



蓝皮书·2022

零碳中国·新型储能

以实现碳中和为目标的新型储能

中国投资协会能源投资专业委员会，长城证券股份有限公司



长城证券
GREAT WALL SECURITIES

作者与鸣谢

作者

中国投资协会：姜艺，孙耀唯，张杰，郑冬冬。
落基山研究所：陈济，李抒苒，李婷，李也，宋佳茵，吴彦君，朱思捷。

* 按姓氏首字母顺序排列。

联系方式

郑冬冬：ccei_zd@163.com

陈 济：jchen@rmi.org

引用建议

陈济，姜艺，李抒苒，李婷，李也，宋佳茵，孙耀唯，吴彦君，张杰，郑冬冬，朱思捷，零碳中国·绿色投资：以实现碳中和为目标的投资机遇，落基山研究所与中国投资协会，2021年1月

*除特别注明，本报告中所有图片均来自iStock。

鸣谢

我们向为本研究提供意见和建议的来自企业和研究机构的专家们表示诚挚的感谢。

关于我们



中国投资协会 (The Investment Association of China, IAC)

中国投资协会 (The Investment Association of China, IAC) 是经中华人民共和国民政部登记注册，具有社团法人资格的全国性社会团体，是中国投资建设领域权威性、综合性社团组织，其政策和业务指导部门为国家发展和改革委员会。中国投资协会下设16个投资委员会，拥有超过1000家大中型投资企业会员单位。本报告由中国投资协会能源投资专业委员会执行。2020年，中国投资协会能源投资专业委员会牵头联合50多家国内外机构发起“零碳中国”倡议，将以实现“碳中和”为目标，为推进国家能源转型和绿色发展做出应有的贡献。



关于落基山研究所 (Rocky Mountain Institute)

落基山研究所 (Rocky Mountain Institute, RMI) 是一家于1982年创立的专业、独立、以市场为导向的智库，现任首席科学家卢安武是联合创始人。我们与政府、企业、科研机构、社区及创业者协作，推动全球能源变革，以创造清洁、安全、繁荣的低碳未来。落基山研究所致力于借助经济可行的市场化手段，加速能效提升，推动可再生能源取代化石燃料的能源结构转变，项目复盖美国、中国、印度、撒哈拉以南非洲地区以及加勒比岛国等国家和地区。目前，落基山研究所在美国科罗拉多州巴索尔特和博尔德、纽约市、华盛顿特区及中国北京设有办事处。

专家点评

2030年“碳达峰”的目标与2060年“碳中和”的愿景明确了我国绿色低碳发展的时间表和路线图，将会为绿色低碳的新技术、新产业和新业态的发展提供广阔空间，创造出大量气候友好的投资机会，成为金融与投资机构持续健康发展的新机遇。

—— **李高** 生态环境部应对气候变化司司长

“零碳中国”倡议的实施需要联合一批有能力且致力于从事“零碳”产业的企业，协会要善于发现、培育并支持这样的企业。

—— **石定寰** 原国务院参事、中国投资协会能源投资专委会专家委员会主席

为实现本世纪中叶的零碳目标，中国需要强有力的政策支持和大量投资，确保在十四五规划期间的行动能够朝着双重目标的方向快速前进。

—— **Adair Turner** 勋爵 能源转型委员会主席

倡导“零碳中国”要按照“碳达峰”和“碳中和”目标，抓好有典型意义的示范项目，着力推动能源、建筑、交通和工业领域的低碳转型。

—— **孙耀唯** 中国投资协会能源投资专委会会长

实现碳中和的核心是推进能源转型。能源转型不但要形成共识，更要形成共同的行动。

—— **曾兴球** 中化集团原总地质师

碳达峰和碳中和的新的国家目标，是挑战，更是机遇，引导着我们国家能源转型的方向，也事关我们投资的方向。

—— **杜祥琬** 中国工程院院士、原副院长

要实现碳中和，需要从试点做起，先易后难，逐步扩大，要积累经验，探索标准和路径。

—— **李俊峰** 国家应对气候变化中心首任主任

中国实现新的气候承诺，应深入推进经济电气化发展，这需要电力部门清洁化转型，显著提升效率以及进一步推进难脱碳领域的碳减排。

—— **Jules Kortenhorst** 落基山研究所首席执行官

目录

前言	6
一、全球趋势下的零碳中国	7
二、零碳中国的愿景与机遇	10
(一) 碳中和目标下的零碳图景	11
(二) 零碳中国对经济发展的潜在贡献巨大	15
三、七大重点领域的投资机遇	16
(一) 再生资源利用—源头减量的关键驱动力	18
(二) 能效—满足需求的第一能源	25
(三) 终端消费电气化—高品质能源应用的蓝海	29
(四) 零碳发电技术—能源供给侧零碳化的基石	39
(五) 储能—高比例可再生能源系统的护航者	48
(六) 氢能—未来实现碳中和的突破性解决方案	55
(七) 数字化—推动能源系统优化的加速器	67
四、中国零碳产业发展的特点与展望	77

前言

2020年9月22日，习近平主席在第75届联合国大会上宣布“中国将提高国家自主贡献力度，采取更加有力政策和措施，二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和”。碳中和是指人为二氧化碳这一主要温室气体的排放和吸收达到平衡，使得大气中不再增加新的人为二氧化碳排放。事实上碳中和目标对于经济活动中大多数单个主体而言已经意味着需要实现零碳。新的碳达峰和碳中和目标，对中国来说是挑战更是机遇，引导着中国能源转型的方向，也事关投资的方向。为此，在生态环境部应对气候变化司的指导下，中国投资协会牵头并联合多家组织机构共同发起《零碳中国倡议》，旨在探讨2060年碳中和目标下符合中国国情的绿色发展实施路径。

中国碳中和的宣示为实现“零碳中国”指明了方向，为生态文明建设、绿色可持续的高质量发展提供重要内容，更将成为能源革命的强劲推动力。碳中和目标向市场发出了强烈信号，将促使更多长期价值投资者关注零碳发展，树立投资零碳资产、零碳项目和零碳技术的信心。

本报告由中国投资协会能源投资专业委员会和落基山研究所共同编写，梳理了零碳从理念到行动在全球和中国发展的趋势，描绘了零碳中国的发展图景、实施路径、投资场景以及潜在市场规模，识别了再生资源利用、能效、终端消费电气化、零碳发电技术、储能、氢能、数字化等七大最具潜力的零碳投资领域，并综合考虑每个领域所处发展阶段的特点以及未来在零碳经济中的作用给出了详细的政策和投资建议。

01

全球趋势下的零碳中国



全球趋势下的零碳中国

零碳正由全球政治共识转化为各国政策目标。2015年达成的《巴黎协定》提出到本世纪末将全球温升控制在2°C甚至1.5°C以内的愿景目标，且更进一步提出了全球碳排放应尽快达峰，在本世纪下半叶实现净零碳排放的具体目标。在巴黎协定所制定全球目标体系的推动，各国不断提高碳减排的行动力度，提出并不断更新碳减排量化目标，努力持续对标零碳的全球长期目标。制定零碳排放目标正成为越来越多国家贡献全球气候、开展应对气候变化行动的核心内容。

根据世界自然资源研究所的统计，截至2020年6月，已有20个国家和地区通过了净零目标，包括奥地利、不丹、哥斯达黎加、丹麦、欧洲联盟、斐济、芬兰、法国、匈牙利、冰岛、日本、马绍尔群岛、新西兰、挪威、葡萄牙、新加坡、斯洛文尼亚、瑞典、瑞士和英国。包括所有最不发达国家和少数高碳排放国家在内的120个国家通过气候雄心联盟承诺努力实现净零目标。更多国家的零碳排放目标也已在国内政策决策的程序之中。

以新能源为代表的零碳产业正迎来加速发展的临界点时刻。清洁能源技术在全球范围内已经站在了全面占领化石能源技术市场的临界点。历史经验表明，当新的颠覆性技术市场份额达到3%左右时，产业就到达了它的临界点，资本将开始从传统企业抽离。历史上看，美国马车需求量峰值出现在汽车保有量达到3%市场占比时，英国煤气照明需求峰值出现在电气照明市场份额达到2%时，而美国固定电话用量在无线电话市场份额超过5%时开始大幅下降。

落基山研究所《全球能源转型之七大挑战》报告讨论了技术成本曲线因产品产量增加而呈现出指数级下降的形态。据彭博新能源财经（BNEF）统计，在技术创新、边实践边学习以及规模化推广应用等方式的联合作用下，太阳能、风能、锂离子电子电池成本在过去十年中分别下降90%、60%和85%。国际能源署的报告显示，全球电动汽车2019年年销量已经占到乘用车总销售量的2.6%，2020年极有可能超过3%；¹2019年，全球光伏发电量占总发电量的2.7%，风电发电量占比在2018年已接近5%；风电和光伏2018年的新增发电量分别占到了总新增发电量的14%和11%，2019年的新增装机占总装机更是分别达到了22%和45%。²

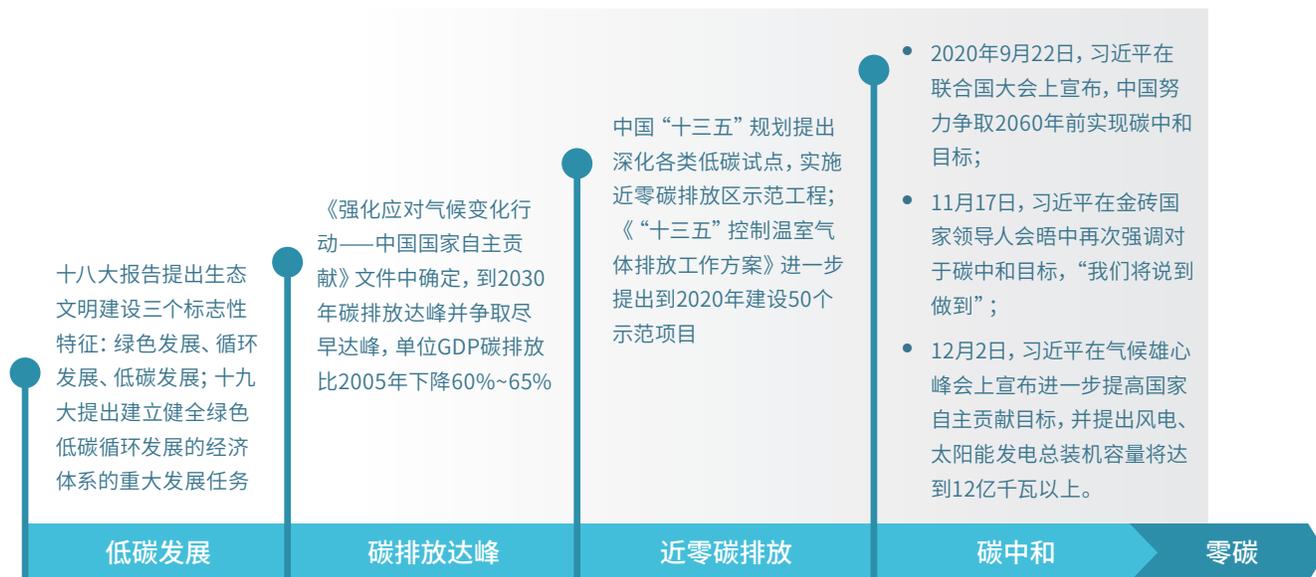
疫情影响下的全球油价大幅度下降，极有可能打破油价周期规律，全面颠覆化石能源的市场和产业基础。今年由于疫情的影响，全球石油消费急速下降，导致了全球油价跌到了史无前例的水平。

此次疫情造成的油价下跌尽管有突发性，但是从长期趋势上看，随着电动汽车、可再生能源等新能源产业的崛起，市场占有率日益升高，全球石油消费量持续下降的趋势可能将无法逆转。因此，疫情触发的油价深度下降很有可能彻底打破行业周期规律。

碳中和目标推动“零碳”成为中国长期价值投资的新风向。回顾中国对应对气候变化的行动，过去的20多年发生了巨大的转变。从十八大报告确定低碳发展作为生态文明的三大特征之一，到向《巴黎协定》谈判进程提交的国家自主贡献里面明确提出2030年左右达

图 1

中国应对气候变化的行动



峰，再到《“十三五”控制温室气体排放工作方案》提出实施近零碳排放区示范工程，一直到近期的碳中和目标，中国政府逐步提高气候行动力度，加速推动中国经济和能源结构朝零碳排放方向转型。

日益清晰的零碳战略发展方向有助于市场打造长期价值投资的新风向。长期价值投资的实质是穿越小周期内的不确定性，在一个更大时间跨度的周期内寻找确定性。2060年碳中和目标是中国政府通过设定40年后的政策目标，为中国的价值投资者创造零碳转型的确定性，锚定了新的投资标的。

事实上，中国的能源领域投资早已用行动朝清洁能源领域加速迈进。中国的煤炭产业早在2014年就开始出现投资大幅度下降趋势。近年来，中国政府推动兼并重组等方式，逐步剥离非煤企业的煤炭资产。国家开发投资集团于2019年就宣布已经完全退出煤炭业务，未来将投资新能源。发电和油气领域的国有企业也早已纷纷成立公司布局新能源产业。

02

零碳中国的愿景与机遇



零碳中国的愿景与机遇

(一) 碳中和目标下的零碳图景

在碳中和目标下，中国零碳能源转型意味着能源供给和消费方式的重大转变。多家智库均对中国实现碳中和乃至零碳排放目标的路径进行了研究，如清华大学气候变化与可持续发展研究院（下称清华ICCSO）、清华大学能源环境经济研究所、伍德·麦肯兹（Wood Mackenzie）咨询公司、能源转型委员会和落基山研究所等。这些研究描绘的碳中和或零碳图景展现出鲜明的特征，即能源消费与经济发展脱钩，能源利用效率持续提升，能源需求格局加速演变，能源结构持续优化升级，低碳能源技术迅速迭代。

能源需求总量在短期内达峰后下降，更高质量经济发展水平由总量更低、结构更优化的能源体系来支撑。

根据能源转型委员会和落基山研究所研究的零碳情景显示，中国2050年的终端能源消费总量将在22亿吨标煤左右，较2016年的30亿吨标煤下降27%，其中工业领域的下降幅度最大，达到27%。³一次能源需求总量从目前的45亿吨标煤下降到2050年的25亿吨标煤，降幅达到45%。一次能源结构将发生巨大变化，其中化石燃料需求降幅超过90%，风能、太阳能和生物质能将成为主要能源。从路径上看，清华ICCSO对中国长期低碳发展转型的1.5°C情景研究指出，能源消费将在2025年左右达峰，碳排放在2025年前达峰，2050年加上碳捕集和林业碳汇，基本实现净零碳排放，非化石能源在一次能源中占比超85%。

