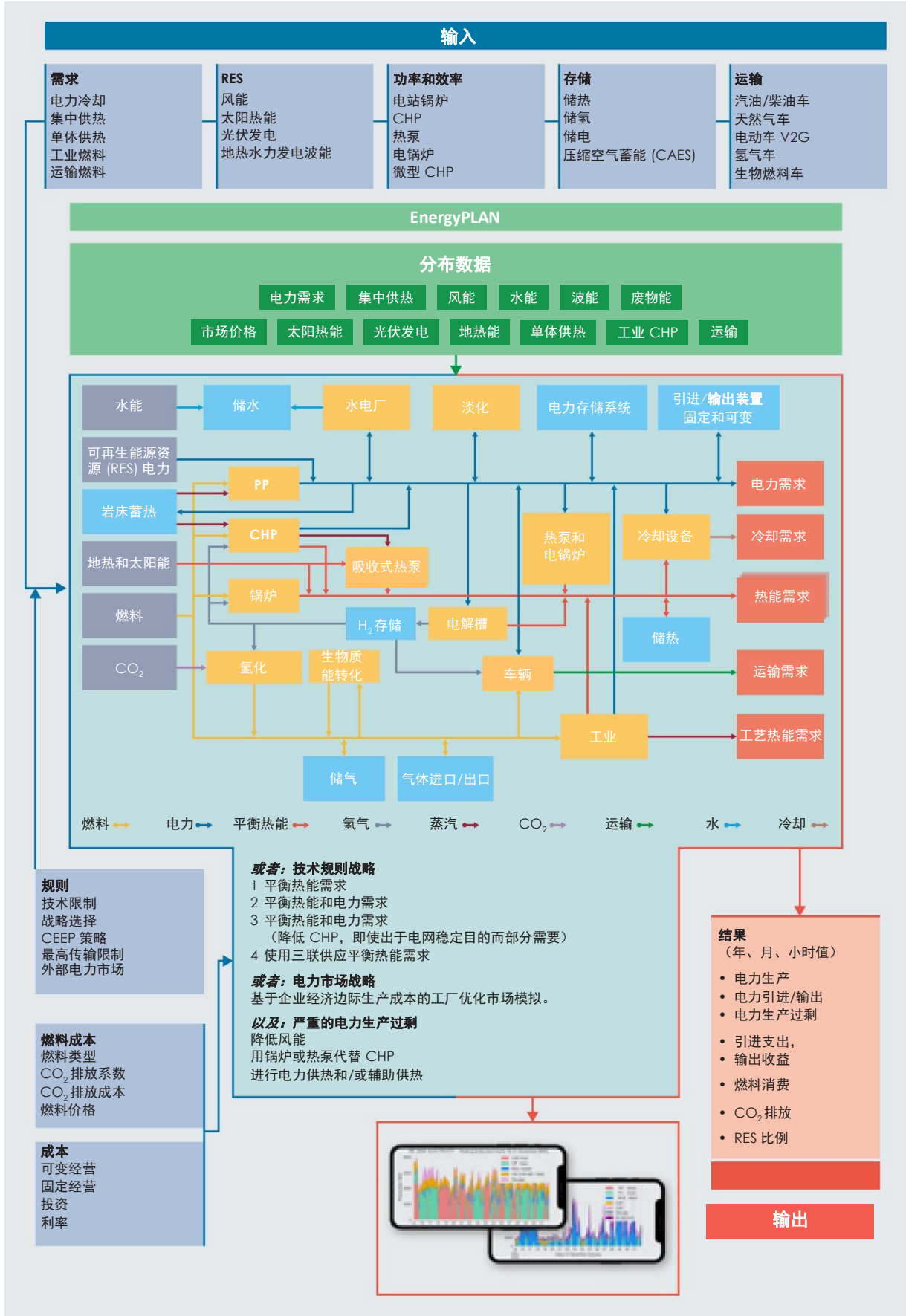
供热需求根据张家口温度曲线计算供热天数得以确定。根据张家口市提供的实际年度供热需求，对张家口供热需求的时间序列（小时）进行了校准。第 4 节提供了更多详细信息，展示了不同能源转型路径的核心分析，并总结了短期和长期（2022 年、2035 年和 2050 年）愿景的最优情景。

能源转型路径的确定基于 EnergyPLAN 的建模结果，该模型由丹麦奥尔堡大学于 1999 年开发，此后不断改进。EnergyPLAN 是一个高级的长期能源系统分析工具，侧重于清洁能源以及电力和热能的集成。该工具已在 100 多份出版物中经过同行评审（Østergaard, 2015 年）并广泛应用于不同地理范围的研究，其中包括区域和市级研究（例如分析丹麦奥尔堡（Ma 等人，2014 年）、意大利阿尔塔维拉 - 锡伦蒂纳（De Luca 等人，2018 年）、日本埃比诺（Noorollahi, 2017 年）和中国香港等城市的能源系统。

EnergyPLAN 提供了一个手动启发式算法平台，可根据不同的系统配置寻找最佳的能源转型路径。确定性输入-输出计算机建模工具通过应用基于规则的模拟解决时间上的高分辨率问题，从而提供了一种快速的计算设置来执行情景分析。

技术分析通过一组基于规则的模拟帮助分析不同的能源战略以实现更高效率、更高的可再生能源比例和/或更好的系统稳定性，同时充分考虑部门耦合以及存储或其他战略部署优势，例如车辆到电网、余热管理和热电联产系统的运营等（图 7）。

图 7 用于系统转型的 EnergyPLAN 模型



来源: Lund, 2018 年, 结合 IRENA 图表分析输出结果

2. 张家口市的能源系统

要点

- 张家口市能源系统与区域和国家能源系统紧密相连。因此，城市能源转型应结合中国整体产业和经济结构调整以及京津冀地区的整体发展进行讨论。
- 张家口拥有丰富的可再生能源资源，其中太阳能光伏技术资源潜力约 30 吉瓦 (GW)、风能技术资源潜力约 40 吉瓦 (GW)，另外其生物质能和地热能潜力巨大，抽水蓄能电站设施的地质条件极佳。
- 过去的十年中，张家口加大了可再生能源系统的部署力度。2017 年，可再生能源占张家口总装机容量的 73%，约占总发电量的 45%。然而，尚有大量可再生能源潜力未得到开发。
- 目前本地用电量相对较低，由于城市的冬季漫长而寒冷，供热需求在能源使用中所占比例最大。从未来能源需求来看，张家口产业结构战略的形成和实施、部分终端用能部门的电气化、能源效率的提高以及地方和区域电网的提升和扩展等方面仍存在不确定性。总体而言，要增加本地可再生能源的使用，就需结合可再生能源的生产更多地应用创新的终端使能技术。

- 传输限制已经成为风能和太阳能光伏 (PV) 发电持续部署的一大挑战。2013 年，仅张北县（张家口辖区 13 个县之一）的弃电就达到了 1 太瓦时 (TWh)。从那时起，解决输送中的弃电问题便提上了议程。
- 该市针对国家可再生能源示范区的发展制定了宏大的可再生能源目标。目前已经取得了可观进展。然而，当前要采取的下一项措施是结合城市其他经济 and 产业部门制定的战略目标，为城市能源转型设定一个长期目标。

2.1 能源消费

随着该市 GDP 的迅速增长，张家口的一次能源消费总量 (TPEC) 在 2008 年至 2011 年期间不断增加，于 2011 年达到峰值——1660 万吨标准煤⁷ (tce)⁸。接着经历了大幅下降，之后一直保持相对平稳，约为 1400 万吨标准煤（图 8）。

能源消费下降的主要原因是京津冀地区实施了国家大气污染减排政策以及钢铁等能源密集型产业部门的产能下降。

⁷ 标准煤是指热值低至每千克 (kg) 7000 卡路里或 29307.6 千焦耳/千克或 29.3 吉焦耳/吨标准煤的“煤”。

⁸ 为了便于比较，1 吨标准煤等于 8141 吉瓦时 (GWh)。

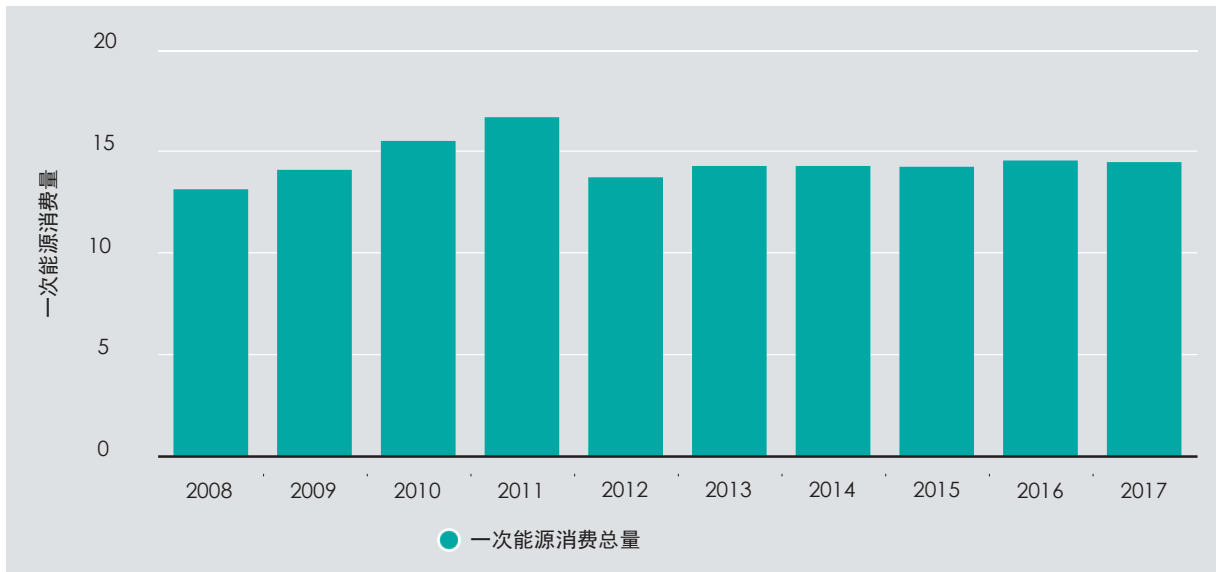
图 9 列出了张家口市终端部门的最终能耗总量分类。过去十年间，张家口市的大多数工业属于能源密集型产业，例如采矿、煤矿开采和焦炭生产、钢铁以及水泥和石化工业，因此工业部门一直在能源消费中的占比最大。

据张家口市统计局统计，有 57 家工业部门公司每年消耗超过 5000 吨标准煤的能源，占 2016 年全市最终能源消费总量的 67%。

其中，宣钢和大唐国际发电股份有限公司张家口发电厂占能源使用总量的 64%（分别为 42% 和 22%）。2016 年，全市十大工业能源消费企业（表 1）占工业能源消费总量的 91%。

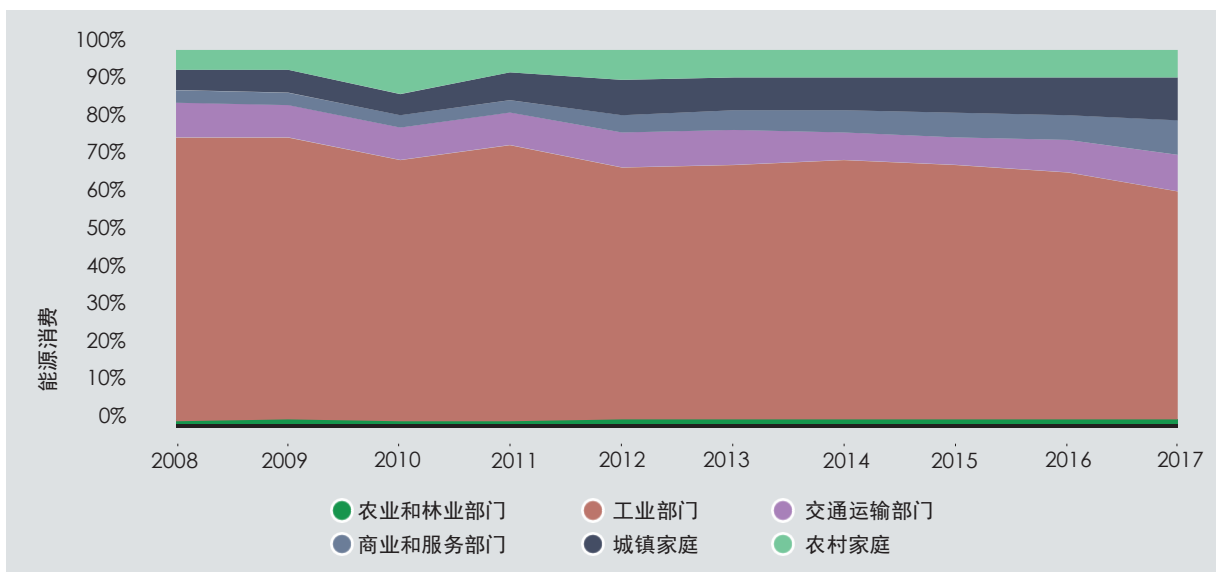
如图 9 所示，工业占比呈下降趋势，而由于城镇家庭以及商业和服务部门用电量的增加，其所占比例在不断增长。

图 8 2008-2017 年一次能源消费总量



来源：张家口市统计局，2018 年

图 9 2008-2017 年部门最终能源消费量



来源：张家口市统计局，2018 年

表 1 2016 年张家口十大工业能源消费企业

名称	能源消费总量 (tce)	综合能耗
宣钢	4 034 549	534 kgce/tonne
大唐国际发电股份有限公司张家口发电厂	2 125 508	300.65 gce/kWh
怀安热电有限公司（中国国电集团子公司）	606 748	202 gce/kWh
宣化钢铁集团有限责任公司（河北 CHP）	571 923	190 gce/kWh
大唐国际张家口热电有限责任公司	497 868	250 gce/kWh
河北盛華化工有限公司	222 074	n/a
涿鹿金隅水泥厂	201 768	n/a
大唐国际下花园发电厂	144 767	156 gce/kWh
国网冀北电力有限公司	134 486	n/a
阳原石灰厂	117 600	n/a

注：CHP = 热电联产；kgce = 千克标准煤；gce = 克标准煤；kWh = 千瓦时；n/a = 未获取数据
来源：基于张家口市人民政府的数据和采访

住宅部门（城镇和农村家庭）的最终能源消费量位列第二，约占总消费量的五分之一。家庭能源消费的三个主要类别是室内供热⁹、电器和烹饪。

根据来源，尽管煤炭占比在 2008-2015 年期间有所下降（图 10），但它仍然在住宅能源使用中占比最大，这主要是由于在漫长寒冷的冬季采用供热带来的结果。在此期间，主要用于烹饪的液化石油气 (LPG) 占比维持相对稳定，但略有增加。

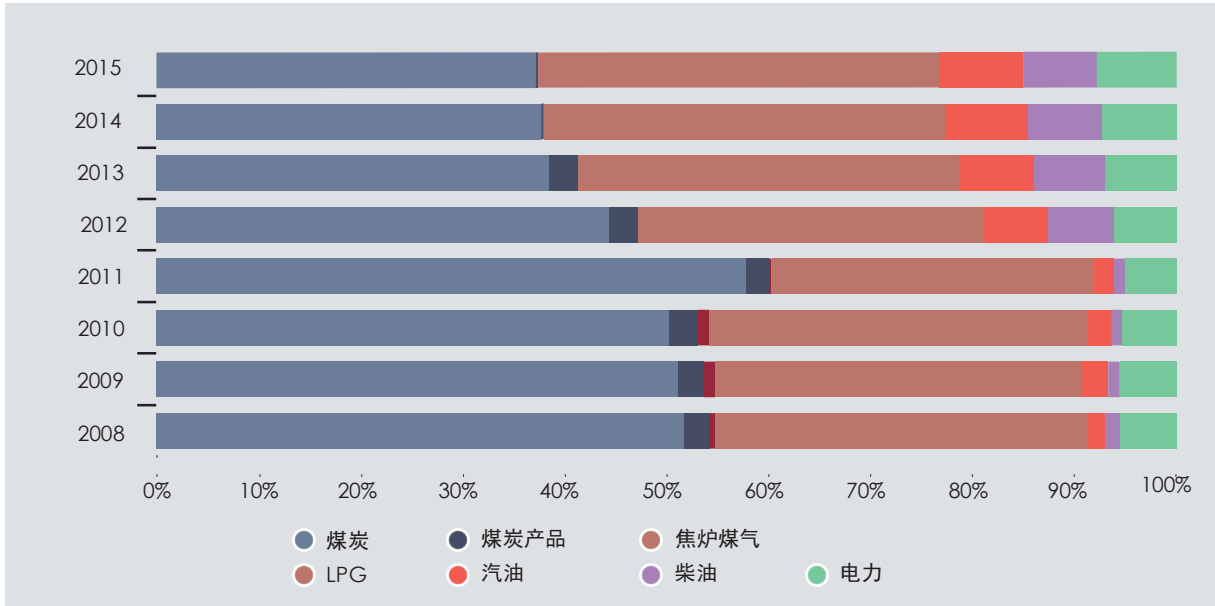
2008 年至 2015 年，**交通运输部门**在最终能源消费总量中的占比保持在 10% 以下。截至 2017 年底，张家口道路上的车辆总数已接近 80 万，其中大多数为传统内燃发动机 (ICE) 车。氢燃料电池和电池驱动车等替代能源车所占比例极低，但潜力巨大，尤其是氢燃料电池电动车 (FCEV)。截至 2017 年，该市已安装了近 3000 根充电桩、355 个充电站和 1 个氢燃料补给站，可为大约 2600 辆新能源汽车提供动力。

在政府的支持下，张家口已投放 174 辆 FCEV 公交车，迄今为止在全国居于首位。根据国际能源署 (IEA, 2018 年) 数据，2018 年全球 FCEV 的总数为 11200 辆，而中国约占近 20% 的比例（尽管由于缺乏必要的基础设施，仅有约四分之一正在运营）。由于 FCEV 和电池电动车 (BEV) 都比 ICE 车辆的能源效率要高得多，如果张家口用这些车型稳步替换 ICE 车辆，即使未来车的数量可能会增加，运输部门的最终能源消费仍会减少。

总体而言，尽管张家口的用电需求相对较低，但过去十年该地区的用电量仍然增长了近 40%（图 11）。

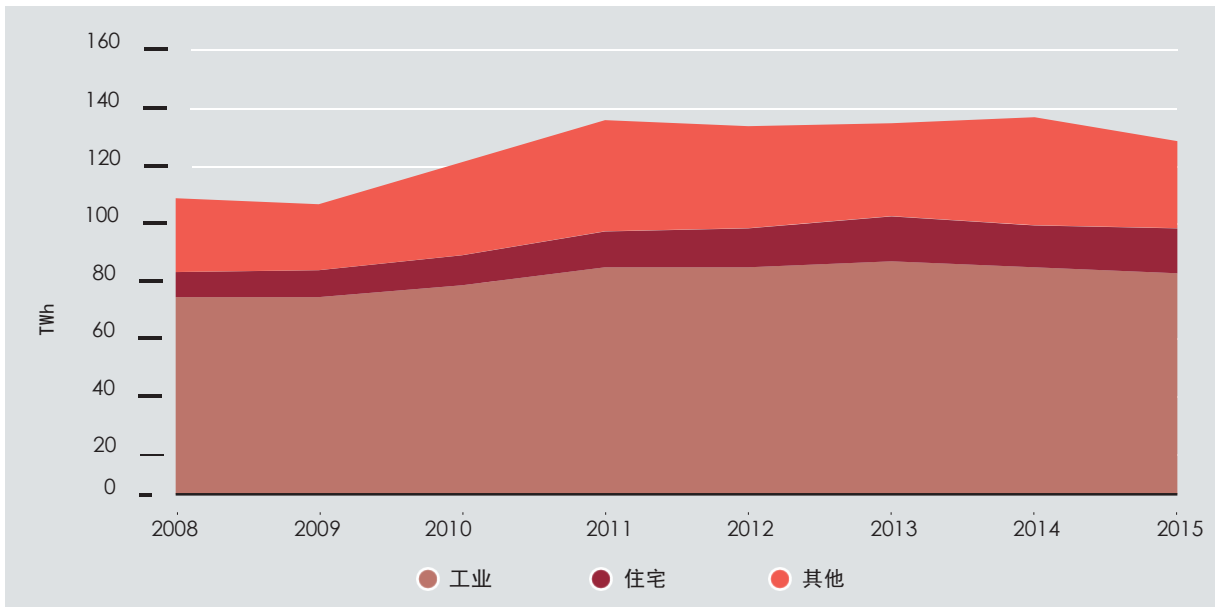
⁹ 张家口的大多数建筑夏季不需要制冷，也无需为其供应热水。

图 10 2008-2015 年按能源来源/载体分类的住宅部门最终能源消费量



来源: 张家口市统计局, 2018 年

图 11 2008-2015 年各部门用电量



来源: 张家口市统计局, 2018 年

2017 年, 该市仅消耗了其发电量的三分之一, 剩余三分之二传输到了邻近城市, 主要目的地为北京。

2008-2015 年期间的用电量大多与 TPEC 相关。直到 2017 年, TPEC 几乎保持不变, 而用电量

却增长了近 13%。这很大程度上是由于张家口有大量达到国家标准的风能资源, 并实施了风能-热能转换计划, 旨在解决该地区长期面临的弃风挑战。

仅在 2017 年, 利用风电通过电加热器或热泵就满足了超过 500 万 m² 的室内供热需求。

这一项就消耗了 708 GWh 若不加以利用就会发生弃电的风能发电量。根据张家口市能源局估计，由此产生的环境效益巨大，有效减少了一半以上的二氧化碳 (CO₂) 排放量和 1600 吨的氮氧化物排放量。（此计划将在报告的后面部分进行详细讨论。）