从需求侧看，再生资源利用模式的普及、能效提高以及建筑、交通和工业部门大规模电气化及氢能等新型能源的利用将重塑资源能源利用乃至整个经济形态。

在工业部门，关键材料的利用率和回收率以及生产效率显著提升，极大减少用能需求，电气化、氢能、生物能源及碳捕集和封存等技术也为重工业领域原料和生产过程的脱碳提供可能性。对于钢铁行业，未来大量的废钢供给可支持产自废钢的钢铁产量占比提高至60%。在水泥方面，建筑设计的改进和材料质量提升可以使总需求量在照常发展情景基础上减少近50%。随着物理和化学回收技术的发展，中国52%的塑料可来自回收塑料。脱碳技术方面，直接电气化最适用于中低温要求的工业领域，而氢能和生物能可用于满足高温要求。氢气还可以作为钢铁的还原剂和化学生产的原料。生物质能也可能作为替代性化工原料。碳捕集与封存将在处理工业过程碳排放和剩余的化石燃料相关碳排放方面发挥作用。

在交通部门，路面运输（公路和铁路）将全面电气化，生物燃料、合成燃料、氢能或氨将推动长途航空和船运的脱碳，而短途运输还可使用电池、氢能和混合动力等选项。在轻型路面交通领域，电动车将很快在经济性上超过内燃机车，而氢燃料电池电动车（FCEV）将最终主导重型公路运输。中国庞大的高铁网络和广泛的地铁系统将在一定程度上帮助控制道路交通的增长和国内航空交通的增长，所有的铁路出行也都可在远早于2050年前完成电气化。因为电动发动机的能效高于内燃机，地面运输部门的电气化将帮助终端能源需求的下降，生物燃料、合成燃料等目前可能比化石燃料成本高，但从长期来看技术进步和规模经济效应将推动成本显著下降。

在建筑部门，中国建筑的服务水平还有很大进步空间，而建筑领域的能效也将大幅提高，以确保能源的经济有效使用。先进热泵技术和保温材料将被更广泛利用，以零碳方式为住宅和办公室提供供暖和制冷。由于热泵技术固有的能效优势，电气化与热泵相结合能够显著降低终端能源需求。此外，可长距离运输的工业废热和生物质也将发挥作用。

从供给侧看，2050年，中国电气化水平将显著提升，高比例可再生能源成为电力系统主体，氢能将得到大规模应用，生物质和碳捕集技术也将扮演重要角色；同时，数字化将在系统层面大大提升能源供给和消费侧的整体效率。

要实现零碳经济，中国的总发电量需要从目前的约7万亿千瓦时增加到2050年的15万亿千瓦时左右，其中工业直接电气化用电量将占到52%。到2050年，中国70%的发电装机将来自风能和太阳能资源，光伏装机达到2500GW、风电2400GW、核电230GW、水电550GW。在大比例可再生能源发电情景下，储能技术将得到规模化应用，输电基础设施投入加大，同时需求侧管理等措施也将贡献电力系统灵活性。随着成本的持续下降，电池储能的容量将在2050年达到510GW。

氢能作为清洁、高效、灵活的能源形式得到大规模的应用，在各部门的脱碳化进程中发挥重要作用。2050年零碳情景下，氢能需求量将达到每年8100万吨，是目前水平的3倍以上，占到终端能源消费量的12%。氢气将主要被用于重工业原料替代和供能，以及重型道

路交通和航空船运等领域的燃料电池应用。随着未来成本的大幅下降，电解水制氢将作为零碳氢能的主要供给来源，结合碳捕集技术的煤制氢、工业副产氢气等也可补充零碳氢能来源。

生物质能源和碳捕集技术潜力得到充分挖掘，重点用于难减排行业的脱碳进程。到2050年，实现零碳经济需要每年生产大约4.4亿吨标煤的生物能源，以可持续的方式实现这些生物能的供应将是一个重大挑战。鉴于生物能源资源的稀缺和供给的不确定性，中国的生物能需要优先供给如航空等缺乏其他脱碳选择的行业。在一些工业过程中还需要应用碳捕集技术，以帮助化石能源使用完全实现零碳。零碳情景下，每年需要10亿吨封存的需求量。碳捕集的成本在各行业间差异较大，预计碳捕集、运输和封存的总成本平均值可能在55美元/吨CO₂左右。

零碳中国背景下，绿色领域投资将投向更广泛的应用场景。

全球范围内，越来越多的非国家主体也提出了零碳和碳中和目标，为零碳技术和项目提供了更多、更具体的投资场景。全球有超过70多个城市已经提出了2050年碳中和目标，⁴美国加州通过零碳电力目标法案提出到2045年实现零碳电网；以美国、英国和加拿大为主的全球大学纷纷设定零碳排放目标；仅在“科学碳目标倡议”（Science-Based Target initiative）下就有超过1000家企业提出了与将全球温升控制在1.5°C以内的全球气候目标一致的企业目标，该倡议下的很多企业将目标设定为了零碳排放。

图2
中国2050零碳情景图景



图 3

中国零碳转型七大投资领域带来巨大市场规模和效益



一些跨国企业更将零碳目标的覆盖范围推广到了其全球各地的运行机构和供应链。例如，苹果公司宣布了到2030年在整个业务、制造业供应链和产品生命周期中实现碳中和的目标，微软计划在2030年实现碳负排放，百威英博计划在2025年前在全球运营市场中推广100%可再生能源电力等。越来越多的省州、城市、园区、企业提出零碳转型目标将为未来绿色领域的投资带来巨大的市场机会和广泛的应用场景。

对于中国而言，在国家提出碳中和目标，加快推进产业升级和高质量发展的战略背景下，全国各地都将根据自身资源、产业和技术特性陆续推动零碳转型。与之相对应的零碳交通、零碳建筑、零碳能源将成为实现转型的支柱，零碳工厂、零碳校园、零碳医院、零碳乡村等将成为绿色零碳投资的具体场景。事实上，从中国在十三五时期提出的近零碳排放区示范

工程，并在广东、福建、浙江、湖北等地开展试点示范工作的情况来看，这些零碳场景将给相关技术和项目带来无限商机。

(二) 零碳中国对经济发展潜在贡献巨大

中国零碳能源转型中能源供给和消费方式的变革性趋势将催生巨大的投资市场。我们认为，零碳中国投资市场将主要集中于七大领域，即再生资源利用、能效、终端消费电气化、零碳发电技术、储能、氢能、数字化。到2050年，这七大领域将为中国实现零碳排放贡献累计减排量的80%，总市场规模将达到近15万亿。一方面，这七大领域不可替代的市场地位来自于其对零碳能源转型的突出贡献。另一方面，相关技术进步助推成本快速下降，也使得这些领域的技术和应用占领市场成为必然趋势。例如，从2009年到2018年，全球光伏发电从平准化成本已下降了81%，而在一些资源条件较好的地区，风电和太阳能电的竞价价格甚至达到20美元/GWh以下。自2010年以来，电池成本的平均年下降率将达到20%，到2024年，平均储能成本将达到100美元/kWh以下。将使这些重点领域成为投资者必争的理想标的。此外，这七大领域并非相互独立，而是共同作用，应用场景包括工业、交通、建筑和能源部门，且通常互相促进，构成零碳中国的系统解决方案。

与此同时，在2020年到2050年间，将有70万亿元左右的基础设施投资被直接或间接地撬动，包括发电侧大量的光伏和风电装机、容量持续增长的跨区输电通道、数量在千万量级的5G基站建设、物联网相关基础设施、以及交通领域加氢站和电动车充电站的加速布局和高铁、城际铁路的大规模扩展等。根据国家发改

委能源研究所的分析，未来30年，中国为实现碳中和目标，仅在能源相关基础设施建设领域的投资规模将达到100万亿元。

中国的零碳能源转型还在发展新技术和形成竞争优势等方面带来重大机遇。技术发展方面，目前中国已有全球前五大风力涡轮机制造商中的两家和前十大太阳能板制造商中的八家，大规模的电气化将推动风电和光伏技术的持续发展。在制氢的电解槽和电池的电化学能领域，目前中国已处于强势地位，且随着规模经济和学习曲线效应带来的成本下降，中国仍将继续领跑世界。此外，中国还是世界上最大的电动车市场，交通领域电气化还将大大推动电池、充电设施等的技术革新。目前，多国正发力瞄准气候经济增长点，提早布局零碳转型，将为中国赢得竞争优势的先机。

中国零碳经济还将创造大量新就业机会。例如，国际可再生能源机构（IRENA）估计2018年全球可再生能源行业（包括太阳能、风能、水电、生物能、太阳能供暖和制冷、热泵、地热能等）已创造就业岗位1100万，其中中国占400万，占全球总数的36%。到2030年，这一数字可能会上升到全球2400万个，到2050年达到2900万个，其中中国大约将达到1000万个工作岗位——远高于目前煤炭行业的就业人数。落基山研究所测算，到2050年，若循环经济潜力充分发挥，将能解决近960万个就业岗位。2050年，氢能将占到中国终端能源消费的12%，相应地将创造590万个工作岗位。此外，电动车电池行业、保温性能高且节能的高质量建筑行业和其他许多行业也将创造大量就业机会。



七大重点领域的投资机遇

创新技术的发展通常需要经历五个关键阶段，分别是技术萌芽期、期望膨胀期、泡沫破裂期、稳步复苏期和产业成熟期，最终形成核心优势，扩展适用场景，完善配套服务，受主流市场的广泛采用。

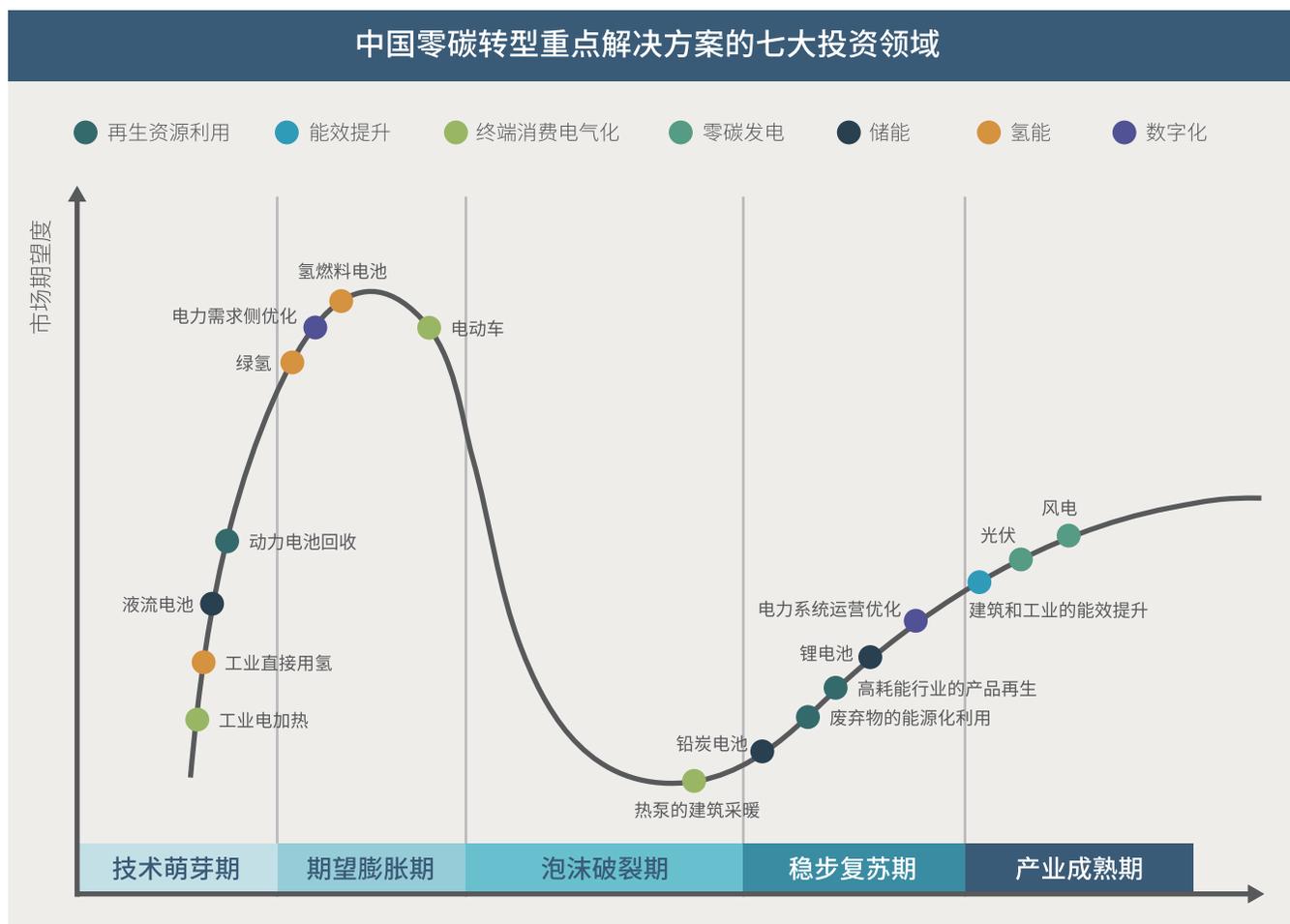
- **技术萌芽期：**潜在技术突破即将开始，出现早期概念验证和产品发布，开始引发行业兴趣。通常还不存在可用的产品，商业可行性还待证明。

- **期望膨胀期：**早期的成功案例开始涌现，对新技术的预期出现高峰，但通常也有多次失败，可能会形成投资泡沫。

- **泡沫破裂期：**一些技术或企业由于市场规模不足、产品效率低下、财务回收未达预期等原因导致泡沫破裂，行业进行优胜劣汰，投资也将倾向于更稳定可靠的企业，支持其创造出新一代产品，进入新的市场。

图 4

中国零碳转型七大投资领域的产业发展阶段



- **稳步复苏期：**基于早期经验，技术突破方向、应用领域和商业模式的机会点和雷区逐渐明晰，有关该技术如何使企业受益的实例开始具体化，更多企业开始投资，但保守的公司仍比较谨慎。
- **产业成熟期：**技术的实际效益得到证明和认可，风险水平大幅降低，技术渗透率快速上升，更多后期投资进入市场。

创新技术的发展历程包含了两个市场期望度上升的阶段，两次上升的驱动力不同。第一次上升出现在技术萌芽期向期望膨胀期的过渡，这种积极的市场预期主要来自于人们对一项新技术或创新带来新机会的振奋。但由于这个阶段的技术的实际成熟度往往较低，如果没有经过市场检验，很可能由于早期预期不能实现而导致关注度迅速回落，进入泡沫破裂期。第二次预期上升主要由技术和创新成熟度的增高来推动，技术的成熟保证了实际价值的体现。

目前，各项零碳技术创新的市场预期和产业成熟度处在不同阶段。在推动七大投资领域的技术穿越生命周期走向产业成熟的历程中，需要识别它们所处的发展阶段，基于每个阶段的特点和关键任务分析主要突破口、趋势走向和核心驱动，为政策规划、产业发展的投资决策提供针对性建议。

（一）再生资源利用—源头减量的关键驱动力

在中国，三大重点领域的再生资源利用到2050年将形成2.8万亿元市场，且可在2020到2050年间实现400亿吨碳减排，对零碳转型贡献率超30%。

再生资源利用领域的涵盖范围广、细分领域多，在对零碳能源转型的贡献和市场潜力进行综合评估后，我们识别出三个关键领域重点研究。这几个领域分别为高耗能行业（钢铁、水泥、铝和塑料）的产品再生、废弃物（秸秆、林业废弃物、生活垃圾和畜禽粪便）的能源化利用以及电动车动力电池回收用于储能。根据落基山研究所测算，若中国要在2050年实现零碳排放，那么在2020年到2050年需达成的累计减排量中，循环经济的这三个领域可实现近400亿吨碳减排，贡献率超过30%。同时，到2050年，这三个重点领域还可形成2.8万亿元的巨大市场。三大重点领域及相应的减排潜力和市场规模如下图所示（图5）。