2008-2015 年期间，工业部门消费量占总电力输出的一半以上，而住宅部门所占比例仅为约 10-13%，其余主要用于商业和服务部门。

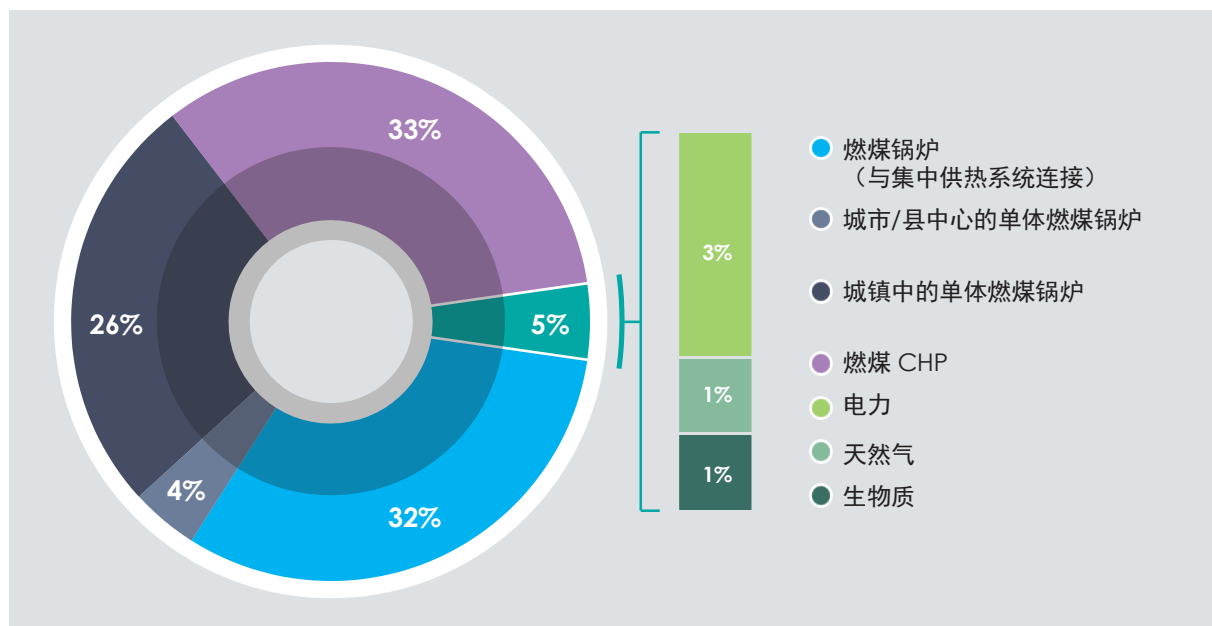
风能提供有效、可持续的室内供热

热能消费¹⁰，尤其是建筑室内供热的热能消费是张家口能源结构的主要组成部分。截至 2017 年，全市总计有 1.5 亿 m² 的建筑需要室内供热服务。供热时间为 11 月 1 日至 3 月 31 日，共计 151 天。如图 12 所示，煤炭可满足约 95% 的室内供热服务，而在中国被归类为清洁能源的电力、天然气和生物质等能源供热比例仅为 5%。

集中供热系统和建筑群中的供热系统约占总供热面积的 65%。截至 2017 年，张家口已拥有 3453 公里的集中供热网络，包括 1092 公里的主网络和将主网络连接至建筑物供热系统的 2361 公里管道。在这两种类型的网络之间有 270 个热力站。整个网络覆盖 6170 万 m² 的集中供热面积，占室内供热总面积的 41%。

表 2 列出了张家口市各县区的集中供热供应商。

图 12 2017 年室内供热需求（基于建筑面积）



来源：ETRC 等，2018 年

¹⁰ 这仅涵盖住宅、商业和公共建筑的供热需求，不包括工业中的工艺热能需求。

表 2 不同县区的供热供应商

供应商名称	装机年份	容量	覆盖建筑面积 (m ²)
张家口中心区			
大唐国际张家口热电有限责任公司	2010	2 X 300 MW	12 000 000
大唐国际发电股份有限公司张家口发电厂	2013	2 x 300 MW	12 000 000
张家口源通华盛热力有限公司	2010	6 X 70 MW	6 980 000
张家口市东源热力有限公司	2009	4 X 64 MW	4 280 000
东环热力公司	2010	2 X 29 MW	800 000
崇礼区			
张家口崇礼区丰汇热力有限公司	n/a	2 X 58 MW; 3 X 46 MW	2 040 000
万全区			
通源热力有限公司	n/a	4 X 58 MW	n/a
东源热力有限公司	n/a	n/a	n/a
沽源县			
昊诚实业集团有限公司	n/a	2 X 70 MW; 64 MW; 4 X 29 MW	n/a
赤城县			
赤城县日新环宇供热有限公司	n/a	46 MW; 2X29 MW	1 600 000
张北县			
张北县华盈热力有限公司	n/a	3 X 72 MW	4 600 000
张北县星火供热有限公司	n/a	46 MW; 14 MW	2 600 000
康保县			
康保县康达热力有限公司	n/a	58 MW; 29 MW	n/a
康保县天润热力有限公司	n/a	29 MW; 2 X 14 MW	n/a
阳原县			
阳原县兴安热力有限公司	n/a	3 x 38 MW	n/a
阳原县华阳热力有限公司	n/a	2 x 29 MW	n/a
尚义县			
尚义县兴隆热力有限公司	n/a	42 MW	n/a
涿鹿县			
涿鹿县轩辕城市供热有限公司	n/a	2 X 58 MW; 29 MW	n/a
涿鹿华达热力有限公司	n/a	29 MW	n/a
涿鹿县荣庆热力有限公司	n/a	4 x 29 MW	n/a
怀安县			
张家口普华热力有限公司	n/a	2 x 14 MW	n/a
其他			
塞北海通供热有限公司	n/a	2 X 14 MW	n/a
察北 Haoying 公司	n/a	2 X 14 MW	n/a

注: CHP = 热电联产

来源: 张家口市人民政府

除了集中供热系统的供应商，还有 1117 台不超过 35 蒸吨的燃煤锅炉、32 台超过 65 蒸吨的锅炉和 31 台介于前两种类别之间的锅炉。

值得注意的是，2017 年，张家口约三分之一的面积仍依赖于建筑内的单体锅炉供热。这些锅炉主要分布在城镇和乡村而非城市或县中心地区，通过热电联产 (CHP) 或分布式供热设施满足本地的供热需求。这表明替代旧式供热系统的潜力主要在城镇和乡村，取决于与人口密度相关的热能需求密度。这便解释了为什么现有的集中供热系统位于桥西区、经开区和下花园区，因为这些地区的人口密度相比城市其他地区要高。

尽管 2010 年以后建成并接入集中供热网络的一些全新建筑需要安装家用热计量表，但中国的热能消费仍主要通过建筑面积衡量。计量表的实际使用有效性也各不相同。目前，家庭的年平均¹¹热能需求设定为 145 千瓦时 (kWh)/m²，非住宅（包括商业、服务和公共）建筑的年平均热能需求设定为 181 kWh/m²，工业建筑的年平均热能需求设定为 253 kWh/m²。总体平均水平设定为 188 kWh/m²（河北省物价局，2014 年），尽管新建建筑具有更好的节能性能。

根据北京交通大学的一份报告（《中国能源报》，2017 年），京津冀地区 2020 年的热能需求目标可设定为 97.7 kWh/m²。这表明还存在很大的差距需要填补。但是，如果使用全国平均水平 176 kWh/m²——基于中国地质调查局计算的 32 亿 m² 的建筑面积供热需要 7 亿吨标准煤计算，张家口的当前状况与全国平均水平非常接近（中国地质调查局，2018 年）。

2.2 能源供应：发电和供热

张家口拥有丰富的能源资源，主要是煤炭、焦炭和可再生能源资源。广义上讲，该市的电力和热力生产既用燃料，也用可再生能源。电力通过中国国家电网公司 (SGCC) 运营的电网进行传输，而热能则通过本地供热管道（集中供热）或通过单体锅炉或火炉（农村地区）提供给终端用户。

煤炭资源、燃煤发电和供热

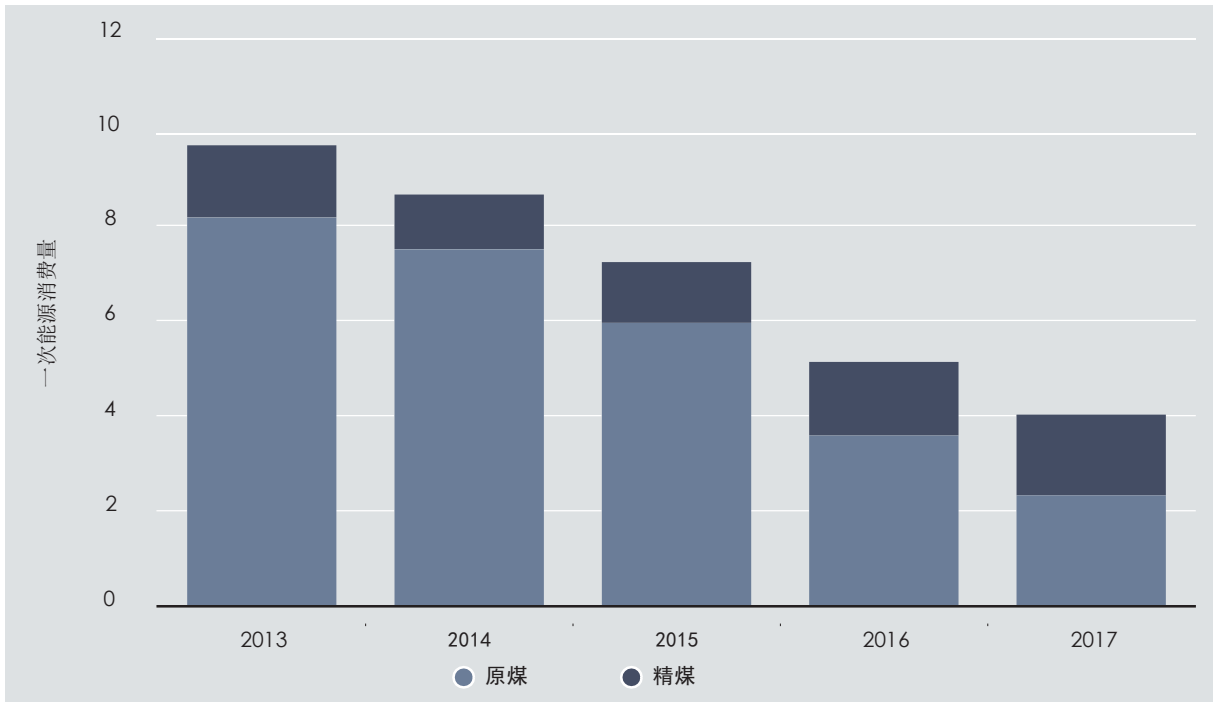
该市探明的煤炭储量为 2.823 亿吨，占河北省煤炭总储量的 18.13%（张家口市自然资源局，2002 年）。在 2012 年煤炭开始逐步淘汰之前，煤炭开采和生产是能源供应的主要来源。2016 年发布《河北省“十三五”能源规划》时，张家口被列为中国到 2020 年实现近零煤炭开采的四个城市之一（其他三个城市为承德、秦皇岛和保定）。这意味着张家口必须关闭几乎所有的煤炭开采和生产公司。

2016 年至 2018 年期间，该市关闭了 22 家煤矿公司，淘汰了近 632 万吨标准煤产能，煤炭总产能大幅降低，如图 13 所示。其余煤矿仍在满负荷运转。计划到 2019 年再关闭 15 家总产能为 835 万吨标准煤的公司。同时，35 蒸吨以下的燃煤锅炉也正在逐步淘汰，从而减少了需求侧对煤炭的需求。

但是，煤炭在通过热电联产和供热厂发电及供热方面仍发挥着重要作用。

¹¹ 注意，全年供热期为 151 天。

图 13 2013-2017 年张家口市煤炭产量



来源：基于张家口市统计局数据

燃煤热电联产电厂

张家口发电厂的所有冷凝机组都改造成了抽汽冷凝式汽轮机热电联产机组，用于在冬季提供热能和电力。机组的整体能源效率得以大幅提高。但是，这种改造使电厂调节供热期间电力输出的能力受到影响，这是风能和太阳能等波动性可再生能源发电弃电带来的结果。

截至 2017 年，热电联产电厂的总装机容量为 4750 MW。2018 年 10 月，最后一座热电联产电厂在蔚县投产，在现有的燃煤热电联产机组基础上增加了 1320 MW 的装机容量（2 x 660 MW 超临界发电机组）。该电厂的建造被视为一个特例，理由是蔚县 350 万 m² 家庭建筑迫切的供热需求以及向北京（140 公里以外）输出电力的需要。与这家新工厂相联系的是 2020 年后唯一允许运营的煤矿。

供热厂

除了热电联产电厂生产的热能之外，该市还有 23 家供热厂。供热网络总长 3453 公里，其中包括 1092 公里的一级网络和 2361 公里的二级网络，覆盖了大约 90% 的市内和城郊地区。是否合并这些网络以提高未来的运营效率还有待观察。焦煤应用于钢铁制造。以张家口为例，焦煤主要的消耗来自宣钢厂，该厂成立于 1919 年，将于 2020 年关闭¹²。2017 年张家口市共生产了约 222 万吨焦煤，为五年以来最低水平，原因是宣钢减产。

截至 2018 年底，热电厂总装机容量达到 6606 MW。由于不允许建造新的热电厂，总装机容量肯定会在它最终退出历史舞台之前降低。预计到 2021 年沙岭子热电厂的两台发电机组关闭时，装机容量将降至 5400 MW。

12 高炉将被拆除；是否安装电弧炉仍在考虑之中。

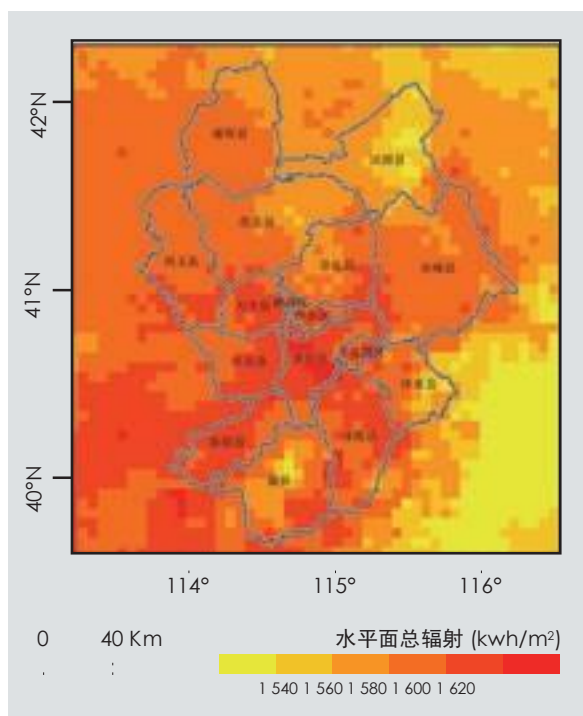
太阳能和风能

张家口拥有丰富的太阳能和风能资源，如图 14 和图 15 以及表 3 所示。太阳能资源集中在中部和南部地区，但事实上张家口所有县区都具有巨大的太阳能资源潜力。

张家口的优质风能资源集中在北部地区，尤其是康保县、沽源县、张北县和尚义县。根据张家口国家可再生能源示范区规划，该市估计有 30 GW 的太阳能光伏技术潜力和 40 GW 的风能潜力。

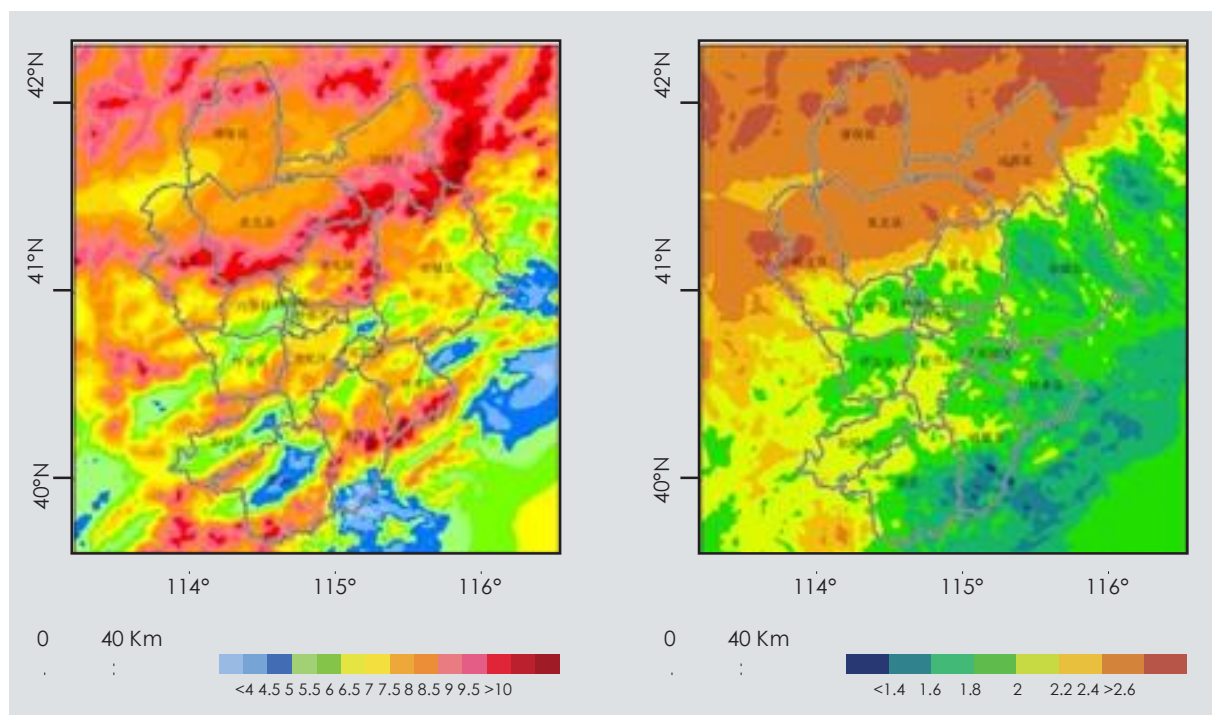
张家口拥有丰富的太阳能和风能资源

图 14 以直接辐射 (DNI) 衡量的太阳能资源潜力 (kWh/m²/年)



来源：张家口市人民政府

图 15 以 Weibull A (m/s) 和 Weibull K 衡量的风能资源潜力



来源：张家口市人民政府

表 3 太阳能和风能资源潜力

位置	风能 Weibull_A (90 m)	Weibull_K (90 m)	DNI (kWh/m ²)
桥东区	6.82	1.99	1 601.55
桥西区	6.07	1.95	1 602.91
宣化区	6.69	2.01	1 608.59
下花园区	6.55	1.88	1 601.55
张北县	8.08	2.46	1 582.85
康保县	7.75	2.54	1 585.46
沽源县	8.10	2.50	1 559.95
尚义县	7.60	2.38	1 594.75
蔚县	6.50	1.88	1 586.15
阳原县	6.23	2.06	1 603.26
怀安县	6.47	1.96	1 602.59
万全县	6.68	2.01	1 601.62
怀来县	7.32	1.82	1 583.81
涿鹿县	6.90	1.82	1 601.28
赤城县	7.00	1.87	1 588.07
崇礼县	8.13	2.09	1 587.86

注：DNI = 直接辐射

来源：张家口市人民政府

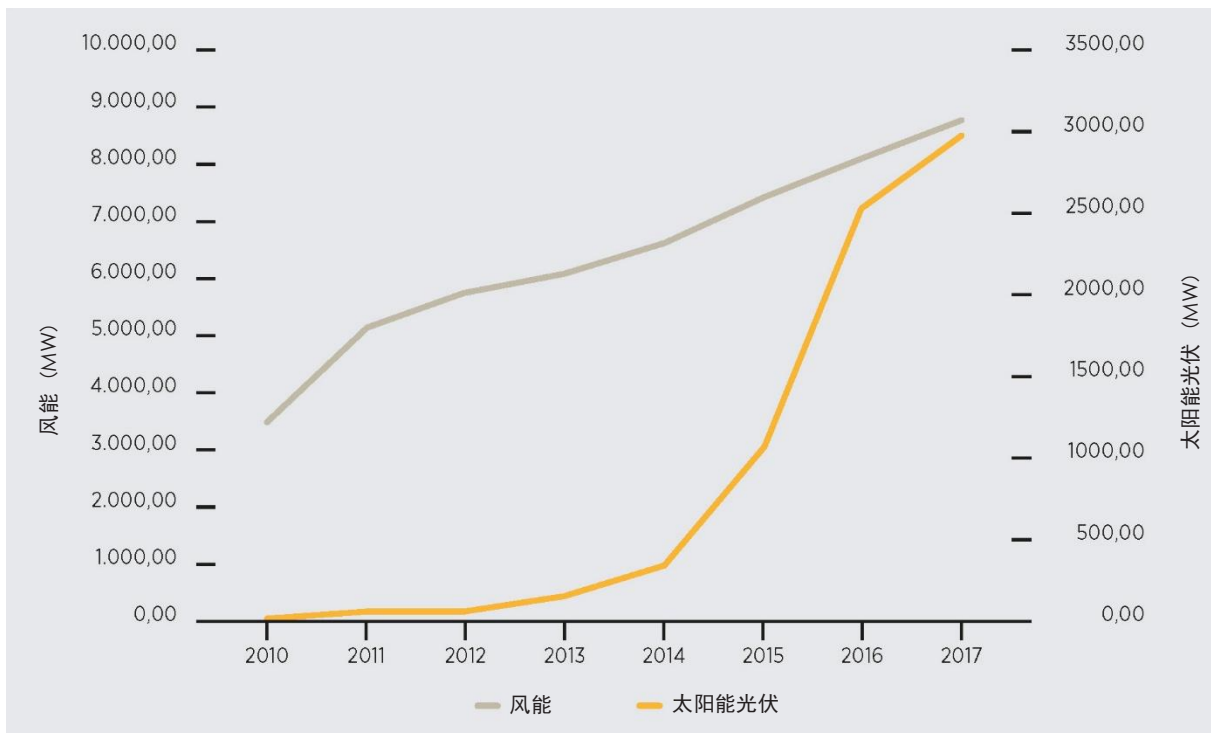
张家口市于 1993 年开始开发风能资源，是中国风能发展的先驱之一。太阳能光伏的发展起步较晚，由于在北京和张家口举行 2022 年冬奥会这一决定，2015 年之后进入快速发展（图 16）。尽管风能和太阳能近十年均取得了令人瞩目的增长，但仅 2015-2017 年间显示的可再生能源发电装机容量就增长了 42%。