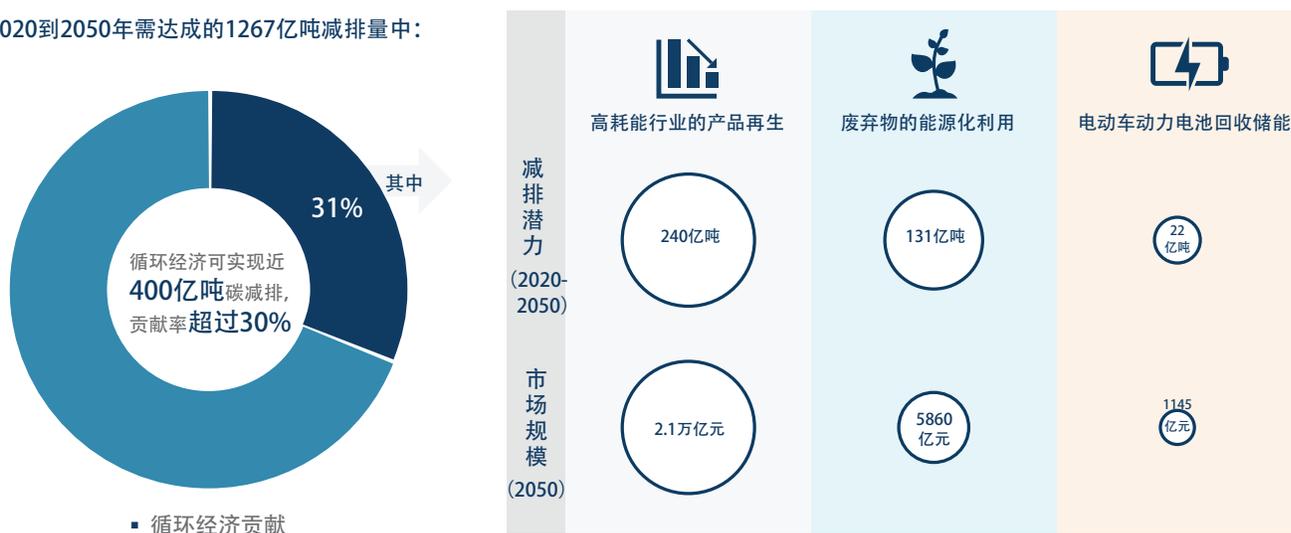
高耗能行业的产品再生:到2050年，钢铁、水泥、铝和塑料行业的产品需求减量幅度可达16%~53%，且再生产品占总产量比例可高达60%。

钢铁、水泥、铝和塑料是重要的原材料或初级产品，其工业过程能源消耗量大、碳排放多，是零碳能源转型中的几大重点领域。同时，这几个行业有非常可观的循环经济潜力——一方面，减少对原材料或初级产品的需求，主要手段包括（1）在设计和消费环节减少浪费而降低单位产品的原材料需求，和（2）通过共享的商业模式和增加产品使用寿命来降低获得单位服务所需的产品量；另一方面，减少单位原材料或初级产品的碳排放，主要手段包括（1）在设计和消费环节减少浪费而降低单位产品的原材料需求，和（2）通过共享的商业模式和增加产品使用寿命来降低获得单位服务所需的产品量；另一方面，减少单位原材料或初级产品的碳排放，主要手段为提升回收材料生产替代初级产品的占比。

图 5

三大重点领域资源再生的减排贡献和市场规模

在2020到2050年需达成的1267亿吨减排量中：



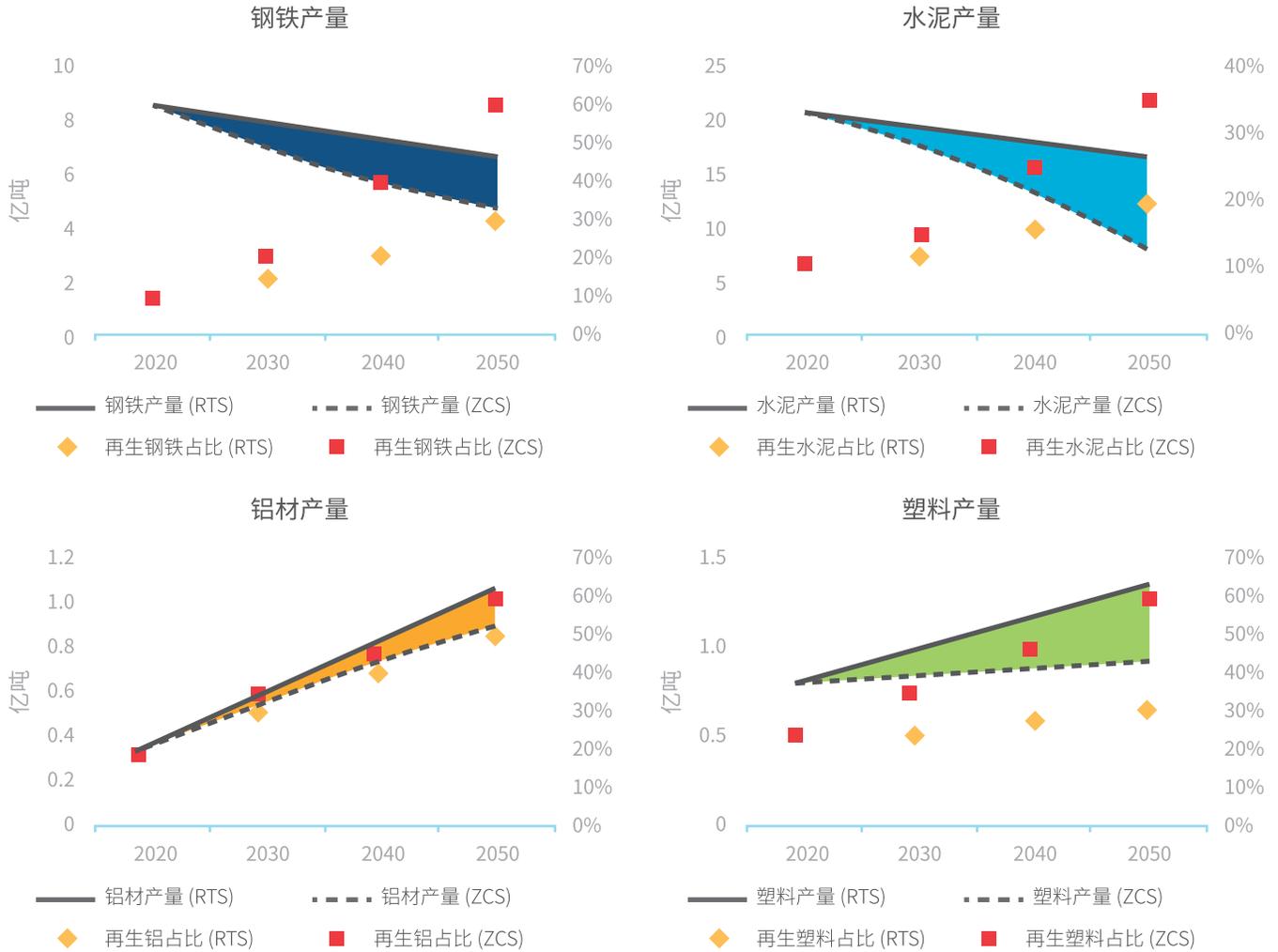
在2050年的零碳情景中，钢铁、水泥、铝和塑料行业的产品需求减量幅度可达16%~53%，且产品的回收再用潜力将得到充分释放。中国目前的钢铁年产量约为10亿吨，随着中国基建潮渐进尾声，钢铁产量即将达峰并开始下降，到2050年，在零碳情景下，中国的钢铁产量将下降到4.75亿吨。与此同时，以废钢铁为原料的短流程钢占钢铁总产量的比例将从目前的仅10%左右上升到60%，达到目前发达国家的水平。按照这一预测，中国初级钢的年产量将下降到2050年的1.9亿吨。水泥的回收利用潜力目前还没有得到释放，在中国年产的将近30亿吨建筑垃圾中，绝大部分为混凝土。中国目前的建筑废弃物资源化利用率不足5%，而欧盟国家已超过90%，韩国、日本的建筑废弃物资源化率甚至高达95%以上。尽管水泥的生产过程不可逆，并不能像金属、塑料那样完全回收，但在零碳情景下，到2050年，以混凝土形式或在较高技术要求下以水泥形式回收再造的部分仍可能占到总水泥产量的

35%。报废铝产品进入加速循环的时期也已经到来，尽管中国对铝的需求量仍将快速上升，再生铝占总产量的水平也将从目前的19%增长到2050年的60%。对于塑料而言，回收再用潜力的充分释放也将大大降低塑料生产对初级原料的需求，到2050年，再生塑料占总产量的占比也将达到60%，而目前的水平仅为23%左右。

废弃物的能源化利用：农作物秸秆、林业废弃物、生活垃圾和畜禽粪便的能源化利用潜力高达至少3.7亿吨标煤/年，到2050年市场规模可接近6000亿元。

废弃物的资源化利用潜力和潜在效益巨大。目前，农作物秸秆、林业废弃物、生活垃圾和畜禽粪便等的能源化利用领域，已经有不少企业在耕耘和收获。随着政策进一步引导和市场需求扩大，更多的投资者也开始在这一领域争相布局。根据落基山研究所测

图6 钢铁、水泥、铝和塑料行业的产量趋势和回收潜力



注：参考情景（RTS）下，技术进步、经济发展和人口增长趋势保持不变；零碳情景（ZCS）下，中国在2050年实现零碳排放。

算，对这些废弃物进行回收并能源化利用的潜力至少高达3.7亿吨标煤/年。其中，秸秆的能源化利用潜力最大，占到总量的64%。可以说，把这部分废弃物利用起来，既能减少一部分化石能源的利用，又能在废物再用上创造新的市场价值。经落基山研究所测算，废弃物回收能源化利用可在2020到2050年实现累计超过

130亿吨碳减排。到2050年，秸秆和林业废弃物、生活垃圾和畜禽粪便的能源化利用市场规模可接近6000亿元。

秸秆能源化利用形式包括秸秆生物气化（沼气）、热解气化、固化成型、炭化、纤维素制燃料乙醇等。秸

秆的热值高，2吨秸秆的热值就相当于1吨煤，平均含硫量仅0.38%，大大低于煤的1%，且比煤更经济实惠。充分燃烧后的秸秆灰渣富含钾、镁、磷和钙，可全部作为肥料还田，经济价值还可进一步挖掘。目前，中国每年森林采伐、木材加工等林业废弃物约1.4亿吨，林木修枝等产生的林业废弃物1亿吨，按利用率50%算，资源化利用后相当于4200万吨标煤。生活垃圾方面，2018年中国城市生活垃圾清运量就达到了2.28亿吨，且目前已以垃圾焚烧发电处理为主，到2020年中国生活垃圾焚烧处理占无害化处理比例目标50%，东部地区60%，行业需求增量可观，还有望超出预期。畜禽粪便方面，较有前景的发展模式为以大规模养殖场沼气工程为主体，对畜禽粪便进行厌氧发酵，所生产的沼气用于燃烧发电。目标2020年全国畜禽粪便综合利用率达75%以上，规模养殖场粪污处理设施装备配套率达到95%以上。

然而，从短期看，目前中国废弃物资源化利用的挑战在于这些生物质资源的收集难度和较高的成本，其主要原因是规模较小且较为分散的生物质来源。在未来，随着城市化进程的推进和社会经济结构的变化，潜在的土地集约化生产和农林牧场等的大规模承包模式，将显著提升可能资源化利用的废弃物资源的回收效率，成本也将大大降低。

电动汽车动力电池回收：市场爆发正当时，到2050年将成为电力系统储能主力之一，市场规模可达至少1145亿元。

电动汽车的废旧动力电池回收利用一般分为梯次利用和拆解利用两种形式。其中，梯次利用即由于电池容量降低使其在电动车中无法正常发挥作用，但电池没

有报废，仍可用于电力系统储能等其他应用。拆解利用则是将电池进行资源化处理，回收有利用价值的再生资源，如钴、锂等金属。在零碳能源转型中，废旧动力电池的回收再用能为电力系统储能提供相当大的储能容量。落基山研究所预测，考虑到部分废旧电池将直接进行拆解回收或用于其他用途，若有50%用于电力系统储能，到2050年，废旧电池回收用于电力系统储能的理论潜力将接近590GWh，相当于在电力系统储能总容量的37%。如果这部分潜力被充分利用，由于这部分储能而相应减少了用于提供灵活性的煤电厂，在2020年到2050年间带来的累计碳减排潜力达到8亿吨。到2050年，电动车废旧电池回收利用用于电力系统储能的规模可达至少1145亿元。然而，尽管潜力巨大，在实际应用中，回收的电池还需要解决一系列技术问题，同时还要和其他可用于电力系统储能的新电池竞争。

电动车动力电池回收的市场潜力来源于四个因素。

(1) 需求驱动，随着零碳能源转型趋势的发展和可再生能源经济性的显现，电网中的高比例可再生能源成为必然趋势，由此，电力消纳和电力系统灵活性的需求使得电化学储能迎来发展黄金期。(2) 供给保障，目前，最早进入中国市场的电动汽车已逐渐进入淘汰周期，动力电池的“退役潮”正袭来，可供梯次利用和再生处理的废旧动力电池供给将激增。(3) 有利的政策环境，国家发改委、工信部等部门对动力电池回收有极高关注度，一系列的相关政策对相关产业有大力支持，目前也已有五大省市对动力电池回收利用制定了目标。(4) 积极的市场氛围，尽管目前中国动力电池回收市场还没发展成熟，标志性龙头企业也还没出现，但很多资本和企业已纷纷瞄准和竞相布局，尤

其是电动汽车企业积极进行垂直整合，例如比亚迪建立了动力电池回收利用中心、北汽入资光华科技布局动力电池回收业务，未来的市场红利清晰可见。

再生资源利用的整体技术和商业成熟度高，正驶入通向生产成熟期的快车道，未来5年将是该领域规模化和投资价值变现的井喷期。

目前，再生资源利用越来越被认可为实现中国零碳转型的关键，同时也是促进新增长点形成和蓬勃发展的契机。总体来看，和零碳转型其他关键技术领域相比，再生资源利用整体的技术和商业成熟度较高，有望在近期内取得较可观的投资回报，正处于快速向成熟期发展的复苏期后期。未来5年将是该领域规模化和投资价值变现的井喷期，投资者应抓住机遇，摘取这一“低垂的果实”。

从政策上看，各国政府都在加速经济增长方式向最大化再生资源利用的循环经济转变。自2005年国务院印发循环经济首个纲领性文件《关于加快循环经济的若干意见》，2009年《循环经济促进法》正式实施，目前中国相关顶层设计基本齐备，“十二五”以来，中国资源循环利用产业产值保持年均12%以上增长。今年3月，欧盟委员会发布全新《循环经济行动计划》，拟在未来3年推出35项立法建议。循环经济已成为《欧洲绿色协议》(European Green Deal)的关键支柱。

相关的投融资市场也在快速发展。自2020年初以来，专注或部分专注于循环经济的公募基金所管理的资产已增加6倍，从3亿美元增长到20多亿美元，而这些基金的平均表现也比晨星(Morningstar)分类基准高5.0个百分点，表明循环经济带来超额回报的巨大潜力。

同时，私募基金数量也急剧上涨，到2020年上半年已达30支，是2016年的10倍，其中包括风险投资、私募股权和私募债务等基金。在银行贷款、项目融资和保险领域，欧洲投资银行和5家欧洲最大国家促进银行和机构联合推出了一项专注于循环经济的贷款和投资计划，总额达100亿欧元，意大利联合圣保罗银行、摩根士丹利、安盛保险等也积极推出相应的决议。随着相关领域投资持续爆发，再生资源利用技术和解决方案将迅速实现市场价值，更多机会也将一触即发。

虽然正值投资机遇期，再生资源利用细分领域的复杂性、分散性决定了投资需要精准把握市场脉络，同时市场的快速爆发又决定了投资者需要快速入局。上节三大重点领域中，高耗能行业的产品再生和废弃物的能源化利用所处阶段较成熟，对于投资者来说，当前要务是结合市场趋势，抓住技术和商业模式突破口，挖掘能迅速规模化的解决方案。而电动车动力电池回收用于储能则相对早期，重点仍在于技术的突破和行业规范的建立。

对于高耗能行业的产品再生和废弃物的能源化利用：

- **金属、塑料等回收产业会受进出口形势影响，因此进出口相关政策应服务于回收体系的完善和回收产品竞争力的提高。**

金属、塑料等产品的进出口格局对国内外回收产品价格的竞争形势有重要影响。例如，目前废旧钢铁回收产业正强烈呼吁放开废钢进口管制，若这一政策实施，废钢的成本将大幅降低，大大促进废钢回收产业的发展，同时也将倒逼国内废钢回收体系的完善以保持竞争力。同样地，目前国内的废塑料进口禁令也正

使得发达国家加紧塑料回收再利用的技术研发，再加上中国石油依存度高的压力，中国废塑料回收产业也需要加速发展，以应对变化的市场环境。这些因素都将影响相关投资决策。

- **通过设定区域性的政策目标，挖掘示范市场潜力，发挥带动作用。**

目前，废旧产品和废弃物的回收体系还不成熟，各环节衔接较松散，具有示范意义和引领作用的区域性政策目标会对本地市场的率先崛起起到较大的推动作用。例如，水泥的运输成本较高，对于建筑垃圾的回收也更有可能是本地化。对于有明确而强力的政策支持的地方，市场潜力更容易被开发。全国目前已有35个建筑垃圾治理试点城市，此外，部分省市已提出较高的建筑垃圾回收利用目标，如：北京市朝阳区要求3年内200万吨建筑垃圾获得“重生”，资源化率达95%以上，西安市也要求2022年底前，全市建成区建筑垃圾资源化利用率达80%以上。同理，可能源化利用的废弃物的产生、收集和使用也有本地化特征。相关政策目标的明确，将为回收利用市场指出可能的早期市场的地域，为优化投资资源的配置提供参考。

- **持续推动技术进步，重点在于避免产品和材料的降级回收，以及新型燃料和规模化工程的突破。**

钢铁、水泥、铝和塑料回收利用的技术突破关键是避免降级回收。钢铁和铝回收再产生次数的增加都会带来杂质含量的积累，影响再生产品的性能。如何提升再生金属的纯度，保证再生产品的质量，是技术上亟需突破的。目前对混凝土的回收仅停留于用于路基、河堤等的低级应用，而实际上，混凝土中未熟化的水泥

占比高达30%~40%，具有很大的高级回收再用潜力。目前，在荷兰已有相关技术，可以高效回收未熟化的水泥，从而大大降低初级水泥需求。塑料目前再生产品类型受限，无法制作成高附加值的塑料类型。从技术趋势看，能将废塑料回归到分子层级进行重新组织从而拓宽产品类型的化学回收会是未来的一大重点。对于废弃物能源化利用，能有力推动规模化的技术重点将集中在两方面，一是新型燃料技术突破，包括农林牧废弃物制航空煤油、生物柴油和乙醇等；二是规模化工程建设，如生物天然气工程、大中型沼气工程以及大型生物质锅炉低氮燃烧关键技术等。

- **挖掘具价值链整合潜力商业模式，发挥规模效应。**

规模化的突破点在于形成废物收集、处理、加工和销售系统产业，依靠高度整合的商业化模式运行，例如，专门负责废物处理的公司将有较好的整合效应和成本竞争力。目前，有两大趋势值得关注。首先是垂直整合趋势，例如，一些大钢铁企业正在布局整合废钢回收业务，通过上下游产业链垂直整合降低废钢成本。此外，智能化也使回收行业迎来拐点，针对回收行业较高人力成本，智能化的互联网+回收的模式目前也得到了诸多资本的青睐。

相比之下，动力电池回收用于储能虽然市场前景广阔，但技术和市场仍处在萌芽期，要保证该产业持续健康发展，顺利跨越泡沫破裂期进入稳步复苏期和生产成熟期，技术突破和市场规范是两大着力点。因此，在这一领域，重点行动包括：

- **把握政策动态，关注行业标准化进程。**

废旧动力电池回收体系和标准化进程的完善也有利于提升电池一致性，例如，2020年1月，在国家层面发布《新能源汽车废旧动力蓄电池综合利用行业规范条件（2019年本）》和《新能源汽车废旧动力蓄电池综合利用行业规范公告管理暂行办法（2019年本）》，推动了溯源信息系统和废旧电池综合利用数据库的建立，这将提高不同种类、不同状态的电池信息的透明度。政策层面的规范对于处于早期萌芽阶段的动力电池回收产业来说，具有重要意义。

- **着力解决电池梯次利用中的电池一致性等关键技术难题，寻找系统化解决方案。**

电池的一致性（即电池包内全部电芯全生命周期内全部特性参数的一致）是梯次利用项目顺利运行的关键。由于电池出厂时的性能设置不同，且使用时的充电方法、温度场均匀性、自放电差异等多重因素也存在差异，电动车动力电池在退役时电池容量分布极不均匀，跨度从初始容量的50%到80%不等，这将大幅增加后期的运维成本，也存在一定安全隐患。要解决这一问题，在动力电池性能衰减机理和电池健康状态评价等方面的工作尤为重要。

- **在整个产业链寻求整合机会，打通上下游各环节。**

在废旧动力电池回收领域，尚未出现优势明显的龙头企业。要挖掘规模化发展潜力，可留意产业链中不同企业整合的机会，例如梯级利用与拆解利用企业，电池生产企业与电池回收企业、再生利用企业与资源材料企业等。此外，还可以和第三方商业化服务平台和技术评估体系进行整合，探索多方合作共赢的模式。





(二) 能效—满足需求的第一能源

能效作为公认的“第一能源”，其巨大的潜力和理想的成本效益使其成为各国能源和气候变化相关政策的重点关注领域，也是推动零碳能源转型的最重要手段之一。根据国际能源署分析，要实现2°C的温升控制目标，能效在中期内（2030年前）的贡献率高达48%。⁵从应用领域看，能效提升在工业、建筑和交通部门均有巨大潜力。本节将针对工业和建筑领域能效提升的关键突破口进行展开，交通领域的能效提升潜力主要来自电动化趋势的持续深入，¹报告将在本章第三节中进一步讨论。

工业能效

工业能效是中国整体能效提升的重中之重。一方面，工业部门是中国实现能效提升的最大贡献者，多年来，中国工业能源消费强度降幅均高于全国能源消费强度降幅，2011年到2015年，全国能源消费强度下降18.4%，工业能源消费强度下降幅度则达到27%；另一方面，中国工业部门特别是钢材、水泥、乙烯、玻璃等高耗能行业的单位产品能耗水平与国际先进水平相比，仍有10%~30%的差距，⁶中国的工业节能仍有很大潜力尚待挖掘。

对工业能效提升，投资者可从四个方面关注投资机会，一是通用设备能效提升，二是余热余压利用等能源梯次利用，三是基于数字化和智能化技术的流程和系统优化，四是针对具体工业过程的节能技术应用。

通用设备能效提升方面的潜力主要来自技术和产品的先进性以及适用范围的扩展。可关注的通用设备包括

¹ 车辆的轻量化也是提升交通能效的重要手段，但由于作用较为间接，本报告未深入讨论。此外，由于零碳情景下燃油车将大大减少，本报告中也未讨论内燃机的能效提升。

电机、变压器、压缩机、锅炉等。总体来说，通用设备的技术目前已相对成熟，进一步的市场空间来自性能的逐步优化带来的能效提升空间。在市场潜力的进一步挖掘方面，可关注由于性能优化等带来的可用工业环节的拓展。对于投资者来说，可以重点关注符合上述两个条件的设备生产和销售公司以及相关项目。

余热余压利用等能源梯次利用的主要场景是园区的资源互通和协同发展。余热余压利用等能源梯次利用相关技术已相对成熟，投资关注点主要在获取市场份额的能力和对成本的控制。目前，工业园区是较有潜力的市场之一，根据不同行业、产品和工艺流程的用能质量需求，实现能量的多级传递和根据能量品位的逐级利用，进行系统的规划和利用。例如，河南一典型的高能耗工业园区——永城经济技术开发区中，通过一个煤化工企业、一个钢铁厂、一个电解铝厂和两个发电厂共五家企业的能量梯级利用措施，实现了园区12条梯级利用链条中共计10000TJ的总节能量，与此同时，空气污染物排放大大降低。⁷在成本控制方面，可通过具体项目的热源成本、管网损失、管理水平等，评估潜在标的的投资价值。

革命性的数字化技术的发展和应用的工业能效投资的一大趋势。这类解决方案通过系统优化，促进以智能制造为核心的新工业生产方式的形成。例如，在制造业能源管理控制领域，物联网技术的应用可实时反馈电能利用情况，实现设备电耗10%~15%的降低。通过在工厂数据中心使用基于人工智能的机器学习，可使冷却系统能耗降低40%，系统整体能效提升15%。⁸3D打印技术可通过实现材料用量的精准把控和物料循环

利用，大大降低产品能耗强度，在机械制造、汽车、服装制造等领域得到广泛应用。总体而言，要通过数字化方案进一步挖掘工业能效提升潜力，主要方向之一是降低数据获取难度。

针对特定工业流程的技术优化由于具有行业差异，投资主要来自行业内部。例如，在钢铁行业中，炼焦、烧结、炼铁、炼钢、轧钢等环节中，均有特定的技术手段来提高能效。邯宝集团焦化厂在炼焦环节中采用煤调湿风选技术，改变传统流化床结构，延长煤料在设备中和热风接触的时间，每年可节能3.6万吨标煤。又如，在水泥工业中，水泥窑大温差交叉料流预热分解系统工艺技术通过对物料进行再分配实现大温差高效换热，每吨产品对应的烧成煤耗可降低2.9~4.5公斤吨标煤，综合电耗降低3.5~5.0度。⁹

建筑能效

中国建筑能源消耗的主要驱动包括国民经济发展带来的城市化进程加快和人们对建筑舒适度需求的增加。2017年，中国的城镇化率达到58%。到2050年，这一数字将提高到75%。¹⁰随着城市化进程的推进，新进入城市的大量人口使得城市新增建筑需求不断增加。这不仅表现在人均住房面积的提高，也表现在商用建筑面积的急剧增加。根据落基山研究所的测算，到2050年，中国的人均商用建筑面积将赶上发达国家水平，而总建筑面积（包括住宅和商用）将达到850亿平方米。与此同时，随着生活水平的日益提高，人们对建筑服务水平的要求也不断提高，渴望更舒适健康的建筑环境。因此，要做到既满足人们对建筑环境的

需求，又朝着零碳中国迈进，推动建筑能效提升是重要方向。在这一背景下，主要有三个领域可以成为投资者的关注点。一是具有一体化和被动式设计理念的建筑项目，二是高能效的建筑供暖和制冷设备，三是为建筑管理系统性解决方案赋能的信息技术。

具有一体化和被动式设计理念的建筑项目既符合人们对“更好”的建筑的需求，又能降低建筑能耗。一体化设计从终端用户的需求出发，统筹考虑各种技术组合和建筑整个生命周期的成本与收益；被动式设计仅依靠建筑本身的设计，通过自然通风、采光、太阳能辐射得热和室内非供暖热源得热来实现室内舒适的热湿环境和采光环境，降低对主动式机械供暖和制冷系统的依赖，从而减少能源的消耗。气密性是评估被动式建筑的重要关注点。中国最早可追溯的被动房是2010年上海世博会的汉堡馆。自那时后，被动式超低能耗绿色建筑示范工程陆续开展，且涵盖了不同气候区的实践。例如，在2016年在青岛建成的中德生态园被动房技术中心，全年运行电耗29.7kWh/m²，单位面积建筑能耗仅为市同类公共建筑平均值55%。据华夏幸福产业研究院估算，到2025年被动房市场规模将达到805亿元。¹¹投资被动房产业可以关注的细分领域包括被动式门窗，遮阳系统材料、保温系统材料、设计建筑材料（包括装配式建筑技术、智能家居技术、自然采光技术等）和环境一体机。

推进高效的建筑供暖和制冷设备应用是建筑能效领域投资的着力点。供暖和制冷是中国建筑部门能源消费的主要来源。在采暖上，北方城镇地区热电联产和工业余热利用的集中供暖项目是项目投资者可以关注的方向。对于北方农村地区没有条件接入集中热网的建筑、以及长江流域冬冷夏热地区新增供暖需求的建

筑，当前“煤改电”“煤改气”的政策鼓励清洁高效的分散供暖方式，其中空气源热泵是最重要的发展领域之一，本章第三节终端消费电气化中将详述投资可关注的细分市场和产品类型。在制冷上，设备能效限额标准在不断提高，2020年7月，《房间空气调节器能效限定值及能效等级》空调新能效标准正式实施，变频空调的能效指标提升了约14%，定频空调将逐渐退出市场，市场进入新的洗牌。

信息技术在建筑管理中的普及和发展，是建筑能效领域投资的另一机会。具体应用包括对建筑中的变配电、照明、冷热源、空调、给排水、交通等各系统的运行进行实时计量、监测、响应和控制。近年来，智能建筑行业发展迅速，在地域上已逐渐从一线城市扩展到二三线城市，大型建筑智能化系统解决方案的供应商经验也不断积累。

投资建筑能效领域需要全盘考虑，不仅在单点上根据行业标准投资高额定能效的设备，还应在系统上考虑资产配置和设备的实际运行能效。优质的项目需具备可持续的计价和收费模式，稳定的用户端需求，以及平稳和经济的运营管理。