截至 2017 年，风力发电总装机容量达到 8.72 GW，而太阳能光伏发电装机容量则达到近 3 GW。该市的累计可再生能源发电装机容量为 13.45 GW，占该年总装机容量的 73%，约占总发电量的 45%。太阳能光伏和风能装置 2018 年继续增长，相比 2017 年增长了 15%。截至 2018 年底，又有 2.4 GW 的风电项目处于建设中。

地理位置上，大多数风能和太阳能光伏电站都位于城市北部和西部地区（例如康保县、沽源县、张北县和尚义县）（图 17）。由于这些区域不靠近本地和区域负荷中心，因此可再生电力必须通过本地和区域电网传输。

随着装机容量的快速增长，输电能力不足已经成为风能和太阳能光伏 (PV) 持续部署的一大挑战。例如 2013 年，张北县一半的风力发电厂都曾遭受弃风问题。2012 至 2013 年期间，该县的弃风量从 20% 增加至 30%，这意味着仅张北县 2013 年就浪费了 1 TWh 的电力（中华环境网，2014 年）。从那时起，通过增加变电站和电缆容量加强本地和区域电网有效改善了传输限制。

图 16 张家口市风能和太阳能发电装机容量



来源：基于张家口市发改委数据

此外，张家口已开始根据四方协作机制（详见第 2.5 节）将风能用于供热目的，该机制旨在通过增加本地对风能的需求来解决弃电问题，同时消纳风能产生的过剩电力。该方案的优势在于风能输出和供热需求的时间匹配，因为这两项活动都发生在晚上和夜间，该方案的应用有助于尽量减少增强电网长距离传输所需的投资。

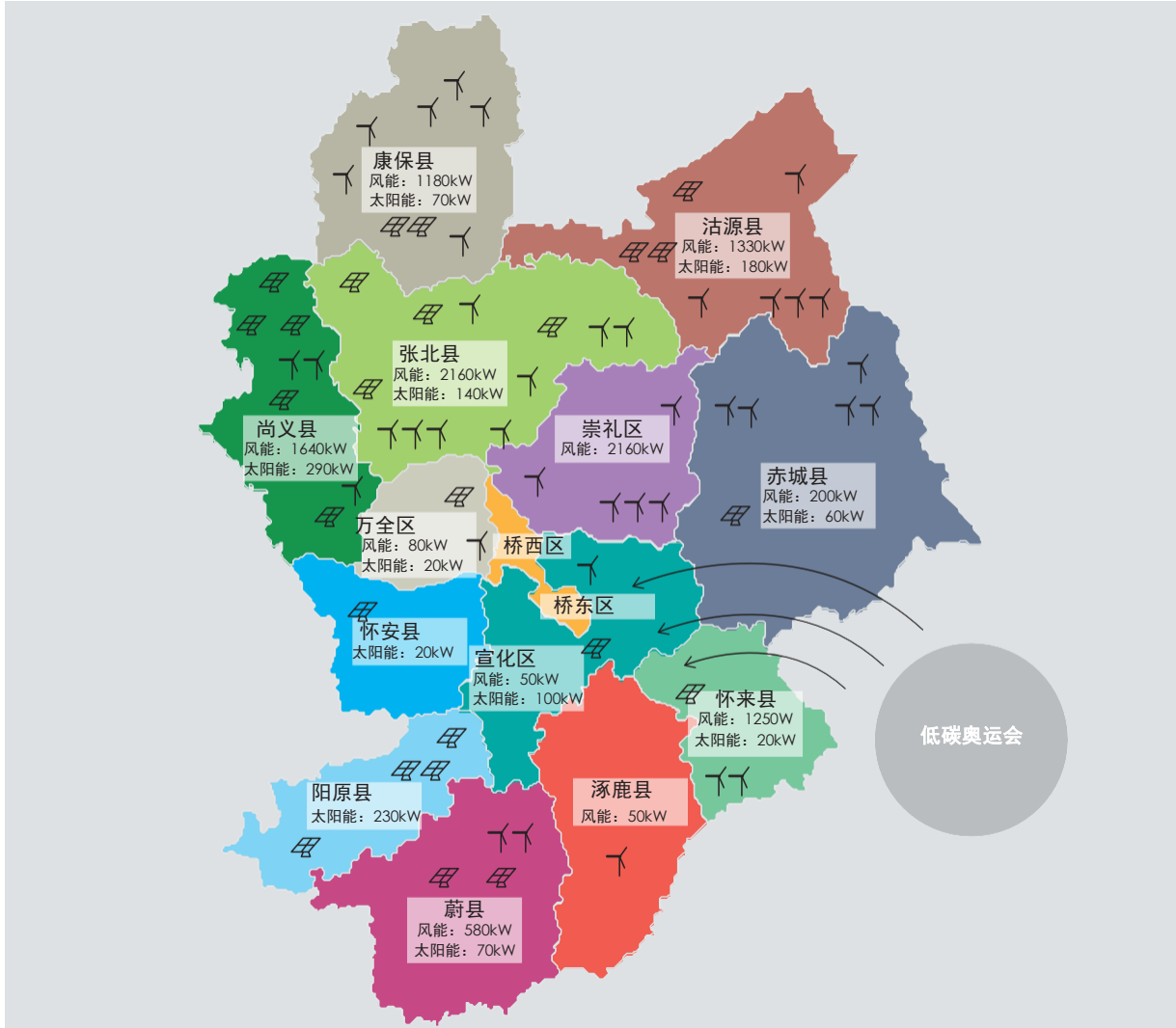
该市的聚光太阳能热发电 (CSP) 的发展稍显逊色。

截至 2017 年，CSP 的装机容量仅为 15 MW 加上 6-8 小时的混凝土蓄热能力，该试点项目有可能适度扩大规模。

该市对 CSP 需求不大的主要原因是直接辐射 (DNI) 相对较低，另外其煤电装机容量所占比例持续维持在较高水平，目前为张家口提供按需供电的基本负荷电力。然而，除了为工业生产热能，具有蓄热能力的 CSP 是为数不多的可替代煤炭发电、减少弃风和弃光并确保电网稳定性的技术之一。



图 17 张家口各地区可再生能源开发



基于张家口市发改委地图

免责声明：该地图上显示的边界和名称并不意味着 IRENA 官方认可或接受。

生物能源

农¹³林废弃物是该市生物能源使用的主要资源。根据河北省“十三五”生物质能发电规划，每年总共估计会产生 200 万吨农林废弃物，其中近一半可用于能源目的。此外，城市固体垃圾 (MSW) 的年产量约为 100 万吨。

若不以环境可持续发展的方式处理废弃物和城市固体垃圾，会对本地和区域环境造成威胁。在农田中燃烧农业废弃物曾是中国农村地区的普遍做法，但由于会造成空气污染，长期以来

政府一直严令禁止这一行为。违反者将受到严厉处罚，地方政府配备了先进的监控和红外线警报系统以执行这一严格禁令。

张家口的生物质能发电装机容量很小，约为 25 MW。但是，随着清洁供热的推广，基于生物质的热电联产将发挥更大作用。2018 年 1 月，国家能源局在全国范围内启动了 100 个基于生物质的热电联产供热计划试点项目，这些项目是克服由煤炭供热系统产生的空气污染的计划的一部分。

13 近 700 公顷农田。

张家口市两个总装机容量为 60 MW 的热电联产项目已获得批准，为住宅和工业终端用户供热，同时每年向电网注入 370 Gwh 的电力（国家能源局，2018 年）。

张家口国家可再生能源示范区规划设定了到 2020 年生物质发电量达到 80 MW 的目标。鉴于太阳能和风能已经面临弃电问题，生物质发电的目标可能会修改为基于生物质的热电联产。

根据示范区规划，尽管该市有野心扩大生物质在纯净沼气中的应用以补充天然气供应，但当前沼气并未在城市中得到广泛应用。生物质颗粒或团块生产是张家口计划开发的另一领域。

抽水蓄能电站

2015 年，张家口决定在尚义县建设一座容量为 1 GW 的抽水蓄能电站，目的是增强区域电网的灵活性并充分利用非峰值电力，且该电力最好来自可再生能源。该项目当前还处于开发期，正在进行可行性研究和环境影响评估。

赤城县和怀来县的抽水蓄能电站地质条件也极佳，他们可从尚义县汲取经验建造自己的抽水蓄能电站。一旦投入运营，目前正在运作中的这些抽水蓄能电站将有效促进太阳能和风能发电的并网。

同时，张家口已经启动了采用不同技术的储能项目，如压缩空气储能。

地热能

京津冀地区的地热能总潜力估值为 3.43 亿吨标准煤，如果充分利用，可满足建筑物的供热需求（中国地质调查局，2018 年）。张家口的地热资源集中在赤城县、怀来县和阳源县，现已确定了 18 个有潜力开发地热水资源的地点（张家口市人民政府，2017 年）。地热水的出水口温度为 36 摄氏度 (°C) 至 55 摄氏度 (°C) (Yang 等人，2016 年)。尽管可以满足建筑物的供热需求，但大部分资源已用于休闲娱乐部门（例如温泉浴/水疗）。

与太阳能和风能不同，出水温度高于 25°C 的地热能被归类为矿产资源，因此要进行征税。在北京，根据地热水的出水口温度和资源的预期用途，征税范围在每立方米 (m³) 0.51 美元至 8.8 美元之间。用于住宅室内供热和农业部门的温室供热征税范围较低。

对于休闲娱乐部门，例如温泉浴/水疗则税收要高得多。2018 年 4 月，张家口市国土资源局对怀来县的地热资源进行了调查，这可能预示着张家口地热能开发会发生变化。



2.3 张家口本地和冀北区域电网

张家口最早于 1917 年开始进行电网建设。经过一个世纪的发展，该市本地电网已成为国网冀北电力有限公司¹⁴的重要组成部分。

首先，张家口电网的位置具有战略意义，其 500 千伏特 (kV) 的输电线路连接了内蒙古电网与冀北电网的其余部分（其他四个城市）。冀北区域电网承担北京电力供应的70%以上，因此必须严格维持张家口电网的可靠性和稳定性以确保整个地区的供电和输电安全。

其次，需要尽可能多地向北京输送清洁/绿色电力。张家口本地电网承担冀北区域电力系统中可再生能源发电总装机容量的 75%。对于提高波动性可再生能源 (VRE) 比例的要求可能会增加在电力质量或电网稳定性方面的风险（Ding 等人，2017 年）。当可再生电力生产量大于用电量，张家口本地电网的稳健性将影响消纳 VRE 的能力。

表 4 提供了冀北地区和张家口市电网的关键参数。

表 4 冀北地区和张家口市电网

关键参数 (2017)		冀北地区	张家口市
最大负荷 (GW)		22.4	2.2
总用电量 (TWh)		149.4	14.7
总装机容量中的可再生能源发电比例		52%	73%
1000 kV	变电站数量	2	n/a
	长度 (km)	761.5	n/a
	输电容量 (kVA)	n/a	n/a
±800 kV DC 长度 (km)		578.1	n/a
500 kV	变电站数量	31	n/a
	长度 (km)	11060.5	n/a
	输电容量 (kVA)	n/a	n/a
220 kV	变电站数量	124	18
	长度 (km)	10917	2495
	输电容量 (GW)	n/a	6.06
110 kV	变电站数量	n/a	53
	长度 (km)	n/a	2784
	输电容量 (GW)	n/a	4.7
35 kV	变电站数量	n/a	138
	长度 (km)	n/a	3 590
	输电容量 (GW)	n/a	2.34

注：kV = 千伏特；kVA = 千伏安 DC = 直流电

来源：国网冀北电力有限公司，2017 年；张家口市人民政府

¹⁴ 成立于 2012 年的省级电力公司，是 SGCC 中最年轻的公司。

张家口本地电网有五个供电地区：康保县、沽源县、尚义县、万全县和涿鹿县。根据电网与负荷中心的距离，可以选择以下两种方式配置电网。第一种是放射状网络，用于将交流 (AC) 风电场 (690 伏 (V)) 和太阳能光伏电站 (400 V) 的电压升至主电网的较高电压 (35 kV、110 kV、220 kV 和 500 kV)；这种配置应用于本地用电量极小的情况，例如康保县、沽源县、尚义县等农村地区。第二种配置是环形网络，将 220 kV 的电压降至 110 kV 和 35 kV，然后连接到配电网络 (10 kV 及以下)；这种配置应用于靠近负荷中心地区或作为城市电力系统一部分的地区，例如万全县和涿鹿县。

过去五年中，随着 VRE 发电装机容量的快速增长，张家口本地电网在消纳电力输出方面遇到了困难。风能和太阳能光伏的弃电率曾一度达到惊人的水平，但 2017 年以来情况得到了极大改善，这主要得益于电网改造速度加快、新输电线路和变电站的建造以及控制和操作系统的改善。2017 年风能和太阳能弃电率降至 7%，与 2020 年实现 5% 的国家目标基本保持一致。

此外，SGCC 投资超过 220 亿元人民币 (30 亿美元)，通过建设高压直流输电 (HVDC) 线路¹⁵ (《人民日报》，2018 年) 和 500 kV 交流线路将张家口的可再生电力分散到整个区域，尤其是为北京供电 (Tian 等人，2018 年)。这包括一条张北县至北京的 ± 500 kV 电压源换流器直流线路、一条连接张北县与尚家庄的 1000 kV 输电线路以及张家口与雄安新区之间的一条线路，为雄安新区提供清洁电力。

2.4 2022 年低碳冬奥会

在成功申办 2022 年冬奥会后，北京明确表达了推广低碳技术使用这一愿景，并将“低碳”作为主要目标。作为支持北京举办奥运会的几个城市之一，张家口将在崇礼区举行雪上项目赛事。

崇礼距张家口市中心约 50 公里，人口 125600，面积为 2334 km²。作为雪上项目场地，崇礼的奥运场馆将全部使用可再生能源电力，该地区所有建筑的供热将由大型太阳能集中供热站、地源热泵和可再生电力锅炉提供。以这些能源为设施供电有助于北京实现低碳目标。此外，还将通过推广公共交通、清洁能源车、汽车共享和其他措施等方式来最大程度地减少碳足迹。

根据中国电力规划设计总院建议，该地区的能源供应将尽可能以本地生产的可再生能源为基础。崇礼的 DNI 在 1500 至 1583 kWh/m²/年之间，因此屋顶太阳能光伏只能提供 4.27 MW 的容量。相比之下，该地区的风力发电潜力巨大：目前风力发电装机容量已达到 494 MW，并有 150 MW 将于 2022 年投入使用。为向奥运村供电，两座容量约 250 MW 的风电场将通过专用输电线路直接连接到奥运村。包括通过集中式电锅炉供热的可再生电力，奥运村的总电力需求将为约 170 MW，年总用电量将为约 506 GWh。供热的电力需求约为住宅电力需求的两倍。

15 尤其是采用基于电压源换流器的高压直流输电 (VSC-HVDC)。

2.5 可再生能源目标和推广计划

张家口市制定了 2020 年和 2030 年可再生能源的宏大目标以促进该国家级可再生能源示范区的发展（图 18）。其中包括：

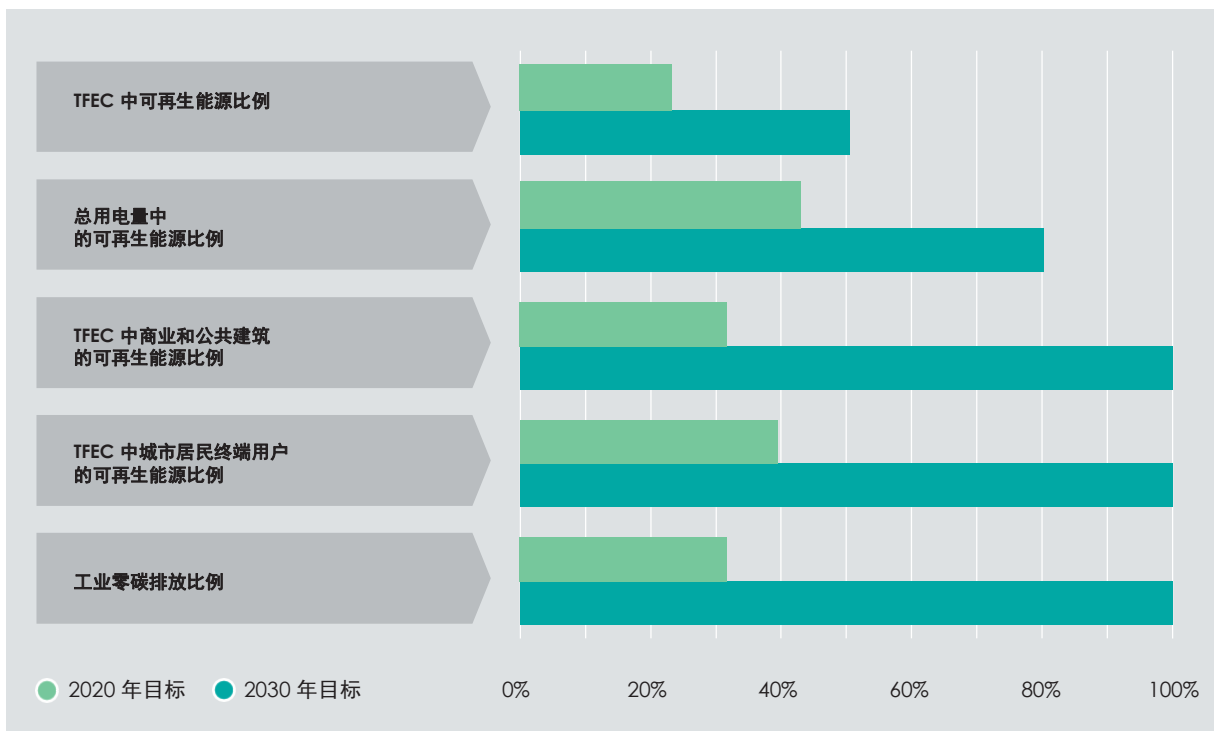
- 到 2020 年，可再生能源将占用电量的 55%、最终能耗总量 (TFEC) 的 30%、城市居民终端用户最终能耗的 40% 和商业及公共建筑最终能耗的 50%。此外，40% 的工业企业将实现零碳排放。
- 到 2030 年，可再生能源将占用电量的 80%、TFEC 的 50%、城市居民终端用户最终能耗的 100% 和商业和公共建筑最终能耗的 100%。此外，所有工业企业将实现零碳排放。

尽管这些目标没有法律约束，但中国的治理体系视之为市政府领导的关键绩效指标，如果未完成目标，地方决策者将要承担相关责任。实现这一宏大目标面临诸多挑战，但市政府承认，更低的成本和更成熟的技术为张家口在国家能源转型中朝着主要基于可再生能源的清洁、低碳和可持续能源系统定位发展提供了独特的机会。自目标确立以来，张家口已经制定了一系列研究和实施计划。

目前进展顺利。根据国家发改委能源研究所的最新评估，截至 2018 年，张家口 TFEC 中的可再生能源比例已达到 23%，引领了中国城市可再生能源的发展浪潮（河北新闻网，2019 年）。

除了通过快速增加装机容量，提高可再生能源发电量，该市还探索了创新措施

图 18 张家口市可再生能源目标



来源：张家口市人民政府，2016 年

以使需求侧的可再生能源使用多样化。一个关键的例子是于 2017 年制定的四方协作机制，该机制旨在运用市场原则并鼓励本地可再生能源消费，以更好地实现 VRE 资源的整合。该机制包含四方主体：政府、电网运营商、可再生电力发电商和终端用户。

实际操作中，张家口市政府与华北电网公司的子公司国网冀北电力有限公司合作，建立了一个以可再生电力交易为重点的电力交易平台。供热电力需求和保证价格将提前一个月公开宣布，以便可再生能源发电厂参加。注册交易将直接在卖方（生产实体）和买方（终端用户）之间进行。电网公司已大幅降低了输电费用。

最初在 2017 年，该机制主要针对市区的住宅部门，2018 年其范围扩大到其他终端使用部门，包括电解制氢、2022 年冬奥会相关的数据中心和设施以及农村地区家庭。由于输电费用的降低及发电商电价打折，终端用户可以享受低至 2.2 美分/kWh 的费率，这相当于集中式燃煤热电厂的供热成本。

2018 年 11 月以来，这种创新的商业模式已扩展到张家口以外的其余京津冀地区。到 2020 年，预计四方协作机制下的交易量将达到 3000 GWh，为 2000 万 m² 的建筑提供室内供热。

取得初步成功之后，市政府正在着手制定长期的能源转型目标，与该市为其他经济和工业部门制定的战略目标保持一致。

2.6 改善能源系统性能的关键短期行动

为了增加可再生能源的使用，张家口确定了短期内可执行的以下关键措施。

改善电网运营的灵活性

尽管弃电问题相比几年以前已经得到缓解，但它仍然是一个潜在的挑战，这主要是由于风力和太阳能发电系统的持续快速部署、输电能力不足以及燃煤电厂的高产。

寒冷冬季的供热对张家口至关重要，燃煤热电联产在其中发挥着重要作用。这限制了燃煤热电联产冬季为电网供电的灵活性。如果没有这一限制，根据需要，热电联产工厂中的许多机组可以压缩至满负荷容量的 50% 左右。其中一些机组，例如大唐国际张家口热电有限责任公司的机组在技术上可以更进一步，但这要以更多地排放当地环境主管部门持续在线监测的传统污染物为代价。因此热电联产工厂无法使用此方案，这也造成燃煤热电联产工厂保持高位运转。

为解决该问题，国家能源局已要求所有燃煤热电联产工厂进行技术改造，既增强灵活性，又不影响性能¹⁶。目标是到 2022 年完成技术改造。接下来将部署监测系统以追踪运行时间及其在增强电网灵活性以消纳更高比例的 VRE 资源中的作用。

改善电网运营灵活性的另一项措施是电力供热方案。有蓄热功能的高效电加热器已在张家口稳步部署。该方案更适用于建筑群，尤其是新住宅区。

16 这是通往以可再生能源为主的未来能源系统的解决方案。

同时，改造也是针对现有建筑物的一种可选方案。这两种方案在张家口都得到了应用。除了集中式方案，如果单体空气源热泵的运行可以中断，则这是另一个充满前景的方案，不仅在技术上可行，还可以得到经济补偿。张家口计划到 2021 年安装 10 万台空气源热泵机组。