产业发展和投资建议

整体来看在过去约十年间，中国能效领域投资规模持续增长，为能效产业发展和中国绿色低碳发展提供了大力支持。2006到2016年，中国能效领域的总投资规模达到3.2万亿元，年均复合增长率44.1%。2016年，中央和地方支持能效领域的财政资金近630亿元，占总投资的近20%，同时，财政资金也拉动了规模达到2700亿元的社会资金，其中，企业自有资金投入占能效领域投资总额的26%。¹²按照能源管理系统行业的市

市场规模测算，到2050年，中国能效领域的市场规模可达到2.6万亿元。

在政策的强力驱动下，能效领域相关产业经过高速发展，已形成较为成熟的市场。但在由政策主导逐渐向市场主导转变的新时期，能效产业需要新的发展动力，以系统性地解决节能工作对行政手段依赖性强、行业和地区发展以及技术水平相对不均等问题。一方面，能效相关的支持政策还需要进一步完善；另一方面，能效产业的进一步发展还需要创新的融资工具和私人资本的支持。具体地，可以从以下几个方面进一步挖掘潜力：

- **持续完善能效相关标准体系，提高能效最低标准要求，并发挥引导性标准的指引作用。**

能效相关标准体系的完善体现在几个方面，旨在提高市场整体平均能效水平的能效最低标准的提高，鼓励市场中有竞争力、有能力的主体争取达到更高能效的引导性标准作用的发挥，以及根据标准实施情况动态调整从而确保政策得到实施的机制。更高、更完善的能效标准不仅对存量产能的持续优化起到监督促进作用，也对新建产能能效的把控起到指导和规范作用。

- **中短期内，注重政策或财政对能效领域的激励作用，但长远来看，应采取措施充分发挥资本和市场的作用。**

政策和财政的支持对能效提升的早期阶段起到重要作用，但只有充分发挥资本和市场的作用，才能使能效持续提升进入可持续的正向循环。在能效提升较为成



熟的领域，政府补贴可适时退出或逐步减少，从而给市场和社会资本足够的空间发挥作用。同时，政策的支持对象应转向最能从系统的角度激发能效提升潜力的对象，而非仅仅关注单个技术或设备的能效提升。此外，政策应逐渐从直接支持向引导市场和资本进入的方向转变，助力激活市场的作用。

- **节能服务公司应持续提升技术水平和服务能力，形成核心竞争力，助推产业升级。**

综合能源服务或成为能效提升市场的主流模式，尽管在中国的发展还处于初期阶段，但仍是具有广阔前景的新业态。而节能服务公司拥有向综合能源服务商升级的潜力，尤其是随着市场的扩大和系统综合集成要求的提升，节能服务公司面临优胜劣汰、赢者进一步扩张市场的局面。因此，对节能服务公司来说，当前要务是形成核心竞争力，以抓住巨大的市场契机。

- **金融业及其他的相关主体深度参与，积极推动融资模式的创新。**

节能服务产业的发展需要大量资金投入，然而，由于中国目前的节能服务公司大多为中小企业，经常面临资质不足导致的融资挑战。因此，需要金融业和其他相关主体深入参与，积极推动融资模式创新，采取更灵活的融资模式助力节能服务市场的发展。尤其是在互联互通大趋势下，产业的边界持续拓宽，单一的融资模式已无法满足市场的需求。通过在融资模式上形成政府-金融业-社会资本等多个相关主体的合力，发展绿色债券、绿色资产证券化等等，将有助于为能效产业和企业量身定制灵活的资金解决方案。

(三) 终端消费电气化—高品质能源应用的蓝海

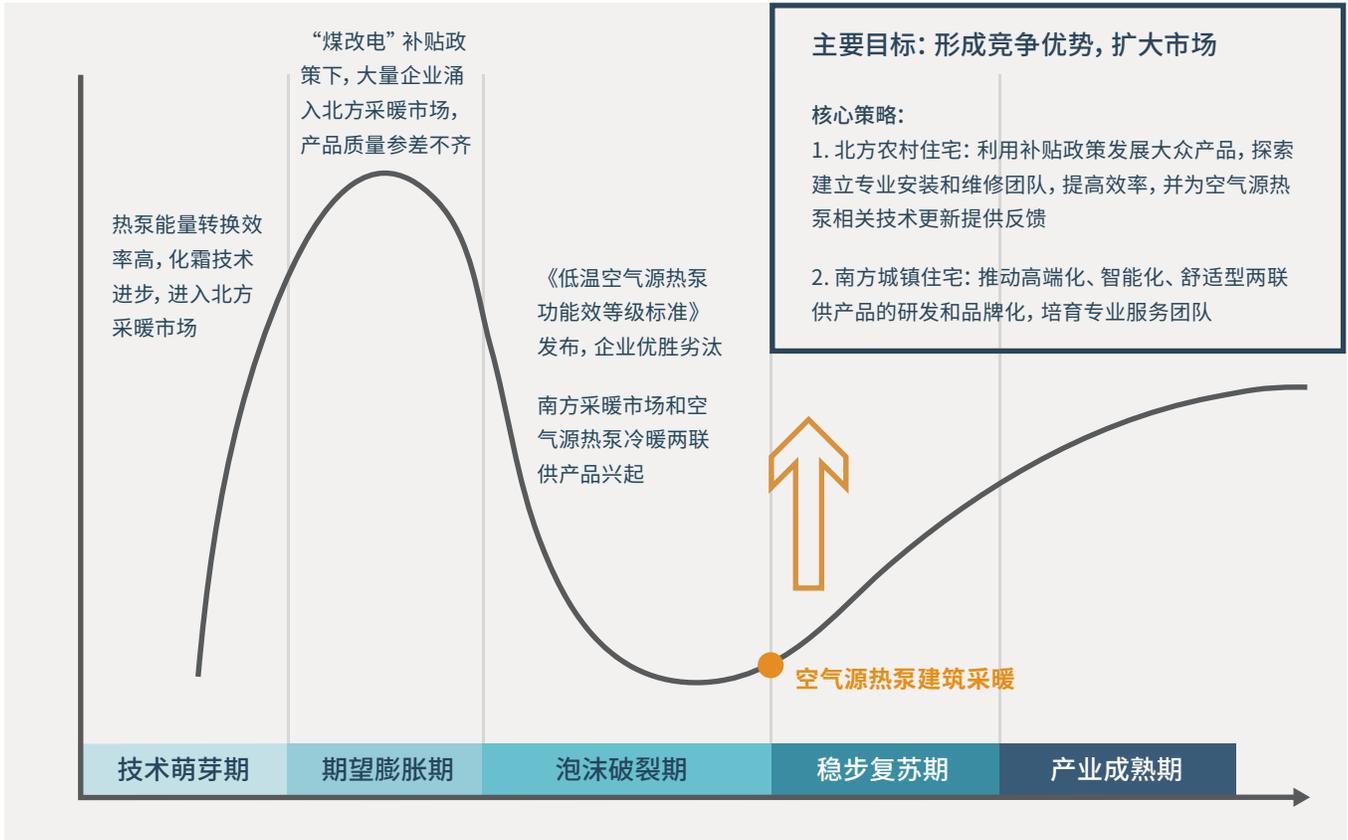
随着风能、太阳能、核能等新能源的大规模利用开发，电能将持续在终端能源消费中扮演重要角色。在零碳情景下，2050年我国的总发电量达到近15万亿度，占我国终端能源消费的比重增长至47%，其中预计建筑、交通、工业的直接电气化对电能的消耗将达到82%，具有巨大的市场规模和碳减排潜能。¹³这三大能源消费部门覆盖范围广，实现电气化的路径和重点不尽相同，我们分别识别了各个部门中的关键领域。

建筑电气化:推动空气源热泵进入南北方采暖市场

建筑供暖是电气化的主要难点，空气源热泵技术的应用和推广是关键。

目前中国建筑部门每年CO₂排放达21.3亿吨，约占全国碳排放总量的20%。根据落基山研究所发布《中国2050：一个全面实现现代化国家的零碳图景》，到2050年，在零碳情景下，建筑行业将逐步淘汰化石燃料。电气化是实现建筑零碳的关键。建筑电气化率将在2050年前逐步达到75%。目前，制冷、照明和家用电器已经实现100%电气化，建筑电气化的难点在于供暖和烹饪。随着电力部门的脱碳，与化石燃料相比，热泵技术在气候变化影响方面的优势将得到更广泛的认可。预计在零碳情景下，2050年热泵技术占建筑采暖和热水供热的比例可达到60%。¹⁴相较水源热泵和地源热泵，空气源热泵的适用性强（不受地质、管道、供应等限制，只要有空气流通的地点就可安装），在建筑采暖中的应用将成为建筑电气化的关键。

图7
空气源热泵建筑采暖发展的生命历程



技术发展与市场现状

空气源热泵采暖正在度过泡沫破裂期, 有望走向稳步复苏期。其行业技术和产品日渐成熟、标准逐渐规范、竞争走向良性, 企业逐渐完成优胜劣汰。进一步发展的主要任务是根据用户需求明确产品的竞争优势, 开拓市场。

回顾空气源热泵采暖技术的历程, 我们将明确其发展的推力、阻碍和风险, 为提出产业进一步发展的主要目标、核心策略和所需条件提供建议。

技术萌芽期: 空气源热泵能量转换效率高, 早期研发使其具备低温环境供暖能力, 拥有从南方热水市场进入北方采暖市场的技术支撑。

空气源热泵采暖的原理是吸收空气中大量的低温热能, 通过压缩机将其转变为高温热能, 采暖过程中将热转移到水中, 通过热水或热风循环, 将热量传达室内。整个系统仅消耗极少的电能来驱动压缩机运转, 吸收空气中免费热量, 理论上在平均气温为-5°C的环境下, 每耗1度电, 可产生3度电以上的热量 (COP 大于3), 机组运行损耗少, 节能效益远远高于传统

电辅热等形式。在中国，空气源热泵最早应用于南方热水供应市场。近年随着化霜技术的进步，空气源热泵在北方的低温环境下的能效表现逐渐提升，在-20℃下，几种空气源热泵的COP已经可以达到2，已具备低温环境供暖的能力。同时，空气源热泵可以根据用户偏好不同配备灵活的散热末端，包括热风机、散热器和地暖。

期望膨胀期：在“煤改电”政策下，空气源热泵通过补贴模式进入北方采暖存量市场，企业数量从400多家扩展到4000多家。

北方供暖是刚需，是存量市场。随着政府自2016年以来着力京津冀2+26城市大气污染防治，推行北方清洁供暖规划，“煤改电”已成为北方供暖的一大趋势。尤其在农村地区，建筑密度较低，集中供热管网的建设投资高、运行效率低，分散的空气源热泵供暖已成为替代农村燃煤供暖的最现实可行手段。空气源热泵不仅是一种清洁采暖的方式，还由于能效高而具备用户端运行成本低的优势。例如，在山东农村为80~90平方米的农村房屋供暖，空气源热泵一个采暖季的运行费用为1000元左右（山东无运行电费补贴），而燃煤供暖的运行费用大概在1600~2400元。然而，由于初始购机成本和安装成本较高（大于2万元），空气源热泵在北方的应用主要由政府对用户侧的购机补贴驱动，补贴比例各地区不同，通常在80%以上。早期积极的政策和明显的风口吸引了大量企业入驻，企业数量从400多家扩展到4000多家。

泡沫破裂期：大量企业在短期内的涌入，造成了市场秩序混乱。随后，2018年，行业标准的发布推动空气源热泵企业逐渐完成优胜劣汰。冷暖两联供产品兴起，在南方采暖增量市场具有潜力。

在“煤改电”政策下，大量企业在短期内的涌入，产品质量参差不齐，品牌化不足，设备售后服务缺乏专业性，导致市场秩序混乱，红海价格竞争给坚持品质的企业带来了伤害。自2018年起，随着产业技术的革新和工信部《低温空气源热泵能效等级标准》的发布，空气源热泵行业的优胜劣汰正在发生。同时，空气源热泵“两联供”的产品概念近年来在市场上兴起，冬天制热夏天制冷，一机两用，得到了广泛关注。但南方供暖是增量市场，空气源热泵面对传统冷暖空调和新兴燃气壁挂炉等市场竞争，目前还缺乏用户认知度。

走向稳步复苏期和成熟期：推动空气源热泵采暖行业发展的关键任务是明确用户需求，确立产品竞争优势，从而扩大市场占有率。其中，北方农村和南方城镇住宅是两个具有不同特点的关键市场，在产业发展中对应不同的策略和角色。

产业发展和投资机会

- **北方农村住宅采暖：利用补贴政策发展大众产品，探索建立专业安装和维修团队，提高效率，并为空气源热泵相关技术更新提供反馈。**

空气源热泵在北方农村住宅市场的增长将依然主要依托于政策补贴，发展的主要困扰是设备购置和安装成本高。空气源热泵采暖设备的初始投资（包括设备和安装）超过2万元，现阶段农村用户自己承担2000元左右。虽然运行费用比燃煤供暖更经济，但昂贵的初始投资使得政策扶持尤为关键。未来产业成本降低的突破口之一是安装和维修环节的效率提升和成本降低。现在安装速度大概一天一台，服务团队大多是空调厂商的兼职人员或代理商，而空气源热泵的供应商对安装和售后缺乏关注。要推进空气源热泵在北方的应用

成本下降，逐步简化安装流程、培训专业安装和维修团队至关重要。虽然在短期内空气源热泵在北方农村住宅市场的普及将依旧主要依托于政策扶持，但在安装技术、效率、服务的探索将为产品维护的全套模式提供反馈，逐步帮助空气源热泵采暖走向成熟期。

- **南方城镇住宅采暖：推动舒适型、高端化、智能化两联供产品研发和品牌化，并培育专业服务团队。**

南方采暖需求日益增长。舒适性是空气源热泵的主要竞争优势，符合用户购置采暖设备的最主要关注点。

在宏观经济保持快速增长、居民消费升级的大背景下，我国南方经济发达地区（长江中下游地区）用户对于生活品质的要求不断提高，对于住宅室内环境舒适度的要求也不断提高。目前这些地区冬季供暖、夏季空调以及生活热水能耗虽然所占比例不高，户均能耗处于较低的水平，但增长十分快，供暖的年平均增长率更是高到50%以上。¹⁵早在2013年，人民日报调查结果显示83%的居民支持南方供暖。南方地区冬季供

暖绝大部分为分散形式，热源方式包括空气源热泵、直接电加热等针对建筑空间的供暖方式，以及炭火盆，电热毯，电手炉等各种形式的局部加热方式。

通过中国节能协会热泵专委会进行的南方多城市消费者调研发现，用户在选择购买供暖设备的时候，舒适性是其最看重的因素，其次是易用、维修保养方便和品牌。在这一点上，相较于最广泛使用的冷暖空调，通常以地暖为散热末端的空气源热泵两联供产品具有优势。地面辐射采暖的热量是由下而上的散发和传递，使人“头凉脚热”，更加舒适。同时，可靠性高、运行能耗低、使用寿命长（12-15年）也是空气源热泵产品的相较于冷暖空调和燃气壁挂炉的优势。