未开发潜力 - 废弃物能源

热电联产工厂可循环利用的废物能源为提高能源系统的整体效率提供了新的潜力空间。据粗略估计，张家口市一家热电厂的能源输入中约有 20% 从冷却系统中流失。表 5 列出了张家口热电联产工厂可回收废弃能源的预估潜力。

到 2021 年，将对三家工厂（两家大唐工厂和一家宣化工厂）中的五台机组进行改造，以使余热回收在技术上可行。

其他设施中也有废弃的热能，例如工艺过程和数据中心。张家口盛华化工厂已经确定了一些技术方案，以期到 2021 年收集、传输废热能，为 250 万 m² 的建筑提供室内供热。同样，涿鹿水泥厂也已经确定了利用可再生废物能源为 100 万 m² 建筑提供室内供热的潜力。

位于张北县、宣化区和怀来县的多个数据中心正计划安装热泵，以利用数据服务器中的加热器在未来几年内为 700 万 m² 的建筑提供室内供热。

表 5 张家口联合热电厂废物回收利用的能源潜力

热电联产工厂	废物能源潜力 (MW)	室内供热潜力 (m ²)
大唐徐家庄	154	2 960 000
大唐沙岭子	1 460	28 080 000
宣化 CHP	154	2 960 000
怀安 CHP	336	6 460 000
魏县 CHP	1 148	22 080 000

来源：张家口市人民政府



3. 到 2050 年建设低碳张家口的战略路径

要点

- 城市能源转型是全球趋势，城市在全球气候变化中发挥着核心作用。中国正在加快使城市能源系统脱碳的步伐。
- 随着可再生能源被明确定义为该城市的主要竞争优势，张家口未来能源系统将向绿色和低碳系统转型。
- 电气化和电解制氢是张家口到 2050 年成为低碳城市的两条重要技术途径。除了可再生能源发电，其他因素例如区域电网和储能也在转型过程中起着至关重要的作用。
- 由于张家口已经积极采取措施升级当前产业部门，因此，城市能源系统规划必须与产业部门发展进行战略性协调，以确保可再生能源尽可能满足新的能源需求。
- 政策和市场创新可充分发挥作用，为先进技术和系统的开发和应用以及全新商业模式的建立创建健康的生态系统，以实现可再生能源的高比例使用，从而使张家口到 2050 年成为低碳城市。
- 张家口市具备实现低碳能源未来的巨大潜力。更重要的是，它可以触发范式的改变，成为中国其他城市寻求规划 2050 年低碳道路的榜样。

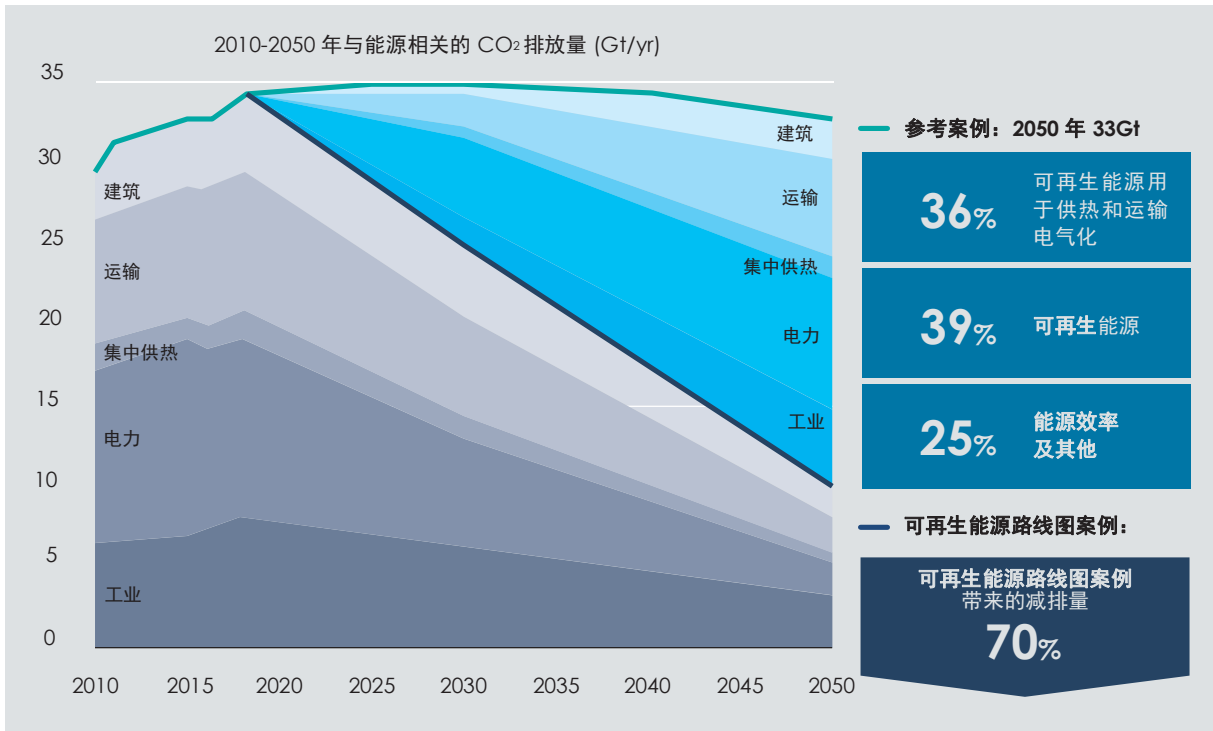
3.1 低碳城市：全球和国家视角

自 2015 年通过《巴黎协定》以来，尽管可再生能源的使用比例有所增加，能源效率也有所提高，但全球碳排放量仍在继续上升（Jackson 等人，2018 年）。各个方面都感受到了气候变化带来的影响，包括城市夏季异常炎热或冬季异常寒冷，这反过来刺激了室内温度调节对能源的更大需求。为了达到全球气候目标，脱碳计划必须加快发展，使其超过能源增长速度，与参考情景相比，到 2050 年，需要将能源相关排放量到大幅减少 70% 以上，以将全球温度升高水平限制在 2°C 以下（图 19）。分析表明，可再生能源和能源效率措施与深层电气化相结合，可在未来三年内实现减排目标的 90% 以上（IRENA，2019 年）。

城市必须在缓解全球气候变化方面发挥核心作用，部分原因在于，城市是全球碳排放的主要来源之一。从全世界来看，城市在全球最终能源消费中所占比例为 67-76%，在能源相关的 CO₂ 排放中所占比例为 71-76%（Seto 等人，2014 年）。更重要的是，到 2050 年，城市将需要容纳全球三分之二的人口，具备减少各种排放的巨大潜力。

为了实现这种潜力，现在需要在城市层级采取变革行动。以集中发电或分布式发电的形式为城市提供可再生能源有助于解决错综复杂的气候和能源挑战、赋予城市更大的能源独立性和安全性、同时创造经济引擎和社会效益，例如提供就业机会。

图 19 2050 年全球能源相关碳减排量：
当前规划 vs. 能源转型



参考案例 = 当前政策和规划设定的路径

可再生能源路线图案例 = IRENA 加快可再生能源使用的能源转型路线图 来源：IRENA，2019 年

这将创造新的机会，鼓励创新的解决方案以应对城市能源挑战，同时也为可持续的经济和社会发展提供新的动力。新兴的城市智能技术可改善通信，大数据分析使人们以前所未有的精确度识别网络能源基础设施中的能源使用决策模式。基于这些数据，即使在家庭层面，集成和管理可再生能源系统也将变得更加简单和可行。

全球范围内越来越多的城市致力于通过设定碳减排目标、提高公众的低碳未来意识、制定有利于清洁能源发展的政策以及分享成功经验来促进全球能源转型。全球约 2165 个城市签署了 2030 年排放量相比 1990 年减少 40% 的承诺，还有 200 多个城市设定了 100% 可再生能源目标（文本框 2）。

过去半个世纪以来，中国的城市化进程快速发展，规模空前。然而，帮助数百万人实现脱贫的运动也大大增加了城市能耗，同时恶化了城市及周边地区的环境。目前，城市居民占中国 14 亿人口的 60%。由此产生的挑战使中国来到了能源和环境安全的十字路口。中国正在考虑保持不间断的城市化进程，在未来三十年再增加 2.55 亿城市居民（UN DESA，2015 年）。

认识到需要加强能源效率、扩大可再生能源的使用、减少环境影响并建设宜居的新兴城市，中国发起了一系列国家计划，鼓励城市制定具有前瞻性的城市能源发展战略并采取积极行动，迈进低碳和清洁的能源未来。

文本框 2 100% 可再生能源：以瑞典马尔默为例

瑞典马尔默市制定的目标远比国家计划（到 2020 年实现 50% 的可再生能源使用比例）和欧盟的国家目标（到 2020 年实现 49% 的可再生能源使用比例）更宏大。该市目标是让本地生产的能源比例尽量大。到 2020 年，预计马尔默的温室气体排放量相比 1990 年最低将减少 40%，并且有望实现气候中和，这为所有市政运营在 2030 年之前使用 100% 可再生能源的道路奠定了基础。

该市确定了一系列可持续能源使用行动，并准备将其付诸实施：

- 确定太阳能光伏和太阳能系统、水电、风能和沼气的可衡量目标；
- 调查并提高马尔默边界内生产的可再生能源比例；
- 为建筑领域低能耗设计和本地可再生能源生产建立试验区；
- 鼓励就建立热气化、风能和其他形式的可再生能源工厂制定明确的国家规则；
- 提高马尔默地区供热中的可再生能源比例。

实现全市 100% 的可再生能源使用目标还要求马尔默的运输系统完全电气化。该市发起了一系列活动以减少交通运输部门的碳排放，包括制定新的环保汽车战略，使用沼气、氢气或电力（包括插电式混合动力车）逐步淘汰 ICE 车辆；推广自行车的使用；开发新一代的清洁能源充电/加气基础设施。

马尔默在交通运输部门的行动和指标反映出该市设立的高于国家级别目标。瑞典的目标是到 2020 年交通运输部门实现 10% 的可再生能源比例，到 2030 年实现无化石燃料运输部门。

来源：IRENA 等，2018 年

必须从整个系统的长期角度提出解决方案，同时也要不断拥抱技术和商业模式的创新，不断打破传统做法。城市能源转型战略在引导城市通往低碳未来方面至关重要。

在实际操作中，城市有三种减少碳足迹的方法，其最终目标是将主要以化石燃料为主的能源系统转变为可再生能源支持的系统。首先是引进可再生电力和其他形式的能源商品等能源载体；第二种是利用城市范围内的资源在本地生产可再生能源；第三种是将两种方案结合。

为了实现未来的低碳能源系统，仅仅电力系统脱碳是不够的。城市还必须利用部门耦合方式以及诸如电动车和热泵等不同使能技术，将非电力终端用户与电力部门联系起来。能源效率和能源节约也在其中发挥着重要作用。此外，为了确保能源安全，重要的是使能源多样化，避免将能源生产限制于少数几种技术之中。

低碳城市可引进可再生 能源载体或在本地 生产可再生能源

3.2 能源前景：分析见解和讨论

为了评估张家口能源转型的前景，EnergyPLAN 模型被用来对三个目标年 2022 年、2035 年和 2050 年进行分析（图 20）¹⁷。该模型涵盖了电力、天然气和热能供应以及运输、建筑和工业等终端使能部门，对城市综合能源系统进行技术和经济分析。能源系统与终端使能部门的耦合对于挖掘替代能源技术的潜力起着重要作用，其中包括更高比例的波动性可再生能源使用。利用装机容量和可再生能源的可变性模拟能源生产，同时，根据不同的能源模拟战略分析了不同能源载体、转换器和存储类型之间的相互作用。

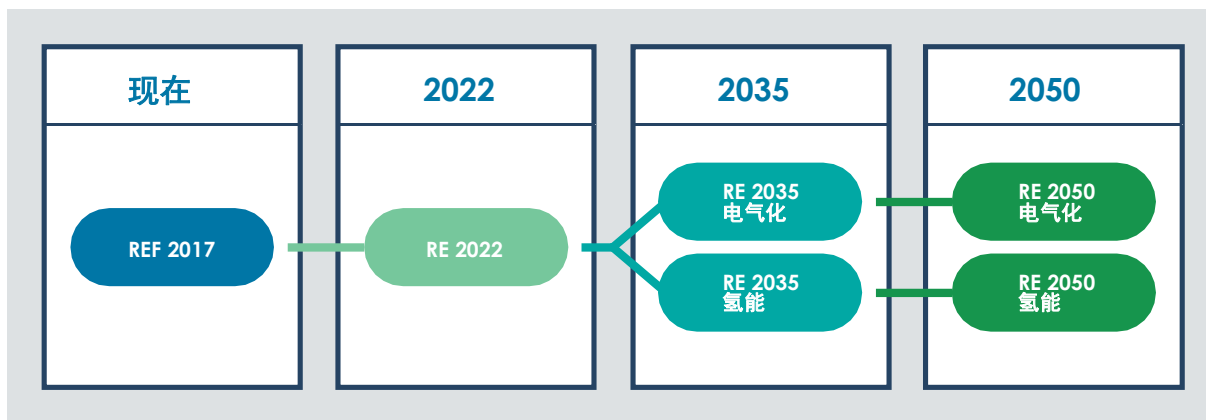
根据选择的以下技术分析，运行基于规则的优先模拟：热能和电力的负荷和供应平衡，同时最大程度地实现可再生能源的集成和利用，避免严重的电力生产过剩。优先考虑可再生能源潜力、当前能源需求和预测的时间序列，以说明 VRE 系统在未来能源供应情景中的间歇性。

本节介绍了关键的建模结果。根据这些结果和适用假设，尤其是技术途径的相关选择建立了一系列情景。接下来是围绕可能出现的主要潜在挑战及它们对推动市级能源转型过程中动力的影响所进行的讨论。

对于 2022 年，重点是支持实现 2022 年冬奥会设定的低碳目标，张家口可再生能源使用比例上升的程度。为此，张家口已经做出了强有力的政治承诺和大量投资。本研究探索了可以应用于增加张家口可再生能源比例的技术组合，以帮助其实现低碳目标。

对于 2035 年，重点是氢能和电气化的两种替代情景，分别结合正常情景设想提供了一些见解，表明了选择不同的关键技术途径对塑造未来能源格局的影响，以及部署储能等使能技术的益处。

图 20 基于 EnergyPLAN 模型的情景概述



来源：IRENA 分析

¹⁷ EnergyPLAN 是由丹麦奥尔堡大学开发用于国家或区域能源规划分析的软件，该软件经过了超过 76 篇国家级或州级发表文章的同行评审（Østergaard, 2015 年）。

由于 2050 年距现在的时间跨度较远，因此模型结果具有更大的不确定性。2035-2050 年期间很可能出现目前无法预见的更先进技术。尽管如此，EnergyPLAN 中的技术仍具有前瞻性，包含许多未来的清洁能源方案。

但是，地方当局为制定具体的行动计划而对结果进行解释时，应考虑该模型的局限性。由于这些局限性，分析结果主要用作围绕城市到 2050 年可能实现低碳未来的方向进行战略讨论的基础，而不用于量化 2050 年的能源结构。

参考年份描述：2017 年

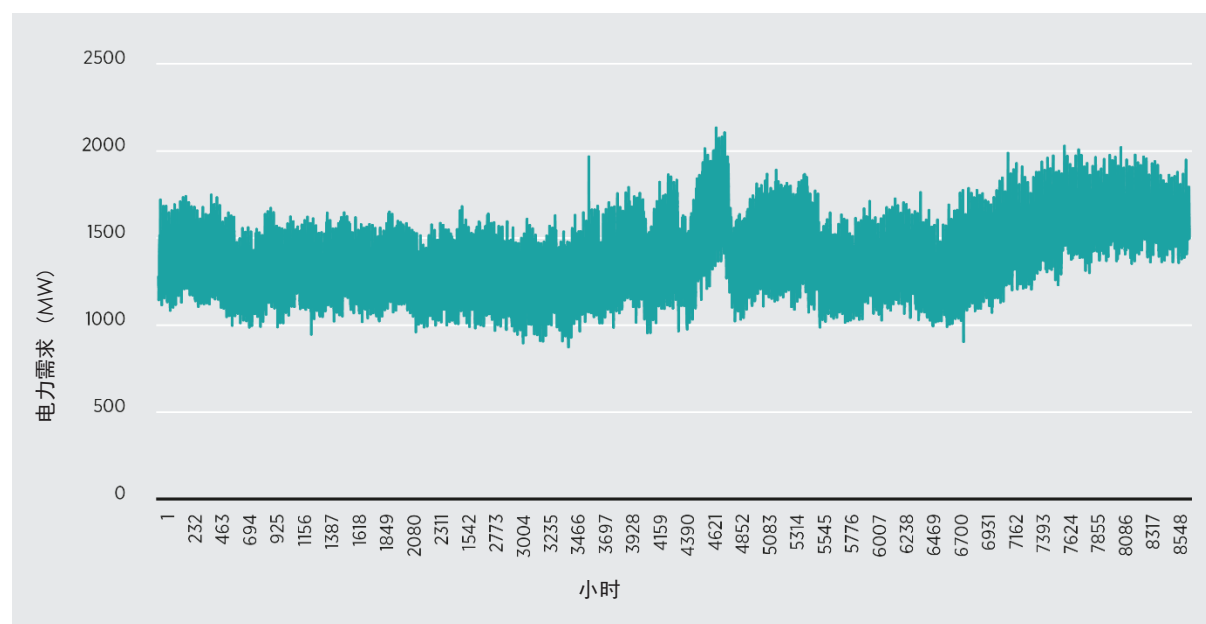
选择 2017 年作为本研究的基准是因为需要为模型运行提供一组相对完整的数据，以及帮助形成分析见解的信息和文档。已有的数据集被用于生成模拟的每小时电力负荷和热能负荷（表 6 和表 7 以及图 21 和图 22）。其他相关数据可在第 2 节中找到。张家口市将本地生产的大部分电力外送到包括北京在内的周边地区。因此，情景分析中保留了这种巨大的电力输出潜力，该市将来可能成为潜在的大型可再生能源输出地。

表 6 2017 年张家口市用电量

描述	基础情景 (2017)	单位
电力消费	14.69	TWh/年
固定电力外送	31.01	TWh/年
电动运输	0.58	TWh/年
电力供热（家庭）	0.38	TWh/年
电热泵（家庭）	0.1	TWh/年
总电力	46.76	TWh/年

来源：IRENA 分析

图 21 2017 年张家口市用电量参考



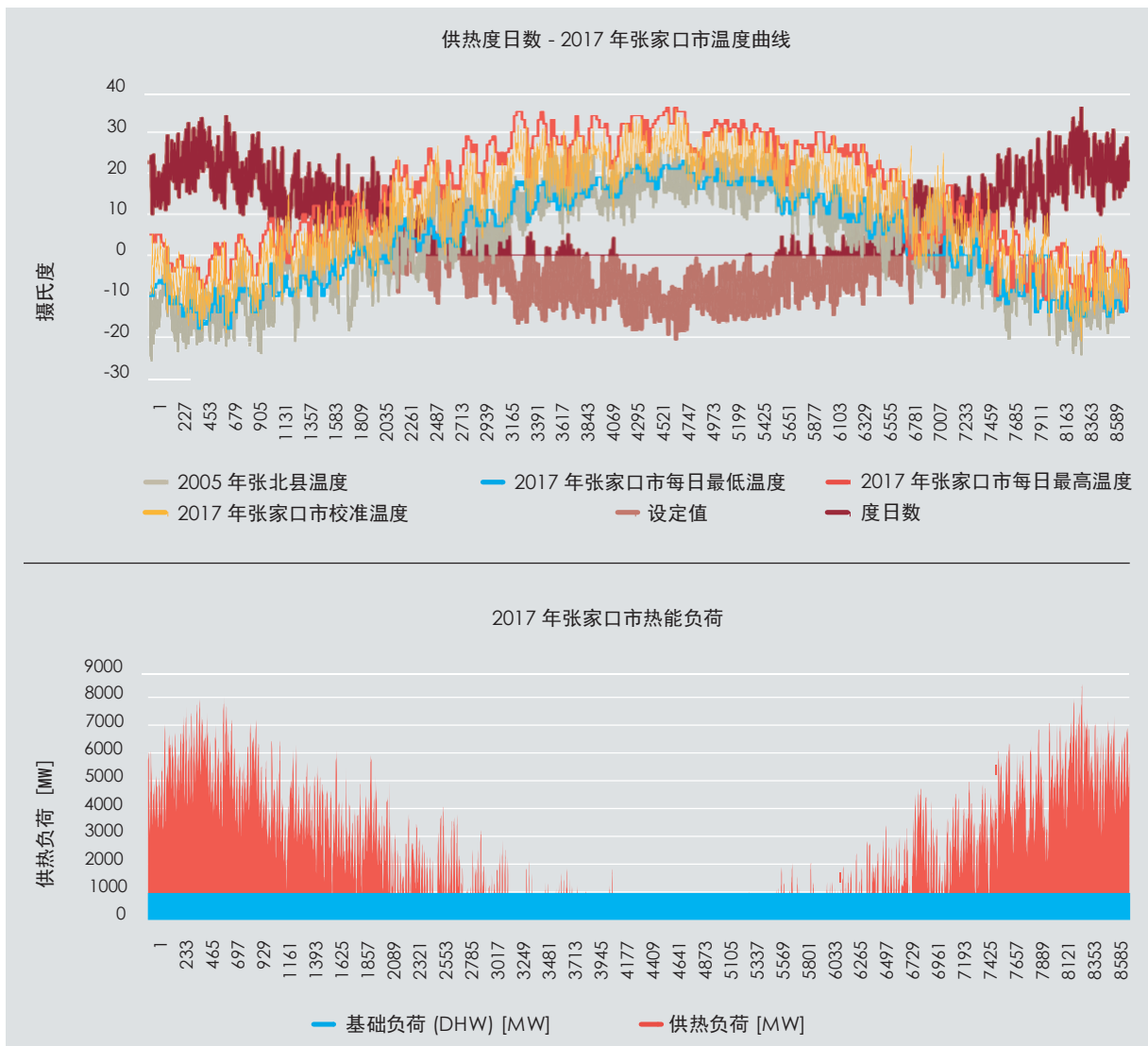
来源：IRENA 分析

表 7 2017 年家庭装置和集中供热网络的热能消耗

热能需求	描述	基础情景 (2017)	单位
家庭			
	燃煤锅炉	5.6	TWh/年
	太阳能蓄热容量	1.6	TWh/年
	天然气锅炉	0.23	TWh/年
	生物质锅炉	0.23	TWh/年
	热泵	0.3	TWh/年
	电力供热	0.38	TWh/年
集中供热		14.63	TWh/年
总计		22.97	TWh/年

来源: IRENA 分析

图 22 2017 年供热度日数和平均温度



注：室内供热的热能负荷变化已基于张家口市的总负荷测量值进行校准。

蓝色表示家庭热水的基本负荷。

来源: IRENA 分析



使用 EnergyPLAN 模型基于 2017 年数据进行模拟，以验证模型相较于实际数据的准确性。模拟结果在可接受的误差范围内，如表 8 所示。对于虚拟可再生能源，应用校正因子来考虑运行期间理论效率与实际效率之间的差异，这同时也反映了张家口的弃电率。

2022 年能源情景描述

目前，张家口的工业部门仍以能源密集型工业尤其是钢铁部门为主。除了关闭宣钢的高炉（可能于 2022 年冬季奥运会之前实现），短期来看很难预测出会发生任何重大改变。如前所述，可预见的另一重大变化是为奥运会安装更多的可再生能源装机容量。

鉴于这两个主要假设发生的可能性很高，以及到时可能发生重大变化的其他因素，我们仅在 **RE_2022 情景中描述 2022 年能源前景**（图 23）。¹⁸ 该情景建立在以下三个主要因素之上：可再生能源，尤其是风能和太阳能光伏的增长；工业能源负荷减少 42%¹⁹（归因于宣钢厂的停产）；使用电力来满足剩余负荷的一半。

到 2022 年底，可再生能源比例可能达到 47.7%，这表明该城市极有可能实现 2020 年可再生能源目标。工业能源负荷的减少在其中发挥了重要作用。为了进行分析，我们还做了一个带有质子交换膜的水电解槽模拟，该模拟中，用可再生能源生产氢气的效率为 72%（Mathiesen 等人，2013 年）。以性能系数 (COP) 3 建模的热泵也有助于提高可再生能源比例。

表 8 2017 年张家口已安装系统的实际电力产出 vs. 模拟总供电量

发电	2017 年供电量 (TWh)	模拟供电量 (TWh)	校正因子差异 [%]
燃煤电厂	23.42	24.80	+5.7%
风能	17.27	17.26	-1.08
太阳能光伏	1.61	1.61	-4.2
CSP	-	0.02	-
生物质发电	0.09	0.09	-
总计	42.39	43.78	+3%
总计		22.97	TWh/年

来源：IRENA 分析

¹⁸ 注意，一次能源在 EnergyPLAN 中定义为能源载体。

¹⁹ 实际导致的损失需要根据可能发生的电弧炉替代情况确定；任何情况下，高炉的关闭都将极大降低负荷。

氢气驱动的微型热电联产工厂是另一个重要的技术模型，其热能效率约为 50%，电力效率约为 30%。

在此情景下，工业部门到 2022 年将采取一项重大措施减少城市的煤炭消耗、改用更清洁的燃料从而大幅降低负荷。但是，这并非唯一的影响因素。使用清洁技术的住宅和运输部门也发挥着重要作用。据估计，如果当地政府加快部署，重视项目审批流程并保持对总体规划和安全的必要监督，张家口可开发高达 2 万吨的年制氢能力，以满足 3000 辆氢燃料车的需求。

2035 年能源情景描述

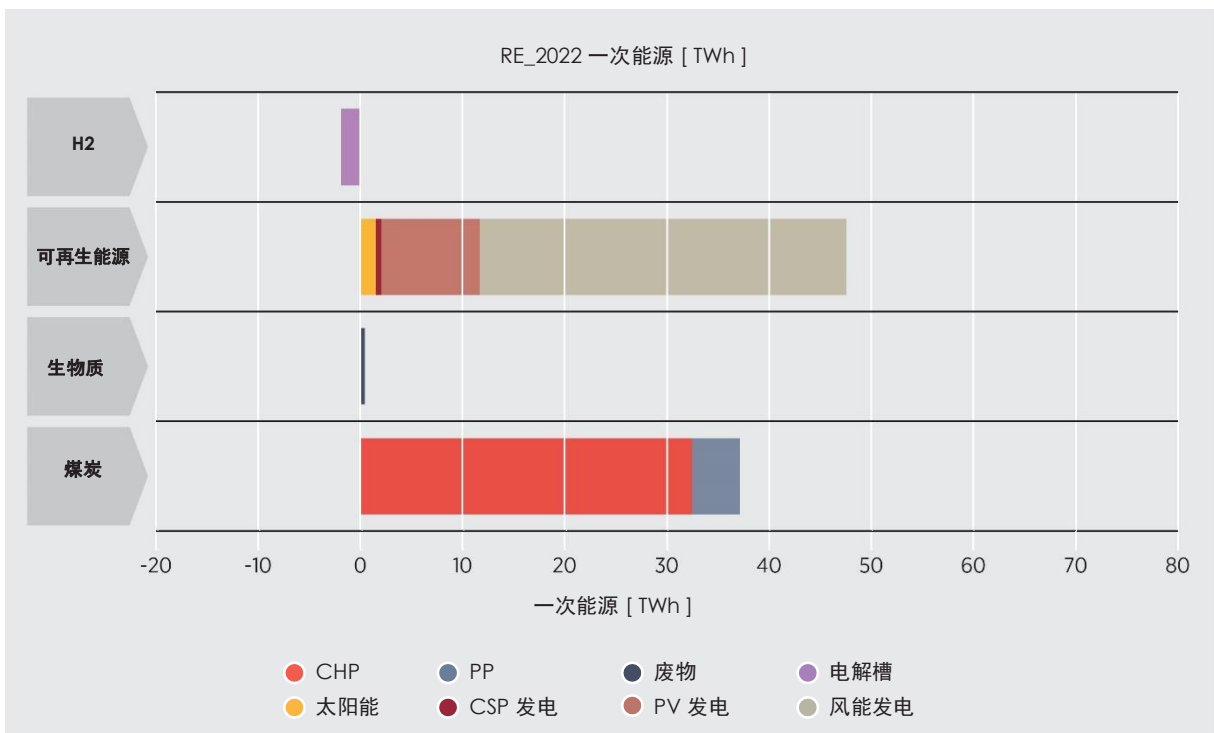
2035 年的情景分析将政府设定的 2030 年目标考虑在内。鉴于 2035 年情景与 2030 年目标密切相关，因此我们对其进行了格外谨慎的研究，并与当地专家讨论产生了更多见解。

随着当前可再生能源的快速增长，如果现有计划能够充分执行，则可以合理预期政府的总体目标将会实现。但是，该市是否可以实现工业部门 100% 的零碳排放并完全淘汰基于化石的运输燃料还需另外讨论。

这项研究展示了 2035 年的两种高级情景，以及与 2030 年目标基本一致的“常规情景”设想。分别强调电气化和氢能的两个高级情景可实现更高比例的可再生能源。

图 24 呈现了 RE_2035 电气化情景，电力的作用在该情景内得到增强。在这种情景下，所有非电力终端使用部门的电气化，尤其是扩大电动车规模应该是 2017-2035 年的主要趋势。对于工业部门而言，部门耦合技术将使用电量增加 20%。

图 23 2022 年可再生能源发电量



来源：IRENA 分析

根据常规情景，住宅部门中独立/单体热泵的使用可能会增加 1% 到 22%，而集中供热系统中可能会采用大型热泵，预计将覆盖该地区近 60% 的热能需求。²⁰

中国最近在建筑的节能绩效发展方面加快了步伐，将 2016 年设定的能耗标准减半，为全新建筑制定了接近零的能耗标准。同时，在财政部的财政支持下，建筑改造正在进行。

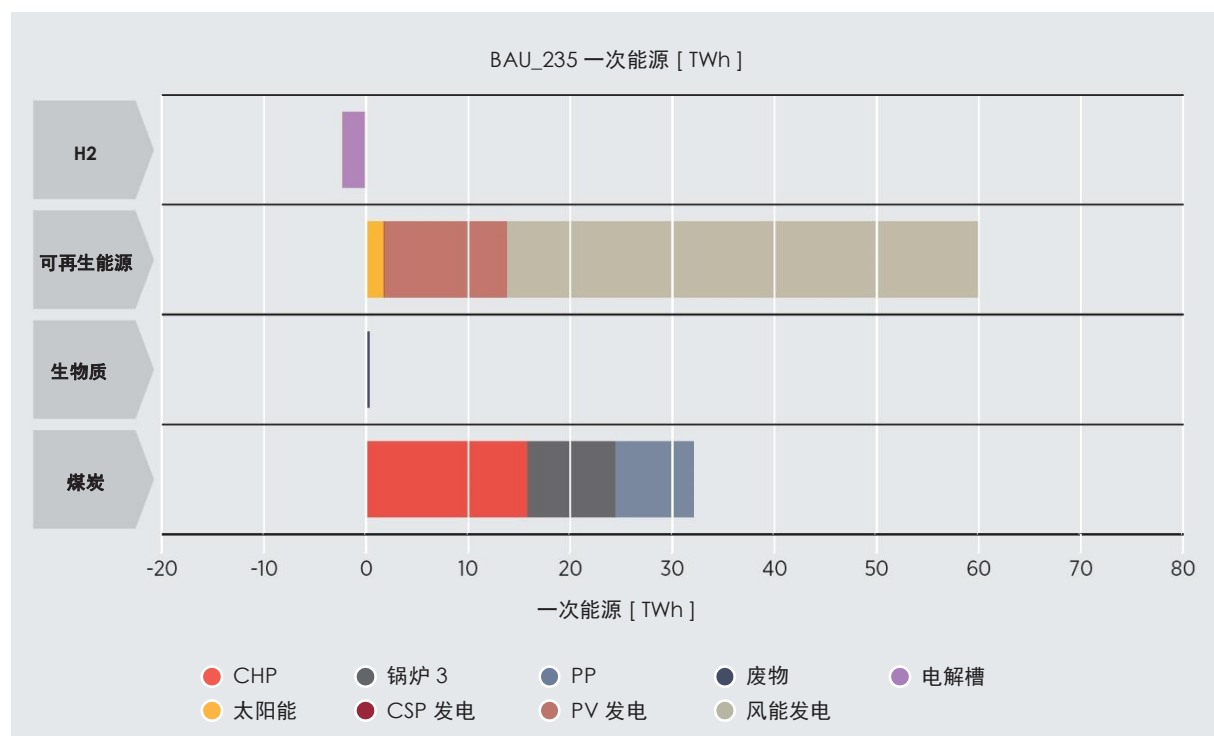
鉴于采取了这些措施且张家口的建筑存量相对较少，到 2035 年，建筑的热能需求可比常规情景减少一半，降至 45 kWh/m²/年，这同时也为未来城市提供了目标值。这是朝着 30 kWh/m²/年迈出的积极一步，被认为是寒冷气候区被动式建筑的国际值（被动式房屋研究所，2015 年）。反过来，建筑物节能绩效的改善将使热泵的使用在技术上变得可行。

在发电方面，风能仍然占据最大比例，其次是太阳能光伏，而 CSP 和生物质发电则可以忽略不计（图 25）。如果电器和其他技术能够按照预期发展，则可再生能源比例可能会从常规情景下的 53% 增至 75%。

在该情景下，运输部门电气化将几乎消灭运输部门的化石燃料需求。受充电基础设施的制约，电动车占比的变化幅度可能为 10%。车辆到电网 (V2G) 提供的辅助服务会带来经济效益，因此智能充电将促使更多地采用电动车。反之，这也有助于将波动性可再生能源整合到电网之中（IRENA, 2019b）。

但由于中国大多数城市居民居住在多户住宅或高层建筑中，无法使用可与充电设施相连、属于自己的停车场，因此其影响不如拥有车库的独户住宅城市/国家/地区，后者可更加方便地安装自己的充电设施。

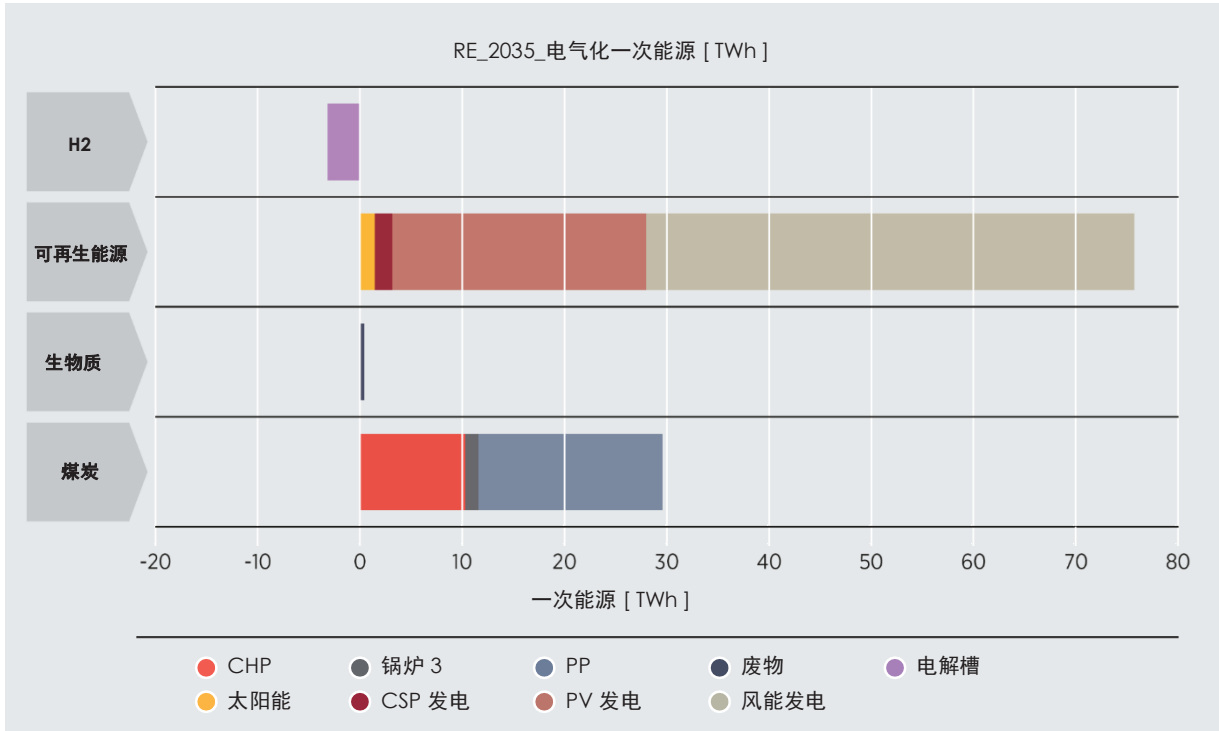
图 24 2035 年可再生能源发电量：正常情景



来源：IRENA 分析

20 2017-2035 年期间该地区的集中供热网络覆盖率几乎翻了一番，这在常规情景和其他高级情景中都会发生，因为这与城市化和中心建筑环境中的人口密度相关。

图 25 2035 年可再生能源发电量：电气化情景



来源：IRENA 分析

此情景下的不确定性之一是寒冷气候下空气源热泵的性能。空气源热泵是该区域当前使用的主要技术。

在正常的室外温度下 COP 可能会达到 3-5，而在寒冷的冬天可能会降至 2 以下，此外，这还取决于室内和室外温差（Zhang 等人，2017 年）。这种情况下需要备用供热系统，大多为电加热器。即使使用可再生电力，这也会降低系统总体效率，进而削弱经济意义。一种解决方案是提高热泵安装标准、系统配置以及创新技术，以便即使在寒冷气候地区也能达到理想的 COP（IEA，2017 年）。

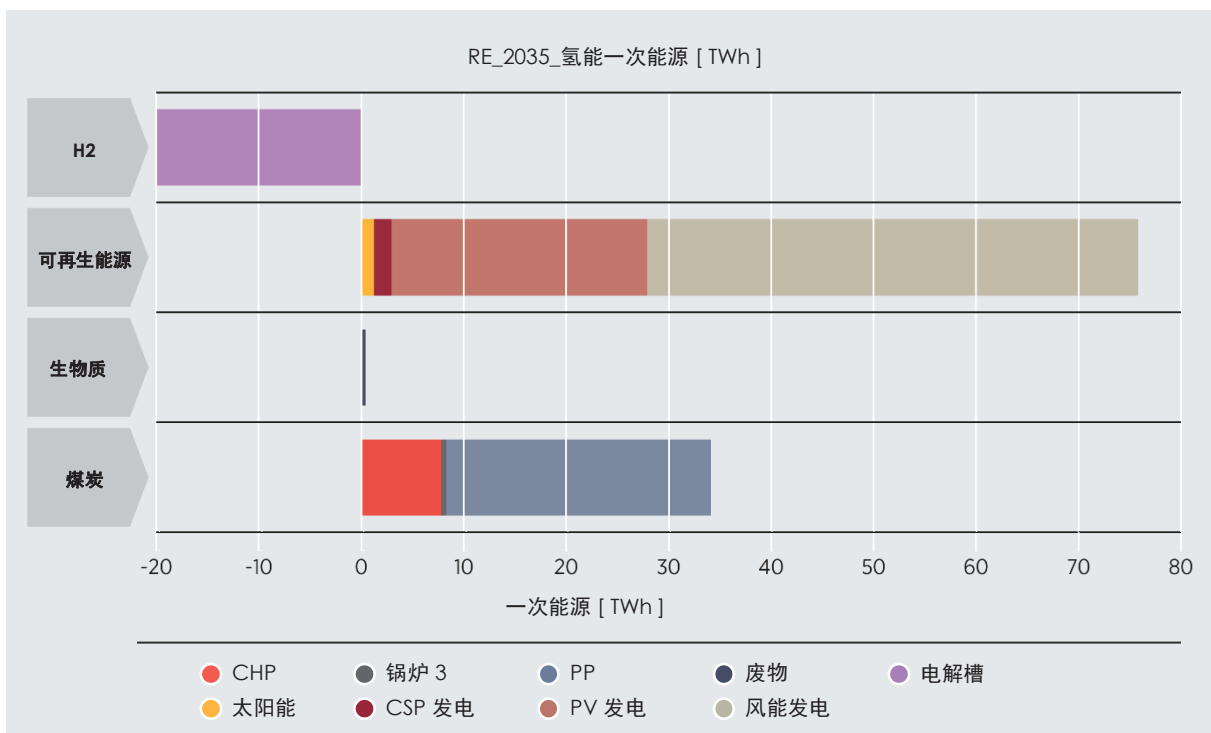
RE_2035 氢能是另一种高级情景，这种情景源于可再生能源制氢技术日趋成熟及其终端使用部门应用的日益多样化（IRENA，2018 年）。图 26 显示了 2035 年该情景中一次能源生产的能源结构，该结构更多地将氢气作为首选能源载体。

市政府对于氢能这一战略领域充满了热情，并且已经在基础设施开发和应用多样化方面做出了巨大努力。

早在 2018 年，张家口就已成为氢气驱动公交车和所需基础设施发展方面的领先者。通过望山工业园区和沽源县两个规模较大的试点项目，张家口市已通过可再生能源供电的电解槽建成了高达 2300 吨/年的氢气累计生产能力。在生产、道路运输、存储安全以及加气站运营方面获得的此类早期经验再加上不断提高的研发 (R&D) 能力，将加速氢燃料电池技术的创新和张家口各个行业中氢应用规模的扩大。

预计该市氢能的快速发展趋势将持续到 2050 年。该情景的关键特征是将氢气作为替代汽油和柴油的运输燃料。到 2035 年，氢气有望满足运输部门能源总需求的 21%。

图 26 2035 年可再生能源发电量：氢能情景



来源：IRENA 分析

氢能情景还提出了一种技术方案，即通过注入集中供热网络或微型热电联产网络供热。到 2035 年，氢气将满足 15% 的总热能需求。此外，分配给天然气的 9% 供热需求将由 CO₂ 氢化产生的电燃料代替，这与北京推广碳捕获与封存技术发展计划相吻合。

工业部门有望使用氢气的领域之一是钢铁制造，氢气将用作还原剂，代替传统技术中使用的焦煤。随着可再生能源发电成本竞争力不断提高，这种技术途径将带来更好的经济意义及可观的环境效益，例如能源密集型行业的碳减排。（IRENA, 2019c）。到 2035 年，张家口 21% 的氢气将用于工业用途，这相当于工业部门预计需求的 10%。

2050 年能源情景描述

2050 年张家口能源格局将受到全国长期能源前景的影响。根据《中国可再生能源展望 2018》中低于 2°C 情景的预测，到 2050 年，电力将成为 TFEC 的主要能源载体，占 TFEC 的 53%，相比 2017 年的 23% 翻了一番还多，而可再生能源所制氢气将占 TFEC 的 6%（CNREC, 2018 年）。

在张家口充分利用城市丰富的可再生能源潜力进行能源系统脱碳的过程中，电力和氢气至关重要。

在此背景下，根据上述 RE_2035 电气化和 RE_2035 氢能情景进行情景设计，以保持某种程度上的一致性。值得注意的是，尤其是对于像中国这样的国家，如此长的时间跨度内一定存在较大程度的不确定性，与之前的分析相比，2050 年的情景可能没有那么具象化。