供应商应率先进入高端市场，推动两联供的研发和品牌化，以舒适人居环境为核心，打造产品和服务体验最优的智能家居供暖。

空气源热泵两联供的优势明显，但其购置和安装成本的高昂也确实是市场化的一大阻碍。同时，作为一个

图 8
空气源热泵建筑采暖的竞争优势

比较项目	普通冷暖空调	燃气壁挂炉	空气源热泵两联供
安装（灵活性和经济性）			
运行成本与能耗			
供暖稳定性			
多功能（一机两用）			
舒适性			

注1：燃气壁挂炉使用费用特别高，对于燃气价格较高的长江中下游地区，一个采暖季费用将过万元。

注2：绿色代表优势，红色代表劣势，黄色代表介于两者之间。

新兴的家电品类，配套的售后维修和保养服务还未完善，仍属于普通冷暖空调维修保养的延伸业务。因此，为进一步激发空气源热泵采暖市场的潜力，企业可首先瞄准高端市场，助力符合高端用户需求的两联供产品的研发和品牌化，打造产品和服务体验全面升级的新时代家居产品。参照空气能热水器产品在中国市场发展经验和近年来逐渐兴起为主流的智能家居概念，具有市场潜力的采暖家居产品将符合几个原则：

(1) 外观小型和简约；(2) 功能紧扣健康舒适的人居环境理念；(3) 专业的维修和保养服务；(4) 构建智能化系统，用户可通过APP实现手机远程控制制冷和供暖等功能，系统可连续存储主机相关的各项数据以实现售后的精准维护。

产品进军高端市场将可能存在两种细分，面临不同的关键任务。其一是分布式集中的B2B模式，即供应商-热力公司-新小区楼盘开发商。产品应用的关键点为系统的数字化和智能化，能够通过大数据和互联网实时调控楼宇供暖情况，保证运行效率和供暖舒适性。其二是分布式的B2C模式，主要用户为别墅居民。在这种

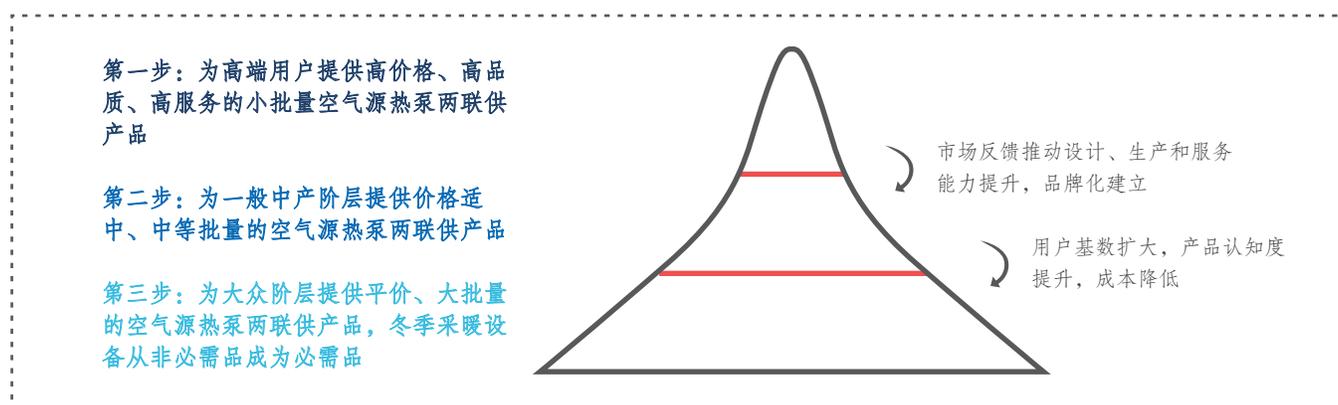
商业模式中，由于品牌方直接面对高端个人用户，用户体验和服务的搭建将尤为重要。

在高端市场成熟化的产品和服务将推动完整产业链形成，提供产品优化和成本降低的可能性，最终推动空气源热泵进入大众市场。

随着居民采暖需求的增加、空气源热泵在高端市场发展过程中的研发和服务能力提升、成本降低，空气源热泵两联供产品在南方市场的发展将可能实现类似于特斯拉电动汽车市场扩展的模式（高端-中端-大众，每一级市场的收入为下一级市场的开拓提供资金），最终形成具有差异化产品的成熟市场。同时，近年来被动式建筑理念由欧洲进入中国，建筑设计和材料的革新将有助于建筑保温性能增强。这将进一步为小型化的空气源热泵采暖设备提供市场空间。

空气源热泵采暖产品和市场的发展在南北方的核心策略差异使得其所需的政策和市场支持也不尽相同。北方农村住宅采暖市场的发展将仍主要依托于政策扶

图9
空气源热泵采暖产品在南方市场的潜在扩张路径



持。现阶段，行业能效标准已发布，产品本身逐渐完成优胜劣汰。接下来，促进安装技术进步和效率提升对于行业进步和成本降低都十分有意义。在政策端，将设备购置和安装维修环节拆分，在安装维修环节制定标准，实行以奖代补的激励，是可能的手段。南方城镇住宅采暖市场的发展将主要由市场力量推动。投资者可以主要关注定位高端市场的舒适型两联供智能家居供暖产品，包括B2B（面向高端楼盘）数字化和智能化的楼宇供暖设施，和B2C（面向别墅人群）具有高端服务和体验的家居供暖产品，合力培育品牌，推动企业和市场的成熟。

交通电气化：以技术进步、商业模式创新、用户体验升级提高电动汽车渗透率。

电动汽车渗透率的提升是实现交通电气化、摘取零碳转型成果的关键。随着经济发展，在过去40年里，中国在交通基础设施领域进行了大规模的投资建设，全国性主要公路网已经建成，人均交通运输服务用量将持续增加。根据落基山研究所的报告，从2018年到2050年，总客运周转量将从9万亿人公里上升到28万亿人公里，增长率超过200%；¹⁶到2050年，道路交通占客运活动总量的比重约为50%。届时中国每千人的汽车数量约为460辆。¹⁷未来道路交通的电气化最主要的路径包括纯电动汽车和氢燃料电池汽车，它们比内燃机汽车效率高，能在客运出行需求大幅增加的情况下实现最终能源消费的减少。对于二者的潜在发展路径，电动汽车更可能适用于短距离的乘用车客运，氢燃料电池汽车更可能适用于长距离的重载运输，但也存在着大型能源企业重新布局氢燃料汽车产业链从而



挤占纯电动汽车市场的可能性。本节主要讨论如何通过技术进步、商业模式革新和用户体验升级引领电动汽车的市场渗透率稳步提升。

中国电动汽车产业发展目前处在期望膨胀期，市场初见不同细分，包括高端和大众车型的并行发展，也包括分场景的不同充电模式的推广。近十年来，在政策的补贴支持和车企培育下，中国已成为全球电动汽车推广的领导者，截至目前，全国电动汽车保有量超过300万辆，累计建设充电站3.8万座，各类充电桩130万个。¹⁸车企在市场竞争中逐渐形成了不同价格带、不同功能和体验的整车品牌细分。这其中包括20万元以上的特斯拉、蔚来、理想和小鹏的高配车型，具有时尚的外观、优质的服务、多样的智能化功能；也包括新能源汽车下乡计划中10万元以下的奇瑞小蚂蚁、五菱MINI EV等车型，满足中低端市场中老年人的代步需求和三线小城市年轻消费者的日常出行。充电模式随着基础设施建设的推进也形成了以交流慢充为主、直流快充为辅的形式，能分场景满足用户的不同充电需求。私人用车和公务用车的日均行驶里程较短，大部分时间停留在停车场，主要采用交流慢充的形式；公交车、出租车等营运车辆日均行驶里程较长且对充电效率要求较高，因此在公共充电站主要采用直流快充的形式。同时，营运车辆品牌集中、电池规格相对一致，标准化程度较高，营运场景固定，北汽新能源在换电这一新兴的能源补给模式也展开了小规模试水。

未来，电动汽车发展的目标是继续提高渗透率。这需要既解决用户的里程和充电焦虑，同时依托智能化、网联化、共享化和人性化的竞争优势对燃油汽车实现弯道超车。总体上看，电动汽车市场的发展将呈现从高端、中低端市场两头向中间扩大的趋势，高端品牌（如特斯拉）在逐渐丰富自己的产品组合，能够为

中端市场用户提供相应车型，而低端品牌（如奇瑞）也可能在农村和低线城市提供不同价位的产品组合。造车新势力的涌现和传统车企的转型给整个汽车行业带来的新的理念和活力，电动汽车前景向好。在提高渗透率的过程中，产业发展和投资机遇表现在电池技术、用户体验设计和充电模式的完善和创新。

机遇一：电池技术进步，能量密度提升。

根据工信部推荐目录统计，我国2020年第7批推荐目录纯电动乘用车平均续航里程已达到391.4km，比2017年始提升了85%。电池系统平均能量密度已持续提升到152.6Wh/kg，其中三元体系动力电池装机比例从2015年46.1%持续提升到2020上半年的92.3%。¹⁹三元锂电池电压高，能量密度基本为240Wh/kg，按目前电动汽车对电池续航里程的要求，高镍的NCM811是重点突破方向（随着镍元素含量的升高，三元正极材料的比容量逐渐升高，电芯能量密度也会随之提高）。特斯拉使用的21700NCA三元锂电池电芯的能量密度高达260Wh/kg，是目前量产电动车里最高的，镍钴铝比例为8:1.5:0.5，属于“高镍电池”。但对于三元锂电池而言，300Wh/kg会是它难以逾越的鸿沟。因此，由固态电解质代替隔膜和电解液的固态电池成为下一个受关注的突破口。固态电池直接使用金属锂来做负极，相比于石墨明显减轻负极材料的用量。固态电池的能量密度能够突破400Wh/kg，使得电动汽车续航里程突破1000km成为可能。同时，作为电动汽车行业的领导者和革新者，特斯拉致力于自主进行电池设计，推动技术革命，其9月新发布的更大的电池尺寸、无极耳电池设计或将引领动力电池的新一波潮流。通过采用大电芯方式，降低成本，提高集成效率，提升能量密度，可以持续关注。

**机遇二：以智能化、网联化、共享化和人性化赋能，
打造电动汽车成为具有车辆外形的大型智能终端。**

电动汽车是智能化和网联化驾驶最理想的载体。首先，电动汽车的电池容量大、电气化水平高，对于智能化驾驶的各种零部件设备的供电具有天然优势。其次，电动汽车能够更好地落地自动驾驶所需要的线控技术，而传统燃油汽车的底盘、制动、转向等大部分还是由机械控制。同时，电动汽车反应时间短，能够提供优于传统机械的控制精度，实现实时响应。电动汽车还可能根据用户的驾驶记录和分析海量的数据，为优化驾驶体验、提供个性化服务提供强有力的支持。根据德勤公司的报告显示，70%的受访人群期待创新科技在新能源汽车上得到最大程度的利用。²⁰ 电动汽车已不仅仅是满足用户出行的交通工具，还是集科技、潮流、休闲为一体的大型智能终端。

据业内有关人士表示，面向个人用户的乘用车电动化难以得到质的提升，根本原因是缺乏从消费者出发设计的产品和服务。未来，汽车的拥有和消费模式将会有所改变，智能化、网联化、共享化和人性化是推动电动汽车体验设计的重要原则，具体服务包括智能安全、O2O涉车服务、情感互动、行为记忆、个性服务推荐等等。²¹ 随着互联网的进一步发展，投资终端用户服务领域具有广大的创新空间和利润空间。而蔚来等造车新势力还在探索用户社群经济模式，把社交引入电动汽车市场，激发用户在电动汽车全生命周期中的消费。这些终端体验设计的升级将推动电动汽车成为用户表达自我，享受科技、潮流、休闲体验的大型智能终端和个性化空间。购买电动汽车也将会成为成为对新的生活方式和理念的拥护。



机遇三：分场景扩大充电模式布局

虽然电池技术的突破使得续航里程的理论值能大幅提升，但对于潜在的电动汽车主流用户而言，高达1000 km的续航实际上只应用于发生频率较低的长距离出行。同时，政府的补贴政策正在逐渐从购置端转向运营端和基础设施建设。2018年11月四部委印发了“关于《提升新能源汽车充电保障能力行动计划》的通知”，要求引导地方财政补贴从补购置转向补运营。因此，玩转电动汽车的充电技术和商业模式，完善充电性能、服务和体验成为重要突破口。在最普遍的慢充（6-8小时）和快充（0.5-1小时）的基础上，近年来，以特斯拉为代表的超级快充（15分钟）和以蔚来为代表的换电模式（5分钟）成为电动汽车行驶中的新兴充电补给方式。不同充（换）电模式适用于不同场景和人群，可以预见未来电动汽车充电将有望形成以慢充为基础，以快充、超级快充和换电为辅助的多个细分市场。同时，充电桩作为纽带将车和电联系起来，实现车网互通，既能提高充电效率，又能使得电动汽车本身成为储能单元。此外，在其他行业共享经济和社区经济的发展带动下，社区充电桩共享共联和连带服务的创新将可能是充电商业模式发展的机遇。

工业电气化：新兴电加热技术助力工业加热变革

在全球范围内，大约10%的温室气体排放来自于提供工业生产所需要的热量，这一数字甚至高于汽车与航空行业的排放加总。²²在大多数工业生产过程中，提供高质量的热是最重要的环节之一。譬如，在水泥、钢铁和化学品领域，主要生产过程的原理包括矿石冶炼、化学键断裂和产品内能的增加，这些都需要高质量的热能作为支撑。现阶段，热能供给主要来自化石燃料的燃烧，这使得工业加热成为工业部门温室气体

排放最大的来源之一。从全球范围来看，其排放贡献已达到40%。²³因此，促进工业加热领域的减排对于工业部门的减排，乃至整个零碳图景的实现都至关重要。工业加热技术的电气化是重要技术手段之一。

利用化石燃料提供工业过程热，已能具有高温性、持续性和稳定性。因此，任何工业加热领域的低碳转型，都应该符合现阶段的基本要求。工业生产对于加热技术所需的主要条件包含三个方面：（1）温度：温度的需求依据不同工业部门产品而不同，横跨200至近2000摄氏度。（2）热通量：工业加热通常需要足够大而稳定的热通量来维持工业产品产量。（3）可靠性：大部分重工业部门的生产活动采用了大型设备，固定成本高，运行率高（通常在60%-95%之间）。因此，工业过程的热量供给需要系统规划，保证充足稳定。²⁴

如今，已有不同种类的电加热技术适用于工业过程，具有三大主要优势：第一，电加热系统可以通过调节电压、电流等有关参数精确控制加热过程的温度和热量输送，减少能源损耗并确保生产自动化；第二，电加热系统具备快速启动和终止的即时性，使得生产运转具备高度的灵活性；第三，电加热系统的维护成本较小。由于不需要贮存燃料、创造燃烧环境，间接加热技术（微波等）还能避免使用化石燃料时燃料与反应物接触，可以进一步控制反应环境不受污染。在工业电加热领域，主要技术手段包括：

- **电阻丝加热：**原理是电流通过一段带电阻的导体会产生热量。适合低成本小功率短时间的加热。
- **红外加热：**红外加热属于热辐射，辐射源被加热后，内能转化为辐射能，通过红外线传递到被加热物