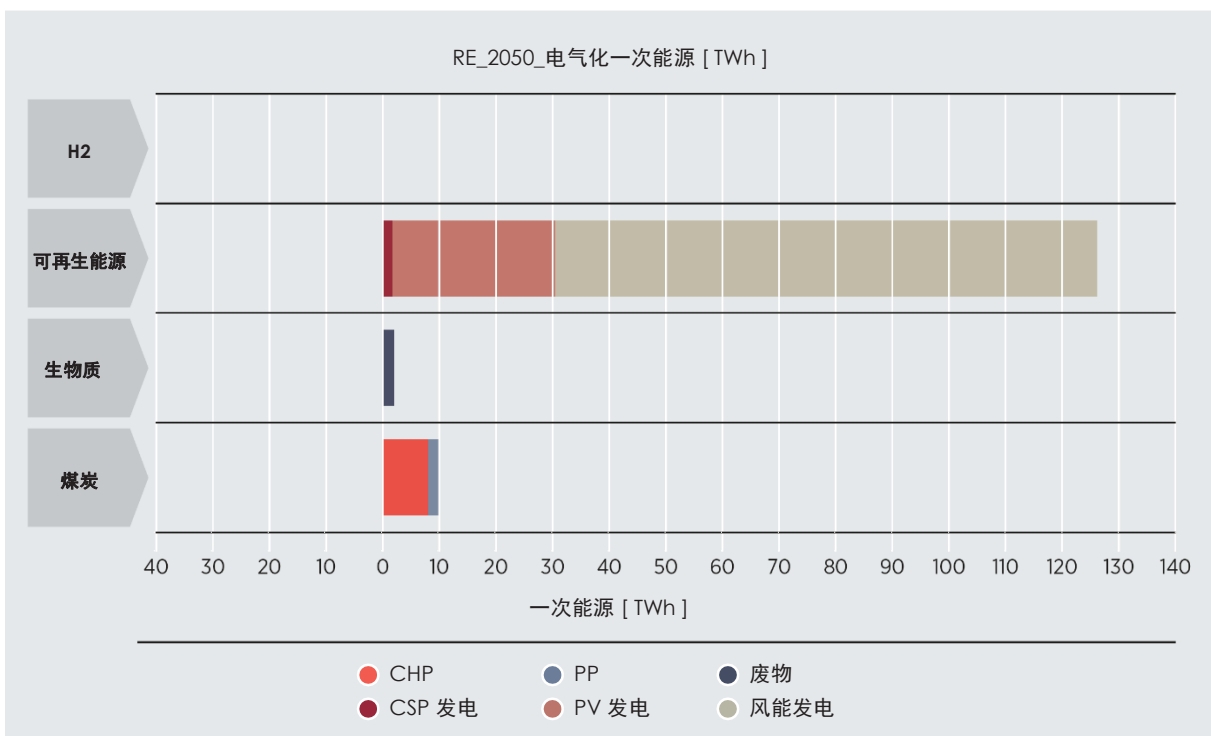
在 RE_2050_电气化情景中，工业将完全电气化（图 27）。这是完全可行的，部分原因是张家口逐步淘汰了能源密集型工业，降低了工业能耗。30 GW 的太阳能光伏和 40 GW 的风能潜力将得到充分应用，同时更多地使用包括季节性储能等储热以及其他使能技术，例如电动车智能充电以及使用更高比例的 VRE 资源稳定电网。到 2050 年，约 93% 的能源将由可再生资源以电力、热能和可再生氢气的形式提供。

鉴于城市化趋势将继续延续，城市人口将生活在更加密集的环境之中以便从共享经济和更高的资源效率中受益，到 2050 年，集中供热网络规模将得到扩展，

以满足 74% 的总供热需求。生物质、地热和太阳能热能与大型热泵相结合，通过集中供热网络为终端用户供热。对于因需求较低而无法通过集中供热网络供热的地区，电力供热将成为普遍方案。

与任何其他波动性可再生能源高渗透率的系统一样，系统的灵活性对于确保能源供应的稳定性和可靠性至关重要。因此，储能，尤其是作为成本效益缓冲的储热在其中发挥着重要作用。据估计，到 2050 年储热容量将有可能达到 1 GWh，除了增加能源使用方案，这还将为系统增加额外的灵活性，例如改进运营程序、电池电力存储、将电动车作为存储设备以及通过电解系统和存储进行可再生能源制氢等。²¹

图 27 2050 年可再生能源发电量：电气化情景



来源：IRENA 分析

21 如果部署存储系统，则可以根据可再生能源生产的可变电力运行电解过程生产氢气。从而更有效地管理电网负荷，同时提高可再生能源系统的容量因子。（Kroposki 等人，2006 年）

RE_2050_氢能情景展示了能源结构中容纳更高比例可再生能源的另一技术途径，如图 28 所示。

相比 RE_2050_电气化情景，可再生能源比例的增加要归因于这种情景下更高的灵活性，因为长时间内大规模的氢气存储相对具有成本效益，并且其通过电解槽的生产过程是可中断的，能够更好地与风能或太阳能生产的 VRE 相匹配。

此外，通过改进废物（包括农业废弃物）的收集和过程提供更多原料，本地生物质和可生物降解的城市固体废弃物可进一步增加能源组合中可再生能源的使用。

在此情景下，电力仍扮演着重要角色，而氢气则作为助推器帮助充分利用可再生能源潜力。

情景的成本影响

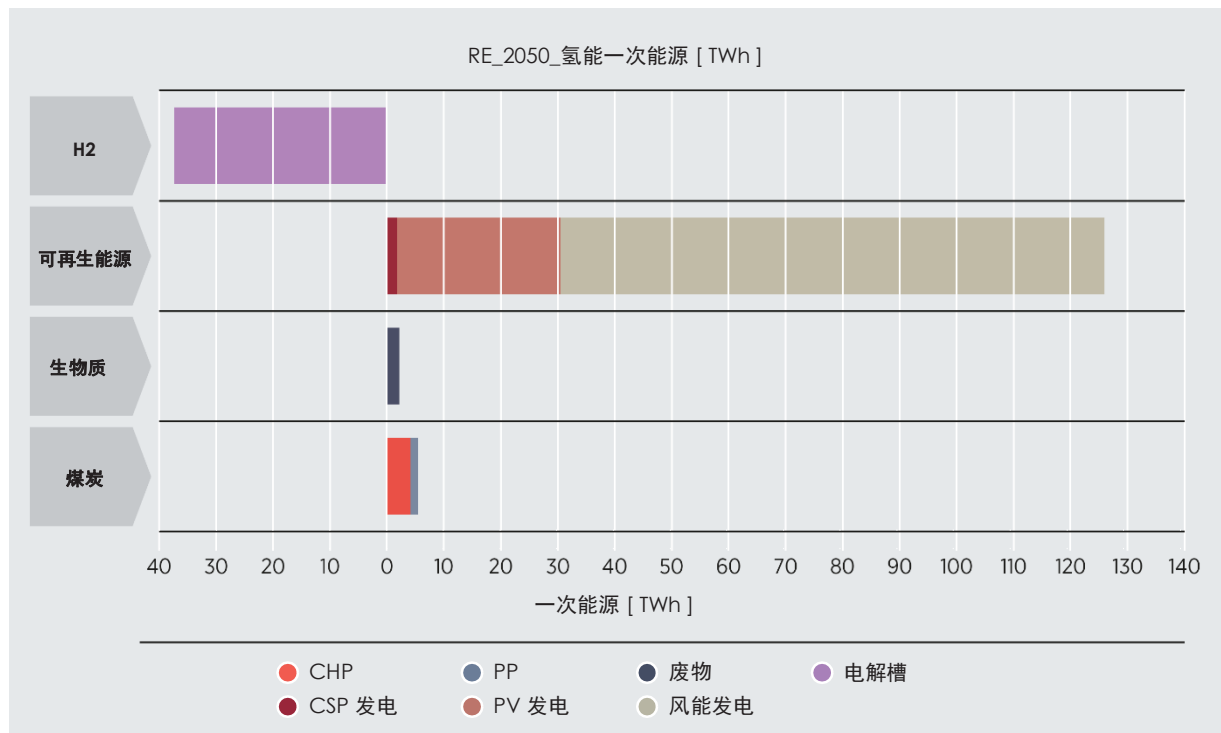
假设等效年成本折现率为 7.5%（IRENA，2017 年）。其中包括容量扩展规划和维护不同系统的投资成本。基于部署学习曲线的预计成本由于可再生能源的生产和技术改进而下降（IRENA，2019c；IRENA，2019d）。

当前，风能的装机容量大大超过了太阳能光伏的装机容量。如图 29 所示，张家口未来几年计划提高太阳能发电能力，以赶上风能发电能力。与 2035 年相比，2050 年太阳能光伏的扩展规划有所减缓，达到了专家评估的最大本地容量。

CSP 和太阳能光伏发电能力的提高可以提供更高的灵活性和供应方面的安全性

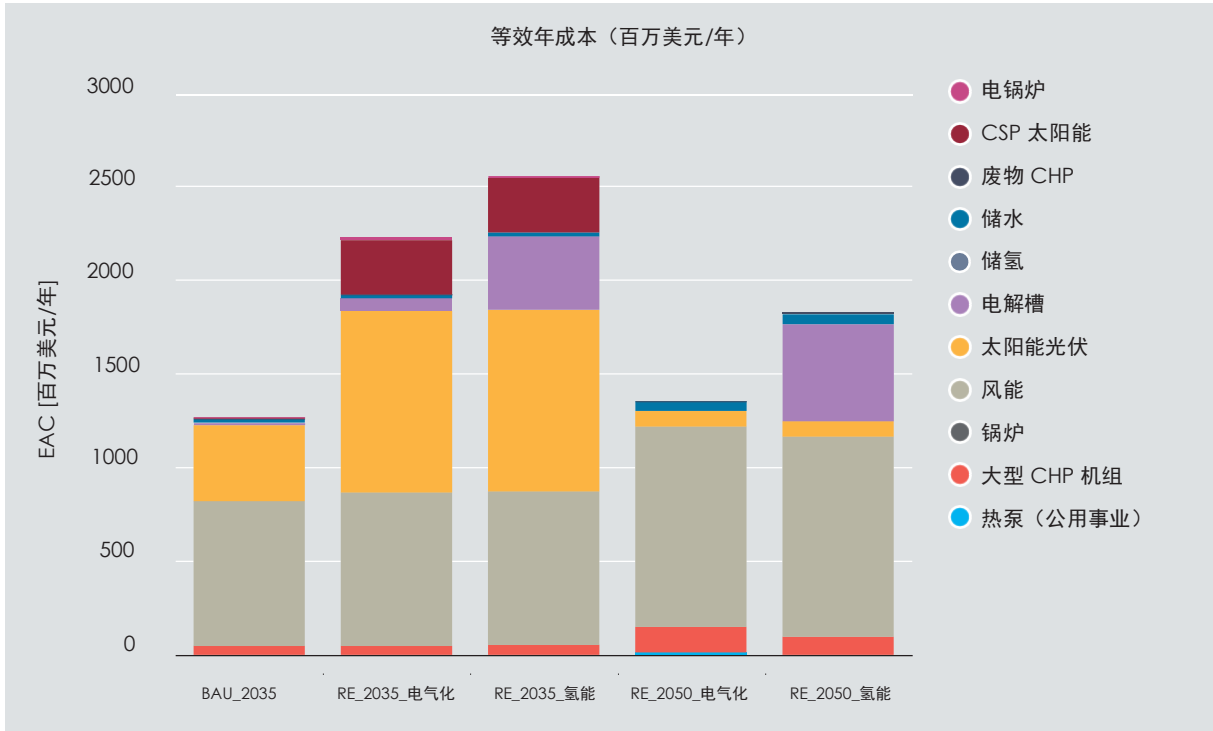
- 通过技术组合的多样化，降低主要依赖风能发电系统所带来的风险。

图 28 2050 年可再生能源发电量：氢能情景



来源：IRENA 分析

图 29 不同可再生能源情景的成本影响



来源：IRENA 分析

考虑氢能战略时成本会略有变动。但是，相较于电气化情景，燃料电池成本（由于存在较大不确定性而未进行绘制）在基于氢能的情景下（氢气作为季节性储存和缓冲）大幅降低。

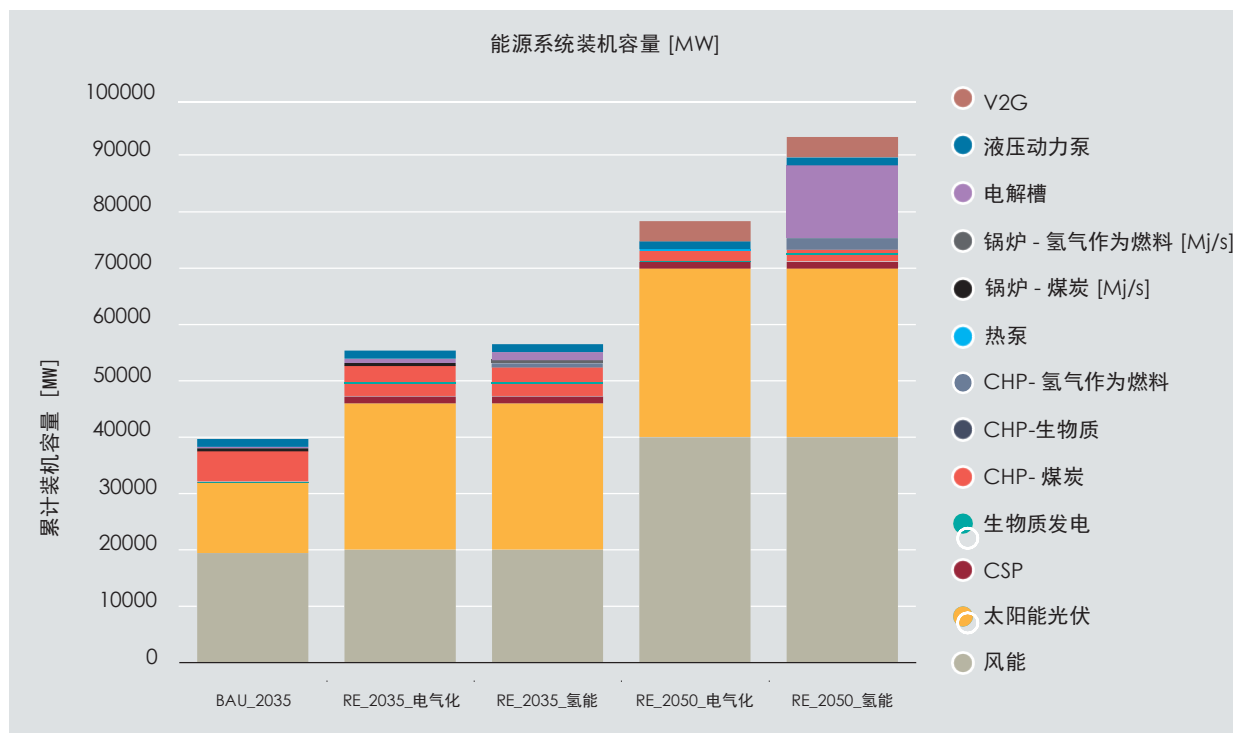
中国城市需要一种新的能源范式，使燃煤系统为波动性可再生能源、电池储能和智能电网让路

对各情景的总结

由于可再生能源被明确定义为主要竞争优势，以及产业部门随着时间推移的战略性重组对能源需求产生了重大影响，与现在相比，张家口未来的能源系统将从根本上转型。鉴于中国各级能源系统的相互联系，需要在区域（京津冀地区）和国家层面理解这种转型。

上述所有方案中，核心要素是就发电能力以及对整体能源供应和不同部门的贡献而言，本地可再生能源资源的利用程度。图 30 显示了不同情景和目标年份中能源系统的装机容量。随着未来终端使用部门电气化程度的提高，电力无疑在任何情景下都是重要的能源载体。

图 30 2035 年至 2050 年累计装机容量：张家口市的不同情景



注：V2G = 车辆到电网；CHP = 热电联产；CSP = 聚光太阳能热发电；PV = 太阳能光伏 来源：IRENA 分析

然而，当主要通过 VRE 发电时，储能和其他使能技术将变得至关重要。

如果功率密度和储电规模在技术上未发生预期的革命性突破，则其他形式的能源载体（例如氢气）将在塑造未来能源格局中发挥重要作用，这在氢能情景中已有所反映。对于张家口而言尤其如此，张家口已经在中国的氢燃料电池电动车应用中处于领先地位。可以合理预期其他部门/应用中的溢出效应，例如用于工业和住宅部门的氢气。

到 2050 年，集成较大比例的氢基系统的优势是 VRE 所占比例极高，有益于充分利用剩余可再生电力生产氢气。在电气化情景中，需要大幅改善热能容量和季节性

存储实施，以达到相同的灵活性水平。50 GWh 的储热量和电力需求的高度灵活性预计可与 2050 年氢基系统在可再生能源整合中的性能相匹配。

在所有情景中，生物质可能是充满前景的、值得进一步探索的资源。由于原料供应、收集和系统处理的有效性还尚不明确，因此未在情景发展中完全涵盖。随着中国正在进行的循环经济运动，垃圾分类和循环利用相关现状将得以改善，这可能会给焚烧发电厂的供应方面带来部分不确定性；另一方面，能源回收中的可生物降解比例可能会增加。

将来的研究需要对该方面以及农林废弃物做进一步的分析，以更好地了解本地垃圾发电领域的动态和前景。

3.3 关键技术方案

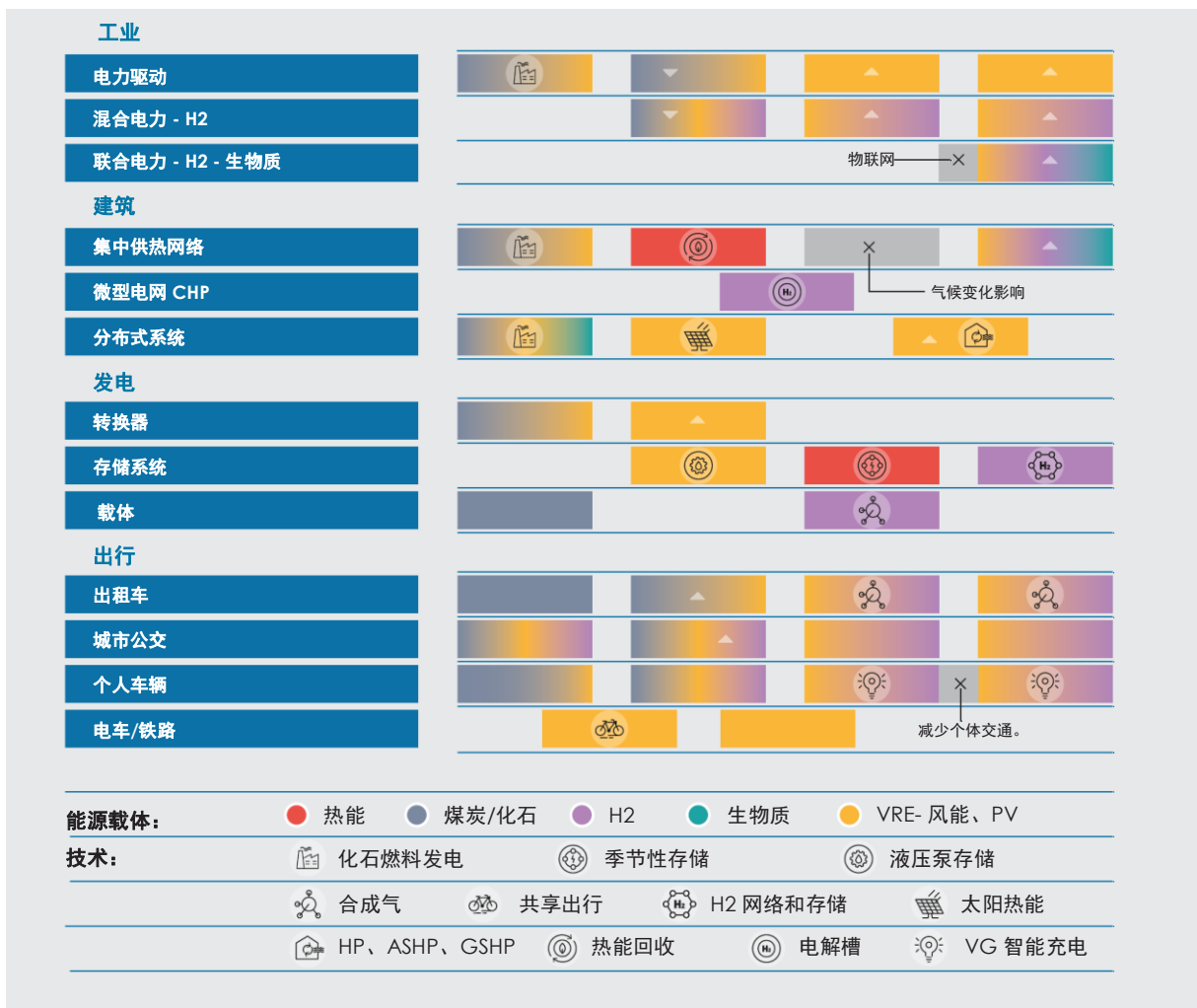
实现高比例的可再生能源是实现张家口低碳能源系统的关键。为了实现这一目标，必须在优化解决方案过程中有效整合一套例如氢气、储能和智能充电等使能技术。图 31 显示了分析中建模的关键技术。

如上节所述，本节简要讨论了一些技术，这些技术将对实现 2050 年张家口低碳前景产生更大影响。同时概述了它们当前在全球范围内的发展和前景。

工业和运输部门氢气使用

近年来，氢气的使用一直呈增长趋势，关注点已经从运输部门转移到了工业、密集/长途运输、化学品和供热等脱碳难度更大的部门。这包括基于化石燃料的灰氢、具备碳捕获功能的化石燃料蓝氢或由可再生能源生产的绿氢。绿氢的工业用途可以增加可再生能源输入的需求侧灵活性，并且预计将成为大量电力长期存储和运输的低成本方案选择。预计未来 TFEC 中氢气将占据 8-18% 的比例，但短期内由于成本的限制，特定的高效应用仍然受到限制。

图 31 能源转型的技术方案：张家口市的不同情景



来源：IRENA 分析

由于需要专用的全新供应基础设施和管道（尽管有可能因此目的使用现有的天然气管道），氢气必然会落后于其他脱碳战略。因此，它可能仅用于那些将其作为其宏大气候目标的一环的国家。现在已有几个国家开发了绿氢的试点和早期商业项目，这些项目显示出向更大的电解槽（高达 100 MW 以上）和改进技术发展的趋势。这些国家包括德国、荷兰、挪威、澳大利亚、法国、英国、美国、加拿大、智利、日本和中国。日本是最大的氢气进口国之一，也是住宅燃料电池的全球领导者，截至 2018 年底已安装了 22.3 万多套。

挑战

氢气使用的主要挑战是成本。目前，氢气每单位能源的价格比天然气贵 1.5 至 5 倍。然而，由于可再生电力和电解器价格的下降，预计未来相较于天然气的平均到高昂价格，绿氢将变得具有竞争力。减少生产、运输和转换过程中的能源损失非常关键。目前，氢气的大规模使用仍受到政府法规的限制，这可能是投资面临的不必要障碍。

此外，氢气的运输²²和存储以及加气设施的运营都需要严格的安全法规，目前仍缺乏相关法规或相关法规仍在制定之中。鉴于氢气运输是一个全新领域，因此需要更好地定义不同政府机构之间的责任。例如在中国，氢气的公路运输需要满足针对天然气的相关安全规定。为了满足该标准，当氢气通过公路从一个存储设施运输至另一存储设施时，需将储罐中氢气压力几乎减半。而终端处则需增加压力，这导致了能源浪费及运营成本增加。

运输和工业部门用途

目前，大多数氢气生产都基于化石燃料，并且主要用于炼油和作为氨生产的原料，但其他市场也将从更广泛的氢气使用中受益，比如钢铁制造、航空和船舶燃料或作为甲醇、合成甲烷和合成油产品的原料。炼油厂也越来越多地使用氢气生产柴油，但是随着柴油使用量逐渐减少，这种方法将逐渐消失。

钢铁工业中使用氢气作为还原气体可将矿石转化为高附加值的金属。与传统生产相比，这可以使温室气体排放量大幅减少 80-95%。但是，要实现经济上的竞争力，这仍将取决于可再生能源电力价格的下降以及实现有效扩大使用规模的进一步技术开发。

运输部门目前已安装 380 多个加氢站，FCEV 存量（客车和卡车）也在增加（2018 年底为 11200 辆）。相较于 ICE 车辆，FCEV 的成本仍然多出 50%，但也将从其规模扩大中受益。由于电动车的普及，长途、重型运输对于 FCEV 而言可能是更具吸引力的市场。氢气驱动公交已经在中国投入使用，欧洲和日本也在发展自己的车队。

另一项新兴技术是氢气作为液体燃料（电燃料）原料，其作用类似于汽油、柴油和航空燃料。这些燃料相比氢气更容易存储和集成到现有基础设施中。它们可为重型运载工具（航空、货运和船运）提供动力、为建筑物供热以及用作石化原料。但是，进一步的处理会带来更大的效率和财务损失。

22 除管道以外的运输方式。

文本框 3 日本和欧洲的氢气使用

不同国家已针对氢气在其能源系统中的应用进行了探索。一个有趣的例子是日本，日本在 2002 年至 2010 年间实施了一系列研究和示范计划。此后，政府推行了“基本氢能战略”，旨在通过提升氢气在常规燃料中的竞争力，促进其在住宅、商业、工业和交通运输部门的应用，于 2050 年之前建成世界领先的氢基社会。

（日本经济贸易产业省，2017 年）通过这一战略，日本实现了超过 25 万辆家用燃料电池微型 CHP 的商业化、部署了 2400 辆燃料电池车、设立了 100 个加氢站并引入了燃料电池公共交通工具（例如丰田“SORA”FCEV 公交（新能源开发机构，2018 年）

在欧洲，由欧盟推动的公私合作伙伴关系 - 燃料电池与氢能企业联盟 (FCH JU) 的目标是到 2020 年证明燃料电池和氢技术是未来欧洲能源和运输系统的重要支柱之一。欧盟于 2017 年启动了一项计划以支持地区和城市部署相关技术。在该计划范围内，针对工业和运输业，Emscher-Lippe（德国）地区通过自己的管道网络在化工行业实施了大规模的氢气吸收，并通过公共交通规划引入了燃料电池火车，另外，一家城市垃圾公司对两辆燃料电池垃圾车进行了测试（欧盟，2018 年）。此外，欧洲一直在实施住宅燃料电池示范项目。德国在 2008 年至 2013 年间安装了 560 个住宅燃料电池（固体氧化物燃料电池和聚合物电解质膜燃料电池），2014 年至 2016 年之间，12 个欧洲国家安装了 1000 套相关系统。

工业和运输部门的氢能部署将以直接为中大型工业和其他大型消费者提供能源的相关设施为起点。然后将扩大规模，使用运输车队为相对较小的消费者供货，最终包括使用船运进行洲际运输。

电动车智能充电

尽管目前显示出给电动车充电对用电量影响不大，但它可能导致峰值需求大幅增加，给本地配电网带来巨大压力。但是，这可以通过智能充电得到缓解（IRENA，2019b）。电动车停放时可以变成与微型电网连接的存储装置（通常约占 95% 的时间），智能充电则可用于控制充电周期，以满足车辆用户和电力系统的需求。这可以减少弃电量，并降低成本来补强本地电网所带来的成本费用。

与可预测发电情况（例如太阳能光伏）相结合时，智能充电最为有效。文本框 4 列出了当前的发展和前景状况。此外，将智能充电与可再生能源资源及电池储能相结合，可以为低碳/可再生电力电动车充电提供一种可选方案。

截至 2019 年初，中国拥有 260 万辆电动车保有量，占全球轻型电动车辆销量的 48%。2017 年，中国拥有 34 万辆使用电池交换站的电动公交车，这也可作为增加电网灵活性的基础。政府已表现出对电动车充电的大力支持，包括将电动车的普及率目标定为乘用车总数的 4%，同时启动了超快速充电基础设施项目。在这种情况下，全球最大的电网 SGCC 已安装了 16 万个公共充电站，并计划于 2020 年之前再建设功率高达 360 kW 的 1 万个充电站和 12 万个充电桩。

文本框 4 智能充电的发展现状和前景

现阶段，已通过推行各种机制鼓励消费者利用不同的价格和技术方案在非高峰时段为电动车充电。最简单的方案是使用分时计价，它鼓励消费者将充电活动转移到非高峰时段。作为更高比例可再生能源的长期解决方案并提供近乎实时的平衡，智能充电的直接控制机制将是必要的，包括：

- V1G- 单向控制充电：允许改变充电速率；
- V2G- 车辆到电网：智能电网控制车辆充电并将电能返回电网；
- V2H/B- 车辆到住宅/建筑物：车辆为住宅供电并作为备用电源，但不影响电网性能。

智能充电解决方案当前使用慢速充电器和快速充电器，慢速充电器提供最大的电网灵活性，快速充电器无助于电网灵活性，但可满足电动出行需求。

系统灵活性		本地灵活性	
批发市场	输电系统运营商	配电系统运营商	电表后端
<ul style="list-style-type: none"> • 调峰 • 投资组合平衡 	<ul style="list-style-type: none"> • 频率控制 • (一级、二级和三级储备) • 其他辅助服务 (例如电压管理、停电期间的应急电源) 	<ul style="list-style-type: none"> • 电压管理 • 本地拥堵和容量管理 	<ul style="list-style-type: none"> • 提高可再生能源自耗率 • 本地电力生产与电网电力之间的套利 • 备用电源

使用 V1G，控制充电模式以支持电网的实时平衡。V2G 将帮助配电系统运营商管理拥堵，并允许客户优化电价和可再生能源比例。电池交换站和使用配备缓冲存储器的充电站也有利于灵活性的提高。然而，在人口密集的城市，充电将集中在枢纽位置，这会给电网的局部区域带来极大压力。V1G 是一项成熟技术，但 V2H/B 目前尚未在日本以外的市场部署。

EV 电池可以快速响应，但是其功率容量以及电网使用时间有限。因此，需将其汇集起来作为可变的虚拟电厂 (1-2 MW 需 500 辆车)。此外，充电策略必须针对使用的可再生能源量身定制。

尽管目前电动车的存储容量很小，但随着更大容量电池和更长行驶里程的发展，预计到 2050 年电动车的渗透率将大幅增加。如果采取正确的激励措施，智能充电将成为默认功能，因此 2020-2030 年电动车的灵活性潜力将急速增长，这时主要由于自动驾驶车辆的大规模使用、平均停放时间的减少 (得益于车辆共享) 以及超快速充电器的发展，智能充电的发展应该开始趋于平稳。不断增长的电动车普及率增加了通用标准的充电基础设施、启用智能电网的充电站、支持 V2G 的车辆、充电站、配电网络和电动车之间可互操作的解决方案等方面需求。

来源: IRENA, 2019e

储能技术前景

全球范围内 2018 年储能的利用达到了历史新高，相比 2017 年几乎翻了一番。电表后端 (BTM) 储能市场由商业、工业和住宅客户组成 (IRENA, 2019f)。除了少数几个国家外 (例如日本和德国)，商业活动主要限制于商业和工业客户，并且仅应用到容量相对较小的住宅系统。尽管如此，消费者安装处的储能系统已成为电网的宝贵资产。

2018 年，BTM 储能规模的扩大尤其强劲，几乎是 2017 年的三倍，全球储能容量超过 8 GWh。BTM 储能连续第二年与电网规模储能投资相匹配，2018 年这两个类别的部署均达到创纪录水平，韩国的增长最为显著，其次是中国、美国和德国。

在东南亚和南非等政府和电网公司出台了扶持政策国家，新市场迅速出现，这表明储能仍然需要政策支持。

关于并网规模的应用 (不包括安装在电表后端的电池储能设备) (IRENA, 2019g)，2014 年全球收入约为 2.2 亿美元，其中亚太地区、欧洲和北美是该市场的先行者。预计该市场未来几年将继续增长，所有应用的年收入预计将从 2014 年的 2.2 亿美元增至 2023 年的 180 亿美元。预计同期的年电池储能容量将从 360 MW 增至 14 GW。

2014 年的并网规模项目中，用于可再生能源整合的电池占已安装电池储能系统总数的 29%，其次是调峰 (20%)、负荷转移 (18%)、辅助服务 (17%) 和其他应用 (16%)。到 2023 年，预计可再生能源整合仍是主要应用，将提供 40% 的电池相关收入。

其次是负荷转移应用 (37%)、调峰 (15%)、辅助服务 (3%) 和其他应用 (5%)。但是，这些数字不包括家用太阳能光伏装置，这一装置代表着巨大的市场机会。IRENA (2016 年)

Wood Mackenzie 电力和可再生能源计划在未来五年内将电网规模储能增加 13 倍，从而将储能应用规模从 2018 年的 12 GWh 增至 2024 年的 158 GWh。这将使电池储能系统的投资高达 710 亿美元，其中仅 2024 年的投资就为 140 亿美元。这一增长将集中在美国和中国，到 2024 年这两个国家的部署将占全球部署的 54%，其次是成长型市场第二梯队的日本、澳大利亚和韩国，德国、加拿大、印度和英国也榜上有名。

3.4 城市能源系统战略规划的重要性

战略性能源系统的规划需要结合能源需求和发电量动态变化来制定。与中国其他城市一样，张家口已积极采取措施升级当前产业部门

- 这是该市迈向新一代产业发展的变革性举措。这不仅会影响其未来的能源需求，还涉及如何在能源来源以及能源产地方面满足能源需求。

产业转型对能源需求的影响

总体而言，产业转型对经济发展、环境质量和能源平衡具有重大影响 (Chenery 等人, 1986 年; Simonen 等人, 2014 年; Sakamoto, 2011 年)。在全球化浪潮中，出于各种原因，能源密集型产业从发达经济体转移到了发展中经济体，尤其是中国，主要是因为制造成本较低以及能源相对便宜。

产业战略转移的新时代，经济实惠和可靠的能源是产业生产中设施选址的关键 (IRENA, 2014 年)。随着可再生能源利用

面临越来越大的政治压力，政府鼓励企业利用可再生能源资源减少使用化石燃料。越来越多的企业开始制定减排目标，同时必须遵守国家或地方政府规定的排放标准。例如比利时法兰德斯 2007 年出台的立法规定该地区政府财政上将仅支持“碳中和”的全新发展（Maes，2011 年）。这些规定对产业转移的影响程度可与市场和政治条件等其他驱动因素相当。

产业城市最近发展起来的一个子集是生态工业园区，或集中在同一地区的商业社区，以达到环境、经济和社会绩效的最大化

（联合国工业发展组织，2017 年）。这些园区的重点是通过交换材料、能源、水资源和副产品最大程度地减少资源消耗，同时园区的部分技术要求是最大限度地利用可再生资源（Taddeo，2016 年）。工业园区的空间质量有限，因此可用于现场发电的可再生能源技术规模也受到限制。因此，他们将受益于可再生能源潜力较高或使用进口电力的地区。微电网也可用于补充现场的间歇性能源供应和企业的总体需求（Maes，2011 年）。

但是，产业转移的成本高昂，没有预期净成本收益就无法实施。因此，可再生能源不会是产业转移的唯一驱动因素。



造成这种情况的另一原因是，企业自身也有强烈的能源转型意愿，以减少其碳足迹（例如比利时）。实现这一目标还有更便宜的方式，例如在现有地点提高可再生能源技术、购买绿色电力、购买可再生能源担保或排放信用额度（Maes，2011年）。

当前高质量可再生能源的吸引力可能还不足以使企业制定相关产业流程和经济业务来克服产业转移产生的相关成本障碍。然而，尤其是对于以业务可持续性发展为重点的企业而言，为新的工业设施扩大厂区或选择厂址则是另一种情况。为了鼓励向高比例可再生能源领域发展，政府可在能源和碳定价领域运用政策拉平化石燃料和可再生能源的成本（IRENA，2014年）；或针对新的发展颁布法规（Maes，2011年）或使用免税政策（Kalyuzhnova 和 Pomfret，2017年）。

对张家口适用性

在中国，产业结构升级正迅速发展，更先进的技术以及更小的环境影响是这一过程的主要特性。张家口也不例外。该市产业升级的结果不仅影响未来能源需求的规模，还影响其地理分布。能源密集型产业通常是主要的污染源，将被追求绿色发展的高科技和环保型产业替代。其余重工业也将必须通过应用能源效率和更清洁的生产措施改善其环境绩效。

例如，随着宣钢公司计划停产以及由高炉向电弧炉的升级改造，工业能源需求将大幅降低。

同样，随着张家口部分县建立大数据中心，用电量分布也将发生变化。根据该市的大数据发展规划，未来几年，张北县有 150 万台服务器将投入使用，年用电量增加约 14 太瓦时 (TWh)，为目前用电水平的两倍。随着物联网、云计算和大数据等先进信息技术的发展，该行业用电量也将持续快速增长，预计 2020-2030 年每年用电量的增加将超过 20 TWh。

同时，可再生能源制氢的电力需求也将增加。此外，智能制造将替代传统的生产设施，带来更好的能源和环境绩效。对于包括电和热在内的能源生产，生产应尽可能接近负荷，以减少传输损耗。在这方面，分布式发电可能极具优势。

张家口可通过前瞻性的战略规划为企业提供的独特机会，帮助企业扩大可再生能源资源的使用规模，减少对环境的影响。

3.5 政策创新和全新商业模式的作用

一般而言，城市自行制定政策的权限较小。但是，几乎所有城市都有一定程度的自治权，因为每个城市都是独一无二的，不能由中央或联邦政府统一制定的具体政策管理。这为支持本地制定可再生能源利用政策提供了创新空间。

全球范围内，由于可再生能源系统成本竞争力的提高以及与本地生产的可再生能源相关的多种社会和经济利益，例如创造就业机会、刺激本地业务发展和改善空气质量，政策创新这一趋势正在加速发展。

本地能源供应的安全性，例如分布式和更可靠的能源生产（从气候适应方面来看，这已成为越来越重要的因素）已愈发成为政策制定者制定长期政策框架和发展目标时必须考虑的重要因素。

在广阔且极具前瞻性的背景下，智慧城市的概念为城市可再生能源系统提供了另一绝佳机会和充满希望的前景。全球范围内越来越多的城市正在为未来本地/社区/街区的智能电网测试不同配置，这些电网可以集成各种新技术且有助于能源供应依赖于本地可再生能源。

创新和颠覆性技术的出现对政策和法规制定中的创新思维提出了要求，这些政策和法规可以适当超前，为技术开发和全新业务模式的创建提供指导。例如，家用屋顶太阳能光伏开辟了新的市场领域，而社区虚拟发电厂将这种创新推向一个全新水平，进一步挑战了以公用事业为主导的传统商业模式。

中国的电力部门正在进行改革。预期的变化之一是将本地/社区或工业园区的配电网²³面向私人投资商和独立运营商开放²⁴。试点项目已经开始进行。这表明可以期待更高水平的本地能源治理，为中国地方政府的能源系统规划和管理提供更大的权力。

中国许多城市都设有自己的发电厂，因而地方政策制定部门可以通过引导未来对于低碳能源基础设施的投资，在其中发挥作用。通过这样做，可以激励本地商业社区建立创新的商业模式、抓住

全新机遇。在这方面，太阳能光伏的租赁模式，尤其针对商业和工业建筑的租赁模式堪称典范。

然而，与所有产业政策一样，仍需制定长期的规划，让可能受到影响的公司制定合理的战略来应对转型，从而大幅降低总体系统成本和风险。

作为国家指定的可再生能源技术开发和应用创新以及政策和监管设计的试验台，张家口市具有得天独厚优势。从政治上讲，它获得了国家主管部门的支持。该市不仅获批设立全国首个国家可再生能源示范区，从体制上讲，实施工作规划的指导委员会也已经建立，由国家发改委副主任、副省长、国家能源局副局长共同领导。

这保证了在地方政府提出的旨在扩大示范区内可再生能源规模的创新政策和法规方面进行跨部门的有效协调。张家口设计创新政策刺激新技术和新应用的开发和应用时可利用的最后一个优势是，为了促进城市可再生能源的规模化发展与中国科学院达成的长期合作关系。

总体而言，政策创新可以在创建健康的生态系统中发挥重要作用，开发和应用先进技术和系统、创建新颖的商业模式从而实现高比例的可再生能源，这将使张家口到 2050 年成为低碳城市。同时，张家口市取得的经验和教训可以并且应该在全国范围内进行分享，这是赋予国家可再生能源示范区的一项重要任务。

23 指电压等级不大于 110 kV 的电网。

24 2015 年 3 月发布的国家政策。

4. 展望未来

要点：

- 制定城市的可再生能源的规划，不可能脱离产业的发展、城市形态的变化、现有城市的基础设施、城市可再生能源系统及其对社会、环境和其他如智慧城市技术应用等方面的影响。

基于地理信息系统 (GIS) 能源规划工具可以帮助优化可再生能源的发电、配电和销售，同时满足能源需求和城市发展。

- 发展更强劲、更灵活的区域电力交换电网是另一个绝佳机会，通过高比例的可再生能源以更具成本效益的方式实现低碳目标。
- 可再生能源制氢愈发被视为一种有效的解决方案，用于提高电力系统需求侧灵活性从而可实现高比例的可再生能源。
- 加强城市一级的机构能力对于实践城市能源规划和采用可再生能源作为能源供应至关重要。张家口需要建立先进的可再生能源系统示范和培训设施，以便在这方面为中国其他城市提供帮助。

张家口与国际社会接轨可获益良多。

在制定围绕可再生能源发电、产业升级和可再生能源资源多样化的能源转型战略方面，张家口一直具有独特地位。

鉴于国务院给予该城市的特权，它可以试验和示范在中国可行的可再生能源转型方案，因此在整个转型过程中获得的经验将具有重要的价值和意义。这将为其他拥有丰富可再生能源资源的城市创建一个有趣的模型。

此外，由于本地电网在区域电网连接中发挥着重要作用——不仅连接北京（预计将越来越依赖于引进电力的大型负荷中心），而且还连接具备大量风能潜力的内蒙古电网——张家口市可以发展为平衡区域再生电力市场的枢纽。这些经验为那些与大规模可再生能源发电设施连接的城市提供了范例，他们可参考张家口在京津冀地区的情况，将其低碳情景发展与区域发展相结合。

前几节分析了张家口市目前的能源状况，并列出了通往低碳未来的路径。鉴于这些城市终端使用部门的电气化进程的加速，尤其是电动车的应用、煤基供热系统的各种替代选择以及再生氢能作为推动低碳未来发展的能源载体，电气化和氢能情景几乎与所有中国城市都有一定程度的相关性。

本节确定了关键的战略领域，如果精心设计具体措施并有效实施，将促进张家口当前的能源系统向本研究定义的战略路径转型。

4.1 能源规划

本节涵盖了能源规划领域中与本研究高度相关的三个主题部分。张家口应考虑在能源基础设施开发和规划的不同阶段应用这些措施。可以就这些主题部分通过国际合作平台与其他城市进行便利的知识交流。

制定长期能源系统规划

长期能源规划是能源部门以及国家和市级能源政策制定过程的重要组成部分。长期能源规划以满足总体政策目标的能源组合量化情景和目标为特点，有助于建立稳定和可预测的投资环境，并为投资指导建议提供框架。

城市的可再生能源规划，一定不能脱离产业部门的发展、城市形态的变化、现有城市的基础设施、城市可再生能源系统及其对社会、环境和其他如智慧城市技术应用的影响。长期能源情景背后的城市能源系统建模可充分考虑这些因素，对城市进行系统的战略性政策评估。

按照本报告中概述的战略路径，张家口将从制定的长期能源规划中受益。长期能源规划需要适合当地情况的全新技术、商业模式和颠覆性的创新。

考虑到风能、太阳能等可再生能源独特的地区性和生产模式，在应用能源系统规划工具或模型时，城市环境还需要适当水平的的时间粒度和空间分界。同样也应与第 3.4 节中讨论的产业部门转型保持一致。

这样的能源规划将帮助张家口建立一个长期框架，指导其能源部门的转型、动员所需投资以及私营部门在各个方面的参与度。例如，新政策的远期愿景——允许私营部门投资建设本地配电网，这将为此类电网的投资者和运营商提供一定程度的确定性和保证。

采用基于 GIS 的空间规划工具和方法

基于地理信息系统 (GIS) 能源规划工具可以帮助优化可再生能源的发电、配电和销售，同时满足能源需求和城市发展。必须从空间和时间上进行权衡评估。例如，根据城市形态和人类活动，基于 GIS 的能源基础设施、房屋翻新，废物管理和分布式能源系统发展的量化将促进集成和动态系统的规划和运营。城市模型的开发，包括基于 GIS 数据的不同层级，可以为城市规划者提供全方位的视觉量化，以促进能源转型的实现。