体。通常红外加热源电热转化效率都超过90%，适用于表面加热的场景，如油漆烘干、食品快速脱水等。

- **微波加热：**微波是特定范围的电磁波对能吸收微波的物质引起内部分子的振动达到加热效果。微波加热均匀速度快、清洁无污染，在食品行业中得到应用。
- **电磁感应加热：**交变电场产生交变磁场，被加热物体切割磁场，内部产生涡流而被加热。电磁感应加热应用需电磁加热器、感应线圈和被加热的物体组成一个完整感应加热系统。优点是加热快，节能效果好，智能化程度高。在塑料行业、食品等行业中应用。
- **电弧炉：**利用电弧放电给被加热材料传递热能。工业电弧炉能加热到1800摄氏度，通常用在钢铁行业。

产业发展和投资机会

工业电加热技术的发展尚处在早期阶段，在大宗商品生产过程中的应用需要关注有关设备大型化和生产流程改造的政策支持。在中国，工业电加热技术的发展还在早期阶段，有关信息也较为缺乏。电加热技术的引入使得工业部门的电力需求大幅上升，同时涉及基础设施的搭建和工厂设备的改造。因此，在短期内，关注有关节能改造的政策信号尤为重要。重点工业部门（钢铁、水泥等）的节能改造政策若采取了强制性要求，电加热将是实现工业节能减排的潜在路径。

工业电加热技术在新兴行业和高端产品制造的应用具有较大潜力，包括锂电池、石墨烯等新材料。这些新兴产业的工业生产流程和传统大宗商品有所差异且更多涉及到新建产能的布局，给电加热技术打开市场。



(四) 零碳发电技术 — 能源供给侧零碳化的基石

电力行业在全社会二氧化碳中占比高，2019年贡献了全社会超过40%的排放，¹³主要来自于火电机组的燃烧排放，因此发电端的低碳化对于全社会的减排至关重要。随着各类终端应用电气化程度逐步提高，未来更多能源供应将以电力的形式提供，进一步发展高效低碳的电力系统将是实现零碳目标的关键。这将要求系统需要部署大规模具有经济性、安全并可持续的清洁能源。根据ETC分析，预计到2050年，风光将贡献近65%的发电量，核电10%，水电14%，生物质10%，配以碳捕集的天然气发电4%。在零碳情境下，预计到2050年，相较照常情景电力系统总减排量将达到330亿吨，年市场规模达到4.5万亿元。

1. 产业现状与未来趋势

电力行业正在经历低碳化转型。通过风光的快速渗透、核能稳健发展、水电有序开发、煤电机组效率提升、各类其他低碳发电技术齐头并进，从2005年至2019年，电力系统碳排放强度的降低了33%。在今天，将在未来装机结构中承担主力的零碳发电技术已经非常成熟并形成了完整的产业链-设备制造本土化程度高，并形成本土龙头涌现的格局；项目开发行业市场竞争更为激烈，特别是在风光项目上，国有企业、民营企业、外资企业多点开花；后期运维行业也出现了各种类型的服务提供商从传统的能源公司到新型的科技创新型公司。这为电力行业长期的低碳化转型打下了坚实基础。

图 10
2050年零碳情景下电力系统发电量与装机量

* 到2050年天然气机组配备CCUS装置

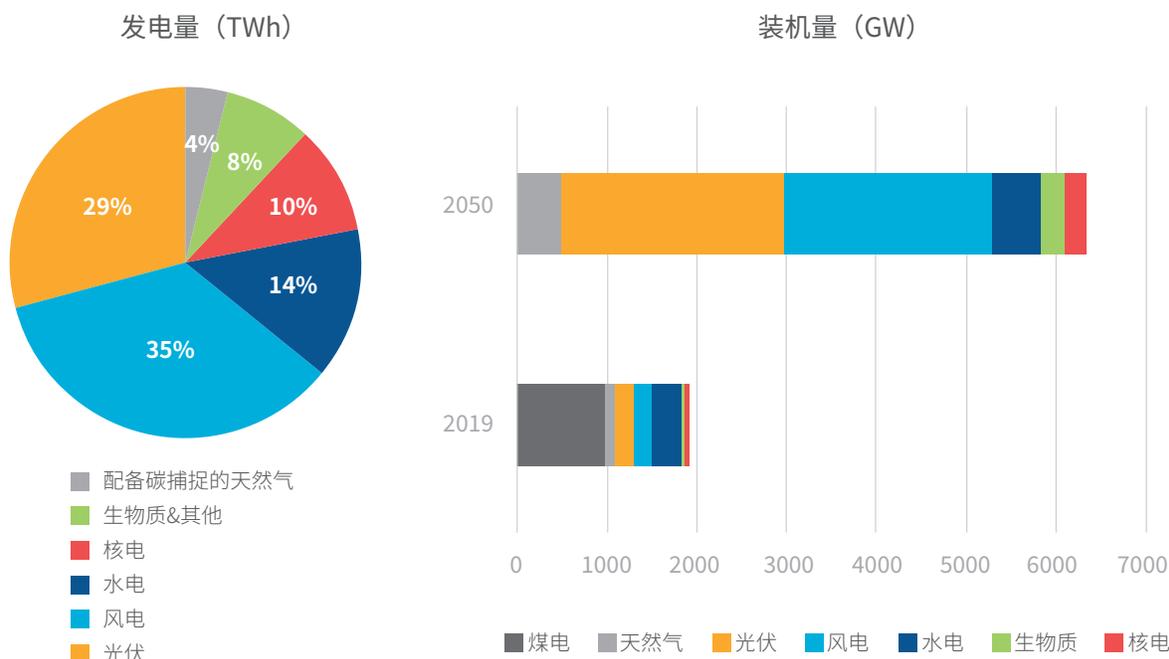


图 11
电力行业产业



风光发电经济性日益提升，未来可期。一直以来，上网电价补贴推动了风电和光伏装机的高速增长-十三五以来，风光装机从2015年的172GW 增长到2019年的414GW。2010年至2019年间，中国光伏与风电的发电成本分别下降了82%与36%，²⁵主要得益于技术进步与规模效应降低了光伏组件、风机设备的投资成本，不断提高的发电利用率与日益成熟的产业链。随着风光发电成本的大幅下降，政府逐年下调补贴标准，并出台了一系列政策下加速可再生能源电力平价上网-陆上风电与集中式光伏也逐渐完成了补贴退坡。自2022年起，所有新投产的陆上风电项目将不再享受任何补贴。虽然并没有明确光伏的补贴退出年份，根据2020年最新竞价的结果，平均补贴在每千瓦时3分左右（要求在2020年底并网），市场预期，2021可能不再有光伏补贴，或者非常微薄。根据BNEF，风光已经在中国部分省份实现平价，并有望在近期内全面低于煤电，成为最便宜的电源（图12）。²⁶而风电和光伏受自然条件约束小，待开发潜力巨大。回顾发展历史，两者技术尚未遭遇技术瓶颈期，仍呈现快速降本的趋势。

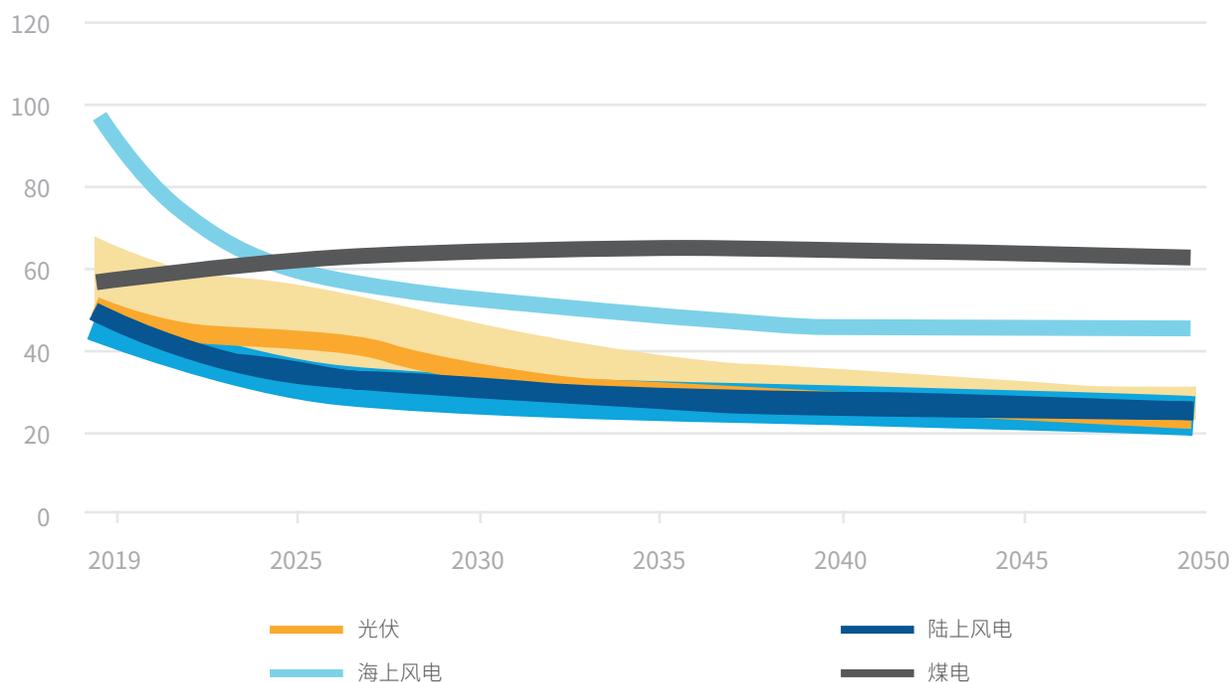
核电发展具有战略性发展意义，但将受经济性制约。中国各类地区资源禀赋差别大，风光水资源集中在西部和三北区域，东部地区可再生能源资源相对贫瘠（除了海上风电），核电将继续作为一种重要的资源支持东部的电力系统。不同于其他电源，在核电发展

中，安全性是重中之重。核电的安全性一直以来虽然可以通过采用加强防御，即不断提升核反应堆的设计、建造和操作，配备完善各类安全系统。但这大幅增加项目造价，缺乏商业可持续性，制约核电的大规模发展。目前中国的大部分核电厂采用第二代加以压水式核反应堆为主，随着三门核电、田湾核电等项目的投产，第三代核电技术进入加速期。但是根据投产的三门核电站数据，²⁷造价明显高于二代核电。**三代核电有望通过项目经验的积累和本土化生产降低成本，长远来看三代发电成本预计将保持与当前二代成本相当。**第四代核电反应堆技术的出现被认为是解决长期核电安全问题的更优方案-旨在降低堆芯熔融的概率并能快速恢复运行，同时，对经济性提出了要求-缩短建设周期，降低单位电价。虽然新的先进反应堆可以追溯几十年前开始已在国家实验室试验测试，但仍处于早起阶段，目标到2030实现商业化，至2040年达到大规模应用，未来先进堆仍存在较高的不确定性因素。

新的水电项目发展规模将受自然环境限制。水电目前是最具经济性的电源之一，对经济实现低碳系统转型扮演着至关重要的角色。从2010年至2019年，水电装机从213GW增长至328GW。预计随着低成本的水电项目的陆续开发，未来水电项目开发难度将提高，经济性低于已经投产的项目。由于受自然条件影响及出于对生态保护考量，未来中小型水电项目的开发将受严

图 12
中国新建电源成本趋势比较

美元/兆瓦时（2018年实际价）



来源：彭博新能源财经

格控制，大型项目的开发主要以国家重点工程建设为主，如将要投产白鹤滩水电，增长将逐渐放缓。水电项目的开发集中度较高，其中七大能源集团-三峡、华电、大唐、国家电投、华能、国电、国投，占全国装机量的54%。²⁸ 凭借长期积累的项目开发经验，行业龙头将保持未来项目开发的主导地位。

中国的生物质供应主要可来自于农作物秸秆和其他农业废物、木材废物、能源作物和自城市垃圾，其中农作物秸秆和其他农业废物超过一半。一方面农林废弃物密度低、体积大增加了收集难度，另一方面由于中

国种植分散，缺乏大规模系统收集机制和完善的收集和物流系统，目前农林废弃物利用率非常低。而能源作物用地将与粮食耕地形成竞争，存在较大的不确定性。由于中国生物质可用资源有限，未来生物质资源将优先用于航空等领域的脱碳，在电力应用有限-主要体现在为可再生能源主导电力系统提供灵活性支撑。

氢能可通过水电解产生，利用多余电力，通过在燃气轮机中燃烧或通过燃料电池转化为电能。通过氢能发电尚处于非常早期阶段，目前已经有一些项目正在开发中，将传统的天然气厂升级为燃烧氢气和天然气的

混合燃料。未来氢能发电主要应用场景将提供季节性平衡，而不是提供大规模发电。随着电解槽成本的快速下降，氢气将成为季节性储能的低成本解决方案。

未来的电力行业发展将呈现风光为主、水核为辅的发展趋势，并配以其他的灵活性发电资源以实现高比例可再生能源电力系统。预计，受风光成本驱动，行业中发电成本将呈现成下行趋势。

2. 投资关注点

因为电力作为一种同质性极高的产品，经济性将对电源的发展潜力扮演决定性因素-对于各类发电技术及相应供应链来说，进一步的降本将是发展的核心。

发电成本主要由投资成本和运维成本构成。其中投资成本又可分为包括设备采购、项目建筑施工等在内的技术成本和土地费用、并网工程、融资等非技术成本。电站运维，主要是通过预防性、周期性维护以及定期的设备性检修等手段，科学合理的对电站进行管理，以保障整个电站发电系统的安全、稳定、高效运行，从而保证收益回报。目前人力成本是占据运维成本的主要部分。项目的运维正朝着数字化、自动化、智能化的方式转型，以提高效率、降低人力作为降低运维成本的突破点，如提高发电预测准确性，优化系统运行等。运维部分将在数字化章节详细介绍，本章节将侧重从**降低投资成本**入手介绍未来降本的趋势。

光伏

● 技术成本

光伏系统中组件占初始投资成本的一半，降低组件成本对发电成本影响巨大。组件成本继续降低可以从效率提升突破。组件效率的提升，可以提升单位面积内

的发电量，不仅降低了组件本身的投资成本，同时也会降低了对土地及其他系统设备的需求。

○ 优化升级组件系统设计实现进一步效率提升。

双面组件能利用来自地面等的反射光发电，效率提升相较单面组件达到5-20%（基于不同地面的反射率）。其中双面光伏组件的背板采用透明玻璃，由于玻璃透水率极低，对湿度敏感度低，可以避免因水汽进入组件导致的输出功率下降。这类组件对环境适应性更强，适用于建设在较多酸雨、盐雾大、高温的地区的光伏电站。根据国际光伏技术路径图，未来十年能达到40%市场渗透率。²⁹

○ **新材料技术解锁新的效率潜力。**随着技术发展，各类光伏技术路线效率一直在不断提升。从早期的多晶硅到现在主流的PERC组件，效率从14-15%提升至22%，组件成本下降超过90%。2019年PERC市场占有率超过65%。³⁰**由于现在基于硅晶的光伏技术已经获得大规模部署、产线不断扩大并趋于成熟，未来非硅晶新材料的大规模取代现行的技术路径，将面临较高的行业门槛。**当目前的技术遇到天花板，新型电池类型将获得更大发展机会，N型电池利用行业在晶硅电池领域深耕多年的技术经验积累，将会是电池技术发展方向之一。此外，一些能与现行主流技术结合、发挥协同效应的新材料也受到了极大的关注，如钙钛矿作为一种薄膜技术叠层，吸收另外一部分光谱发电，提升整体的发电效率。