诸如遥感、探测和测距 (LIDAR) 技术类的复杂工具可用于更准确的模型开发。这有助于建立高分辨率的城市环境三维模型，以捕获诸如微气候（城市热岛）、温室气体排放和可再生能源潜力等城市现象，并以不同尺度模拟建筑能源需求。QGIS 和/或 ArcGIS 软件提供了一个高级工具箱计算这种复杂模拟。这些从建筑到城市规模的多尺度模型可以基于覆盖层规划和整合可再生能源，以解决可再生能源潜力与供需的匹配问题（Nowacka 和 Remondino, 2018 年）。

可将其与 R²⁵ 等先进统计软件结合使用进一步增强 GIS 分析，从而深入分析能源需求模式并进行预测，这对于张家口的情况尤其有用，因其需要先进的方法来优化对于包括高比例的 VRE 在内的能源系统的最佳控制。

开发更强大、更灵活的电网进行区域电力交换

当较高比例的波动性可再生能源（例如太阳能和风电）集成到连接的电网系统中，从区域层面对其进行审视也非常重要。这有助于更好地了解可再生能源发电和消费的区域平衡。整体电网系统不同部分的灵活性将提供敏锐的洞察力，以了解在不采取电网增强措施的情况下，哪些区域可以容纳多少可变可再生能源，而不会破坏电网的稳定性和可靠性。

张家口电力系统所连接的区域电网也与内蒙古电网连接，后者已经建立了大型风电场。如果能够更好地实现区域层面的平衡，张家口便能够以更具备成本效益的方式实现低碳目标。因此有必要进行进一步的区域电网稳定性研究。

张家口可以进一步研究如何利用现有设施向氢气战略转型

4.2 通过氢气使可再生能源的终端用途多样化

为了增加电网的灵活性，以消纳更高比例的可再生能源，终端部门需要更多地参与电网运营。终端部门的电气化是一种公认的有效方法，能够让电网运营商在电力需求方面拥有更多参与者，以维护电网的稳定。

最近，可再生能源制氢已被视为一种有效的解决方案，以增加电力系统需求侧的灵活性，这是因为可变可再生能源可以通过电解槽转化为能源载体，在有需要时使用。因此，氢气在战略上具备优势，能够充分利用低成本可变可再生能源以及低成本和高效率的电解槽这一关键组合。

张家口可以进一步探索利用现有基础设施实施氢基战略的潜力，例如再利用现有的或短期规划的天然气分配网络运输氢气。需要对材料和终端使用问题进行更准确的评估。目前的设计中还需要对升级到氢网络的成本进行最佳评估，以便在初始规划阶段就简化向氢基系统的转型。

除了利用现有基础设施进行氢气生产和传输，张家口还可以评估大型工业场所利用可再生能源现场生产绿氢相关方案。这可能包括启动氢气生产和使用示范项目，其中氢气将用作副产品，例如生产电燃料或氨。

²⁵ R 是用于高级统计分析（包括数据挖掘方法）的开源软件。它包括地理空间分析包，可用于高级 GIS 计算，以提取和重新分类基于 GIS 的数据并分析例如时间序列预测等不同应用的数据相关性。

4.3 加强机构能力

建立本地能源规划能力

如第 4.1 节所述，本地能源规划对于可再生能源的长期发展至关重要。然而，这样的城市能源规划往往是由一家签约公司制定的，该公司可能会使用无法转让的专利工具或方法。这可能会导致制定的规划不能更新，因为该规划依赖于外部的支持。一个城市的能源系统应当由规划使用者来规划，他们应有能力进一步完善其规划，或者至少能够理解能源系统的规划应允许保持独立性，并能够根据需要及时更新。通过应用城市能源系统规划中的建模结果，可以加强政府机构的情景开发能力。然而，要做到这一点，制定张家口能源系统规划的机构能力与人的能力是同样重要的。

建设先进的可再生能源系统示范和培训基地

鉴于张家口已被批准建立国家级可再生能源示范区，拥有一个配备先进可再生能源系统的强大示范和培训基地是非常重要的，它能够使该市承担起其作为示范区的重要责任，推动中国其他地方城市扩大可再生能源的使用。此类示范和培训基地可以从现有的类似机构中，例如从拥有太阳能、风能以及储能综合能源系统的中国国家电网培训中心汲取经验。也可以从通过与项目持有者或开发商签订合作协议，在张家口建立可再生能源项目中汲取经验。此外，该示范和培训基地还可以作为张家口与世界其他地区进行知识交流、技术合作、培训其他发展中国家官员以及技术创新合作的平台。

这可以从氢气开始，因为张家口是氢气发展的领先城市。需要针对可再生能源制氢和使用建立相关设施甚至培训计划，从而更好地了解可再生能源和氢气部门之间的动态，并可以作为与其他城市和整个氢气行业加强知识交流的平台。可以以著名学者欧阳明高教授领导、建立的氢能研究团队为基础建立。其创新之处在于它可以是公共部门和私营部门基于公私伙伴关系模型的联合倡议。

4.4 与国际社会接轨

城市正意识到需要通过能源转型来应对气候变化。但他们并不是单打独干。促进城市实现低碳未来需要许多积极的合作伙伴，除了国际环境理事会、C40 和全球市长公约等地方社会团体，还有联合国人居署举办的世界城市日、国际环境资源研究大会和亚洲开发银行建立的亚洲清洁能源论坛等全球和区域性平台。

与这些合作伙伴交流知识、分享经验教训，张家口将受益匪浅。更重要的是，加入这样的组织，参与这样的活动，可以帮助张家口加快可再生能源的开发和部署，探索更多机会，建立不同规模的联合研发项目。

**许多城市已经意识到
需要通过能源转型
应对气候变化**



达华集团



中国科学院

达华集团与中科院合作

中国首个国家级可再生能源示范小镇



积山黄栌城太阳能季节能量储存示范项目简介

项目背景：随着全球能源危机的加剧，开发可再生能源已成为世界各国的共识。我国拥有丰富的太阳能资源，但受季节和天气影响，太阳能发电具有间歇性和波动性。本项目旨在通过太阳能季节能量储存技术，实现太阳能的持续利用，为示范小镇提供清洁能源。

项目意义：本项目是国家首个太阳能季节能量储存示范项目，具有重大的示范意义。项目建成后，将实现太阳能的持续利用，为示范小镇提供清洁能源，推动可再生能源产业的发展。

项目内容：项目包括太阳能季节能量储存塔、太阳能集热器、储热罐、换热站、发电站等。项目采用塔式太阳能集热技术，通过反射镜将太阳光聚集在塔顶的接收器上，产生高温蒸汽，驱动汽轮机发电。同时，项目还采用了太阳能季节能量储存技术，将夏季多余的太阳能热量储存在储热罐中，供冬季使用。

项目效益：项目建成后，将实现太阳能的持续利用，为示范小镇提供清洁能源，推动可再生能源产业的发展。项目还将带动当地就业，促进地方经济的增长。



5. 结论

张家口的地理位置赋予了该市独特优势，来开发和利用本地已有的可再生能源潜力、发展产业和研究以改善采集和分配本地已有的可再生能源的最佳技术解决方案。自 2015 年国家可再生能源示范区设立之后，市政府制定了宏大目标。

张家口拥有丰富的可再生能源资源，且毗邻北京，因此在实施可再生能源的发展战略以及持续的产业结构调整方面具有独特地位。为了利用这些机会，本报告制定了长远的战略路径。对于 2050 年的低碳城市愿景而言，实施引导城市脱碳的能源转化途径对高比例的可再生能源整合是一项技术挑战。分析发现，到 2050 年，该城市可以通过电气化或重视氢能发展的途径实现高比例的可再生能源。

应用 EnergyPLAN 模型量化了张家口最大程度地利用本地已有的可再生能源以满足 2035 年和 2050 年能源需求的可能性。主要的研究结论是，技术上实现可再生能源的充分利用是可行的；但是，必须充分利用灵活性解决方案才能在不同气候条件下有效满足能源需求。

通过智能的车辆到电网充电、部门耦合以及在低温网络中利用工业产生的废热来提高整体系统效率，以及通过提高储能能力以及电网扩展规划限制严重的发电过剩，尤其是波动性能源发电量超过 50% 的情景，这一目标可以实现。如果能够通过这些战略解决挑战，那么 2035 年之后，在任何情景下，可再生能源比例到 2050 年都将达到 70% 以上。

单靠技术无法有效发挥作用，政策和商业模式的创新同样至关重要。张家口已获得了探索扩大可再生能源应用的有效政策方案的特别授权。一项名为“四方协作机制”的创新性政策计划已生效，考虑到该市漫长的供热季，因此这一政策主要针对供热部门，目前已取得了积极的成果。这种方案也可能适用于其他部门，例如制氢。

已根据不同情景下的能源转化途径总结出一套通用的政策方案，重点是解决已确定的关键挑战，以指导地方政府加快到 2050 年向低碳城市的转变进程。



参考资料

- ADB (2015)**, People's Republic of China: Study on the Coordinated Development of Beijing–Tianjin–Hebei (中华人民共和国: 京津冀协同发展研究), Asian Development Bank, Manila, www.adb.org/sites/default/files/project-document/178358/48462-001-tar.pdf.
- Central People's Government of the People's Republic of China (2013)**, "The difference between the household registration population and the resident population's urbanization rate data source is normal" (户籍人口与常住人口城镇化率数据来源不同有差距属正常), www.gov.cn/wszb/zhibo557/content_2378121.htm (in Chinese).
- CGC (2018)**, China's Geothermal Energy Survey (中国地热能调查), China Geological Survey, www.cgs.gov.cn/ddzt/cgs100/bxcg/fwgj/201611/P020161128428016715546.pdf.
- Chenery, H. B., Robinson, S., Syrquin, M. (1986)**, Industrialization and growth (工业化与增长), World Bank: Washington, DC, US.
- China Energy News (2017)**, "In 2020, the proportion of coal in building energy consumption can be reduced to less than 25%" (2020年煤炭占建筑能耗总量比重或降至25%以下), http://paper.people.com.cn/zgnyb/html/2017-08/07/content_1796639.htm.
- China Environment Network (2014)**, "Hebei Zhangbei abandoned wind rate has reached 30%, annual loss of more than 1 billion kWh" (河北张北弃风率已达30%, 每年损失超10亿度电), www.zhhjw.org/a/hjsh/jksh/2014/1028/1470.html.
- Chinanews (2017)**, "Beijing entering into a coal power free era" [北京市步入无煤发电时代], www.chinanews.com/sh/2017/03-20/8177889.shtml (in Chinese).
- CNREC (2018)**, Chinese renewable energy outlook 2018 (中国可再生能源展望 2018), China National Renewable Energy Centre, Beijing.
- De Luca, G., Fabozzi, S., Massarotti, N., Vanoli, L. (2018)** "A renewable energy system for a nearly zero greenhouse city: Case study of a small city in southern Italy" (近乎零温室气体城市的可再生能源系统: 意大利南部一个小城市的案例研究), *Energy*, 143: 347-362.
- Ding, Ch et al. (2017)**, "Power quality analysis of the Zhangjiakou regional network in China" (中国张家口区域电网的电能质量分析), 24th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED), *Open Access Proceedings Journal*, 1: 805-808, 工程技术研究所 (Institute of Engineering and Technology).
- ETRC et al. (2018)**, Zhangjiakou Clean Energy Schemes for Heating, Engineering and Technology (张家口供热、工程和技术方面的清洁能源计划), Research Centre of Hebei Province on Wind-Solar-Storage for Heating, Engineering and Technology, Research Centre of Zhangjiakou City on Renewables for Heating, and Building and Engineering Institute of Hebei Province).
- EU (2018)**, Fuel cells and hydrogen for green energy in European cities and regions (欧洲城市和地区用于绿色能源的燃料电池和氢气), Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, European Union, Brussels. www.fch.europa.eu/sites/default/files/181123_FCHJU_Regions_Cities_Final_Report_FINAL.pdf.
- He, C., Jiang, K., Chen, S., Jiang, W., Liu, J. (2018)**, "Zero CO₂ emissions for an ultra-large city by 2050: Case study for Beijing" (到2050年超大型城市的零二氧化碳排放: 北京案例研究), *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 36: 141-155.
- Hebei News Network (2019)**, "Zhangjiakou's renewable energy consumption accounts for the national lead" (张家口可再生能源消费量占比全国领先), <http://hbrb.hebnews.cn/pc/paper/c/201903/13/c126082.html>.
- HEBWJ (2014)**, Zhangjiakou Thermal Energy Measurement (张家口热能测量), Hebei Provincial Pricing Agency, www.hebwj.gov.cn/News.aspx?sole=20141017150159413.

- IEA (2018)**, “Hydrogen” (氢气), www.iea.org/tcep/energyintegration/hydrogen.
- IEA (2017)**, Cold climate heat pumps: Improving low ambient temperature performance of air-source heat pumps, Technology Collaboration Program on Heat Pumping Technologies (寒冷气候地区热泵: 改善空气源热泵在低温环境中的性能), Annex 41, International Energy Agency, Paris.
- Institute PH (2015)**, Criteria for the Passive House, EnerPHit and PHI Low Energy Building Standard (被动式房屋标准, EnerPHit 和 PHI 低能耗建筑标准), Passive House Institute, Darmstadt, Germany.
- IRENA (2019a)**, Global energy transformation: A roadmap to 2050 (2019 edition) (全球能源转型: 2050 年路线图 (2019 年版本)), International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- IRENA (2019b)**, Innovation outlook: Smart charging for electric vehicles (创新前景: 电动车的智能充电), International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- IRENA (2019c)**, Hydrogen: A renewable energy perspective (氢气: 可再生能源前景), International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- IRENA (2019d)**, Renewable power generation costs in 2018 (2018 年可再生能源发电成本), International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- IRENA (2019e)**, Innovation Landscape Brief: Electric-vehicle smart charging (创新前景简介: 电动车智能充电), International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- IRENA (2019f)**, Innovation Landscape Brief: Behind-the-meter batteries (创新前景简介: 电表后端的电池), International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- IRENA (2019g)**, Innovation Landscape Brief: Utility-scale batteries (创新前景简介: 公用事业规模电池), International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- IRENA (2018)**, Hydrogen from renewable power: Technology outlook for the energy transition (可再生能源制氢: 能源转型的技术前景), International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- IRENA (2016)**, Battery storage for renewables: Market status and technology outlook (可再生能源电池储能: 市场现状和技术前景), International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- IRENA (2014)**, Renewable energy in manufacturing – A technology roadmap for REmap 2030 (制造业中的可再生能源 – 2030 年可再生能源发展技术路线图), International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- IRENA, ICLEI and GIZ (2018)**, Scaling up renewables in cities: Opportunities for municipal governments (扩大城市中的可再生能源: 市级政府的机会), International Renewable Energy Agency, ICLEI – Local Governments for Sustainability and Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH, Abu Dhabi.
- IRENA and SGCC (2019)**, Electrification with renewables: Driving the transformation of energy services (可再生能源的电气化: 推动能源服务转型), International Renewable Energy Agency and State Grid Corporation of China, Abu Dhabi.
- Jackson, R. B. et al. (2018)**, “Global energy growth is outpacing decarbonization” (全球能源增长速度超过脱碳速度), *Environmental Research Letters*, 13: 120401.
- Kalyuzhnova, Y. and Pomfret, R. (2017)**, Sustainable energy in Kazakhstan – Moving to cleaner energy in a resource-rich country (哈萨克斯坦的可持续能源 – 资源丰富的国家转向更清洁的能源), Routledge.

- Kroposki, B. et al. (2006)**, Electrolysis: Information and opportunities for electric power utilities (电解: 电力公司的信息和机会), National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado, US.
- Li, Q., Zhang, B., Shi, Y. et al. (2017)**, "Key ecosystem services and their regional flow in Zhangjiakou-Chengde Region" (张承地区生态系统服务及其区域关联分析), *Journal of Ecology and Rural Environment*, 33(1): 38-46.
- Lund, H. (2018)**, Advanced Energy Systems Analysis Computer Model Documentation Version 14 (先进能源系统分析计算机模型文档, 修订版 14), Aalborg University.
- Ma, T. et al. (2014)**, "An energy system model for Hong Kong in 2020" (2020 年香港的能源系统模型), *Energy*, 68: 301-310.
- Maes, T. (2011)**, "Energy management on industrial parks in Flanders" (法兰德斯工业园区的能源管理), *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15(4): 1988-2005.
- Mathiesen, B. V., Ridjan, I., Connolly, D., Nielsen, M. P., Vang Hendriksen, P., Bjerg Mogensen, M., ... Dalggaard Ebbesen, S. (2013)**, Technology data for high temperature solid oxide electrolyser cells, alkali and PEM electrolyzers (高温固体氧化物电解槽、碱性和质子交换膜电解槽的技术数据), Aalborg University, Aalborg, Denmark.
- METI (2017)**, Basic Hydrogen Strategy (key points) (基本氢能战略(要点)), Ministry of Economic Trade and Industry, Japan), www.meti.go.jp/english/press/2017/pdf/1226_003a.pdf.
- Natural Resources Agency of Zhangjiakou (2002)**, Overall development plan for mineral resources of Zhangjiakou City (张家口市矿产资源总体规划), www.mlr.gov.cn/zwgk/ghjh/201012/P020101216401178512998.pdf (accessed 27 November 2018).
- NCSC (2018)**, "China has achieved the carbon emission targets ahead of schedule" (我国提前实现碳减排目标), China Climate Change Info-Net, www.ccchina.org.cn/Detail.aspx?newsId=70215&TId=57.
- NEA (2018)**, Official announcement of "100 Pilot Projects of biomass-based CHP Heating Programme" (国家能源局关于开展“百个城镇”生物质热电联产县域清洁供热示范项目建设的通知), China National Energy Administration, http://zfxgk.nea.gov.cn/auto87/201802/t20180211_3116.htm.
- NEDO (2018)**, Japan's current policy and activity toward hydrogen-based society (日本当前的氢基社会政策与活动), New Energy and Industrial Technology Development Organization, Japan, http://ieahydrogen.org/pdfs/20180620_whec_ohira.aspx.
- Noorollahi, Y., Itoi, R., Yousefi, H., Mohammadi, M., Farhadi, A. (2017)**, "Modeling for diversifying electricity supply by maximizing renewable energy use in Ebino city southern Japan" (通过在日本南部的虾野市最大限度地利用可再生能源进行电力供应多样化建模), *Sustainable Cities and Society*, 34: 371-384.
- Nowacka, A., Remondino, F. (2018)**, "Geospatial data for energy efficiency and low-carbon cities – Overview, experiences and new perspectives" (能源效率和低碳城市的地理空间数据 – 概述、经验和新观点), *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* LII-4: 467-474.
- Østergaard, P.A. (2015)**, "Reviewing EnergyPLAN simulations and performance indicator applications in EnergyPLAN simulations" (在 EnergyPLAN 模拟中查看 EnergyPLAN 模拟和性能指标应用), *Applied Energy*, 154: 921-933.
- People's Daily (2018)**, "New energy generation in Weibei Power Grid becomes the main force" (冀北电网新能源发电成主力), www.cec.org.cn/zdlhuiyuandongtai/dianwang/2018-07-18/182773.html.
- People's Government of Zhangjiakou City (2017)**, Zhangjiakou overall plan for land-use – improved version 2006-2020 (张家口土地利用总体规划 – 2006-2020 年改进版本), www.zjkg.gov.cn/userfiles/webpic/P0201712/P020171208/P020171208092119.pdf

- Sakamoto, H. (2011)**, "Provincial economic growth and industrial structure in China: An index approach" (中国省级经济增长与产业结构: 指数法), *Regional Science Policy & Practice*, 3(4).
- Seto, K. C. et al. (2014)**, "Human Settlements, Infrastructure and Spatial Planning" (人类住宅、基础设施和空间规划), 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* [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
- Simonen, J., Svento, R., Jutinen, A. (2014)**, "Specialization and diversity as drivers of economic growth: Evidence from high-tech industries" (高科技行业证据证明专业化和多样性是经济增长的驱动力), *Papers in Regional Science*, 94(2): 229-247.
- State Grid Jibei Electric Power Company (2017)**, "State Grid Yubei Power Co., Ltd." (国网冀北电力有限公司), www.jibei.sgcc.com.cn/html/main/col19/2014-06/27/20140627161613838605892_1.html.
- Taddeo, R. (2016)**, "Local industrial systems towards the eco-industrial parks: The model of the ecologically equipped industrial areas" (面向生态工业园区的本地工业系统: 生态化工业区模型), *Journal of Cleaner Production*, 131: 189-197.
- Tian, B. et al.(2018)**, "Prospect and key techniques of Global Energy Interconnection Zhangjiakou Innovation Demonstration Zone" (全球能源互联网张家口创新示范区的前景和关键技术), *Global Energy Interconnection*, 1(2): 153-161.
- UN DESA (2015)**, World urbanization prospects: The 2014 revision (世界城市化前景: 2014年修订版本), United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (ST/ESA/SER.A/366).
- UNIDO (2017)**, Implementation handbook for eco-industrial parks (生态工业园区实施手册), United Nations Industrial Development Organization, Vienna.
- Yang, Q., Lide Y., Wang D. (2016)**, "Feasibility analysis of application of heat pump and radiator heating system in Zhangjiakou area" (张家口地区热泵及散热器供热系统应用的可行性分析), SSXT100, www.ssxt100.com/core/artSection?id=1104.
- Zhang, Y. et al. (2017)**. "Application of air source heat pump (ASHP) for heating in Harbin, the coldest provincial capacity in China" (空气源热泵 (ASHP) 在中国最冷省份哈尔滨供热中的应用), *Energy Buildings*, 138: 96-103.
- Zhang, J., Wang, B., Song C. (2011)**, "Zhangjiakou economy backward deep level reason" (张家口经济落后的深层次原因), *Yunnan Geographic Environment Research*, 23(1): 86-91.
- Zhangjiakou Municipal Statistics Agency (2018)**, Yearbook of statistics for Zhangjiakou City (张家口市统计年鉴) (in Chinese).
- Zhou, J. (2018)**, "Re-adjustment of functional layout and population demographic trends of the Beijing-Tianjin-Hebei region" (京津冀地区的功能布局调整和人口统计趋势), www.hprc.org.cn/gsyj/jjs/rkzyyhj/201804/P020180408362021540696.pdf (accessed 3 December 2018).

通往低碳未来之路



张家口

能源转型战略 2050