● 非技术成本

对于光伏项目来说，技术的升级突破能带动技术成本的下降，但是目前发电企业面临的非技术成本却是一

个不可忽视的问题。**降低土地成本、并网难度及其他非技术成本有望通过模式创新实现。**

土地多维利用。在东南部、经济更发达的负荷中心，土地稀缺性将制约集中式项目发展，有越来越多集中式光伏项目以农光互补、渔光互补的形式开发，在渔农业产出的同时创造了新的经济价值。各种新型的光伏应用场景也获得拓展：

- **漂浮式光伏：**将光伏发电组件安装在水面漂浮体上，不占用土地资源且能通过水体冷却组件提升发电效率，同时，漂浮式光伏可以减少蒸发，抑制藻类生长，提高水质。
- **建筑光伏一体化(BIPV)：**可作为建筑多种表面如墙体、屋顶，一方面生产电力可供建筑使用，同时提供了一定程度的隔热提而效。

分布式电源成为主流。随着装机的增长，最适宜发展的地区及并网点往往最优先被开发，同时由于电网中可再生能源渗透比例的提高，电网消纳难度提高，这都将增加新项目的并网成本。在过去两三年中，分布式光伏因为土地成本低、经济性高、靠近负荷中心而降低并网难度等原因，发展快速，也将是未来发展的一大趋势。而BIPV的成熟渗透将解锁更广泛的分布式市场。

在电力市场变革的大背景下，**创新商业模式**的出现为降低非技术成本带来新的机会。

- 由于电力市场管制化程度高，过去新能源发电企业习惯与电网形成单一的买卖关系-直接将所有

的电上网。未来随着风光的不断渗透及电力市场化改革的加深，传统的买卖双方关系将打破。随着市场化电量比例日益增高，电网的角色也从原本的售电代理方正转向一个第三方传输角色。未来可再生能源项目将需要探索新的商业模式，通过与终端用户直接形成合作关系，签订长期购电协议，一方面为项目提供长期价格保证降低现货市场带来的价格风险，另一方面也有望解决并网难的非技术成本痛点。

- 随着分布式电源的快速增长，传统的电力消费者（consumer）逐渐转为生产消费者（prosumer），现在这类电力用户将电卖回给电网。未来随着这种类型的消费者比例不断增加，与邻里交易（peer-to-peer transaction, P2P）将成为可能，也能集合电量形成一个小型虚拟电厂参与到电力市场中。

风电

虽然过去十年陆上风电投资成本降速喜人，但是在过去两三年内降速放缓。海上风电由于出现历史较短，仍存在大幅降速的潜力。未来，除了规模经济的提高、更具竞争力的供应链，技术的进一步创新将继续降低风电投资的成本。

● 技术成本

- **叶片直径继续扩大、单机容量不断增大提高发电效率。**随着叶片长度增加，扫掠面积扩大，能捕获更大更稳定风能。陆上风机平均容量从2010年1.9MW上升至2019年的2.6 MW，发电利用率从27%提高至34%。³¹据IRENA预测，随着风机容量的扩大，陆上风电全球平均利用率将从进一步

2030年的30%-55%，以及2050年的32%-58%。³² 由于中国风能三分之二的资源来自低风速资源，提高风能利用率将加速发电成本下降。在同等项目规模下，更大的单机规模将降低风机数量-减少安装与运维成本，并降低征地需求。风机容量扩大对海上风电经济性将带来更显著的影响。而海上风电目前单机最大的容量约为9.5MW未来扩大到15-20 MW，而平均发电利用效率能从2018年的43%，提升至2030年的36%-58%，2050年的43%-60%。³³ 同时，随着叶片的扩大，塔筒也相应增高，这对于风机的建造、运输都提出了极高的要求，需要找到最优化的单体容量。

○ **材料学提升现有风机的性能。**通过更高性能的材料及设计，也可以提升风机的发电效率。通过叶片的轻量化，如采用碳纤维复合材料，有助于降低对其他部件的减轻承重要求，降低整体风机成本；同时轻量化的风机在相同的风速下，抓取更多风能，提高转换效率。此外，改善叶片空气动力学和材料，使风机更具有韧性与可靠性，适应一些更极端的气候天气，特别是沙漠、近海、极地等环境中，延长使用生命降低运维成本。

○ **模块设计降低生产成本。**高度定制化的风机设计不利于实现规模效应快速降低成本。模块化设计可降低产品的设计开发、生产、推出周期，并通过优化组合满足各类项目差异性的需求。同时模块化设计也有望解决大风机带来的运输和吊装等挑战。

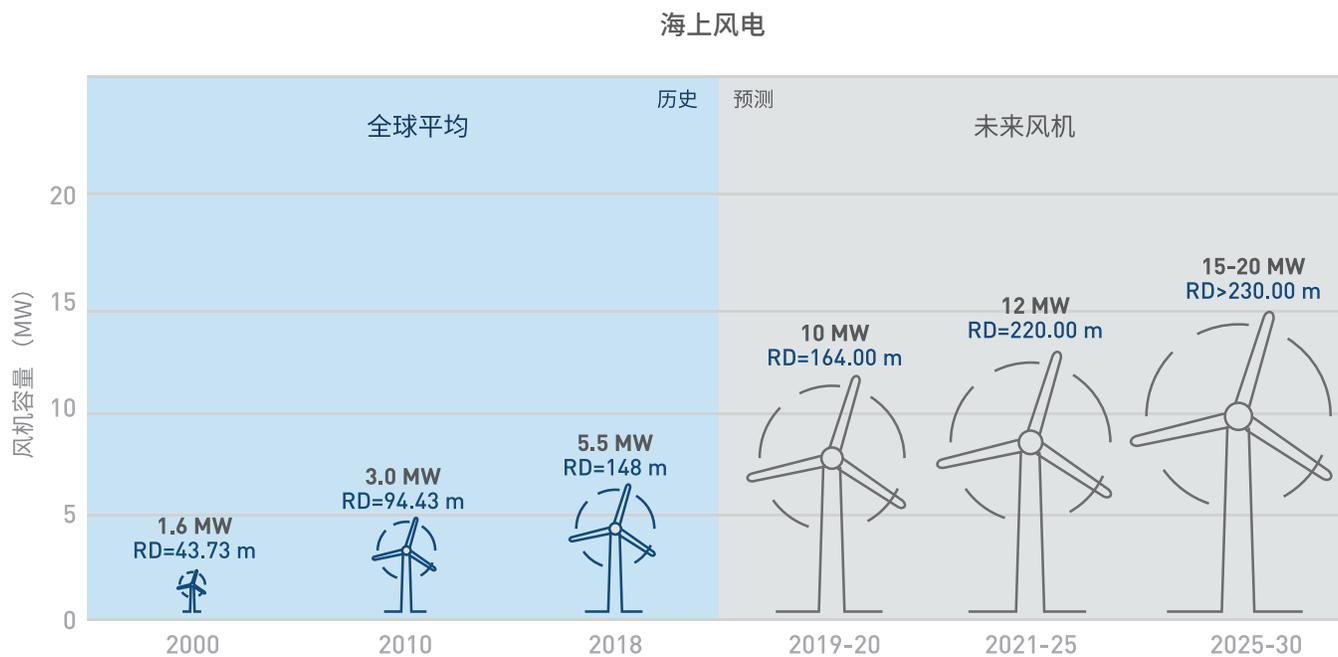
○ **融合海洋学地质学在海上风电项目的应用。**海上风电成本中支撑结构也扮演很大的角色，近年随着从浅海像深海发展，项目成本逐年提高。通过提



图 13
风机容量变化趋势



*RD: 风机直径



来源: 国际可再生能源署

高对选址、结构的了解以及海洋知识储备，进一步优化风电项目设计开发。近年来，有越来越多的油气企业加入了海上风电开发的行列中：这些企业可以利用多年在海上钻井开采的经验，推动海上风电的高效开发。

- **漂浮式技术推动深海海域风能利用。**目前中国现有的海上风机主要采用的是固定式基础，基本都安装在浅海区域，水深不超过30米。一方面超过85%的风力资源在水深超过20米的海域，另一方面近海项目的开发需要平衡航运的需求，海上风电开发势必将转向深海海域。随着海上风机走向深海，水深增加，固定式风机技术难度大幅增加，建造安装费用急剧增加。漂浮式有望使深海项目成为可能，解锁更多海上风能潜力（图14）。但是漂浮式风机发展尚不成熟，全球范围内项目经验有限，仍需面临市场的验证。

- **非技术成本**

与光伏项目面临类似的挑战，非技术成本对于风电项目也是一个不可忽视的问题。因为风电项目平均装机规模较大，且往往在夜晚出力更高，出力曲线与负荷

负相关，增加了并网消纳的难度，提高了非技术成本。由于风机倒塌的潜在风险及噪音等方面的考量，中国风电项目目前仍集中式开发为主，分散式风电面临较大阻碍，短期内发展规模受限。近来，通过风光一体或多种电源联合开发的方式，可以降低风电项目整体的出力波动与并网难度。在光伏一节中提到的，新兴的销售模式也将适用于风电行业，帮助解决并网的挑战。

3. 产业发展和投资建议

随着零碳发电行业日益成熟，对补贴的依赖大幅降低，逐渐向市场主导过渡。宏观规划通过设立长期装机目标，为行业发展传递政策信号，促进行业有序稳步发展。

政策建议

- **设置补贴退出时间表并明确可再生能源项目未来经济性。**过去补贴政策有效促进了产业的快速扩张，推动成本下降。随着经济性提升，陆上风电与光伏补贴将陆续完成退坡，但海上风电技术相对其他零碳技术仍处于发展上升期，技术风险更高，经济性仍需提高，特别是漂浮式海上风电，短期内仍将高度依赖补

图 14
中国漂浮式风电潜能³⁴

深度 (m)	海上区域 (km ²)	风能 (W/m ²)	漂浮式风电潜力 (GW)
0-20	310815	110	496
20-50	363322	214	1127
50-100	377240	409	2237

来源：国际可再生能源署

贴。参考过去风电与光伏补贴退坡历程中，补贴信号对市场影响重大，如2018年中的光伏“531”政策意外出台，对行业造成了巨大冲击，当年光伏装机增长放缓。政府需明确各类技术补贴退出的时间表，帮助投资者形成长期的政策判断，制定相应的战略规划，并加速降低项目开发成本，锁定项目长期经济性。在后补贴时代，通过完善绿证机制激活绿证市场，有望为可再生能源项目带来新的收入来源。

- **协调可再生能源发展与电网规划。**随着项目开发产生的规模效应，技术成本有望进一步下降，非技术成本占比在总发电成本中会越来越高，有可能制约可再生能源项目发展。由于当地电网接网能力有限，实际并网过程仍然是可再生能源项目发展的一大障碍。电网规划应与长期的可再生能源量化目标相一致，以确保当地系统能够支持这种可再生能源的增长。这反过来又可以简化可再生能源项目的开发过程，加快项目部署，并推动降低并网成本。同时，其他激励性的土地政策、绿色融资也有助于降低非技术成本。

- **完善电力市场提供价格信号。**完善的电力市场，将以最经济的调度方案优化系统运行。在没有现货市场的情况下，目前可再生能源是按照政府规定的价格和保障小时数进行消纳。在那些可再生能源渗透率较高的省份，可再生能源发电超过保证小时数就会面临潜在的弃电风险，可再生能源要向火电支付费用，保障出力。这种机制使可再生能源项目面临更大的价格不确定性和经济风险。

- **警惕行业转型风险。**过去中国高度依赖煤电，催生出了完整先进的设备制造产业链。在零碳发电行业蓬勃发展的背后，煤电的市场份额将逐渐缩小，在保证

煤电机组有序退出的同时，需要兼顾煤炭业、及相关制造业将面临的转型压力。结合自身优势，稳步向新能源产业布局过渡。

市场建议

- **发电资产投资电力市场改革带来新的风险与机遇。**

随着电力现货市场的启动，对于发电项目来说未来最大的价格风险将来自于时时波动的电力市场价格，项目的经济性存在不确定性。投资者需要提高对电力市场的能力培养，研判未来价格趋势，做出项目投资的决策。同时，价格信号的出现，将提高电力系统的市场化程度，投资者可以通过价格动态，了解供需关系，发掘新的商业机会，如参与到P2P交易。

- **完善电网配套基础设施升级以支撑电力系统的低碳转型。**

特高压的发展使远距离优化可再生能源资源成为可能，输电设施不断完善升级，支撑了大量风光项目的发展。未来，随着分布式电源的大量接入，特别是新的项目将更临近负荷中心，电网模式将从传统的单项输送，转变为双向流通，这不仅对配网提出了硬件升级的要求，也将对电网的运行方式造成巨大的影响，配网级的系统调度将扮演越来越重要的角色，优化调度区域内的分布式资源，如分布式光伏、分散式风电、储能设备等。

- **日益完善的产业链保障项目开发有序推进。**

虽然未来大规模投资将集中在可再生能源项目开发上，但行业仍需要持续关注设备技术的创新，保证先进制造业的领先地位。其中，应加强在相应卡脖子环节的技术开发，全产业链的协同发展，避免部分环节制约全行业的发展。



(五) 储能—高比例可再生能源系统的护航者

到2050年，中国电化学储能容量将达510GW，市场空间将达到1.6万亿元，并贡献2020到2050年间电力系统零碳化碳减排量的1/3。

储能技术包括物理储能和化学储能。高功率密度和高能量密度的技术特性决定了电化学储能应用场景最为广泛。与其他储能方式相比，电化学储能具有设备机动性好、响应速度快、能量密度高和循环效率高等优势，是当前国内外储能研究热点。在可再生能源发展供需下，电化学储能正快速布局，再加上抽水蓄能资源、站址等限制以及电化学储能成本竞争力的加速显现，未来，电化学储能市场将迎大幅上涨。截至2019年底，中国电化学储能累计装机规模1.7GW，同比增长59.4%，且有望持续以每年50%以上的速度增加。³⁵根据落基山研究所测算，到2050年，中国的电化学储能装机可达到510GW，远超届时140GW的抽水蓄能规模，将跃居成为最主要的电储能方式。

随着各国政府对储能产业的支持政策陆续出台，储能市场投资规模将持续加大，产业链布局日趋完善，商业模式多元发展，应用场景加速延伸。在国内，一系列政策出台加速为储能产业发展蓄势助力，行业市场规模也即将到达爆发的临界点。若以2030年前储能成本为1500元/kWh，2030年后储能成本下降至1000元/kWh计算，到2050年，中国电化学储能的市场空间将达到1.6万亿元，在2020到2050年间的总市场空间将高达15万亿元。按电化学储能代替电力系统中提供灵活性功能的煤电机组带来的减排计，这部分储能将贡献

2020年到2050年间中国要实现零碳电力系统累计二氧化碳减排量的1/3，高达106亿吨以上。

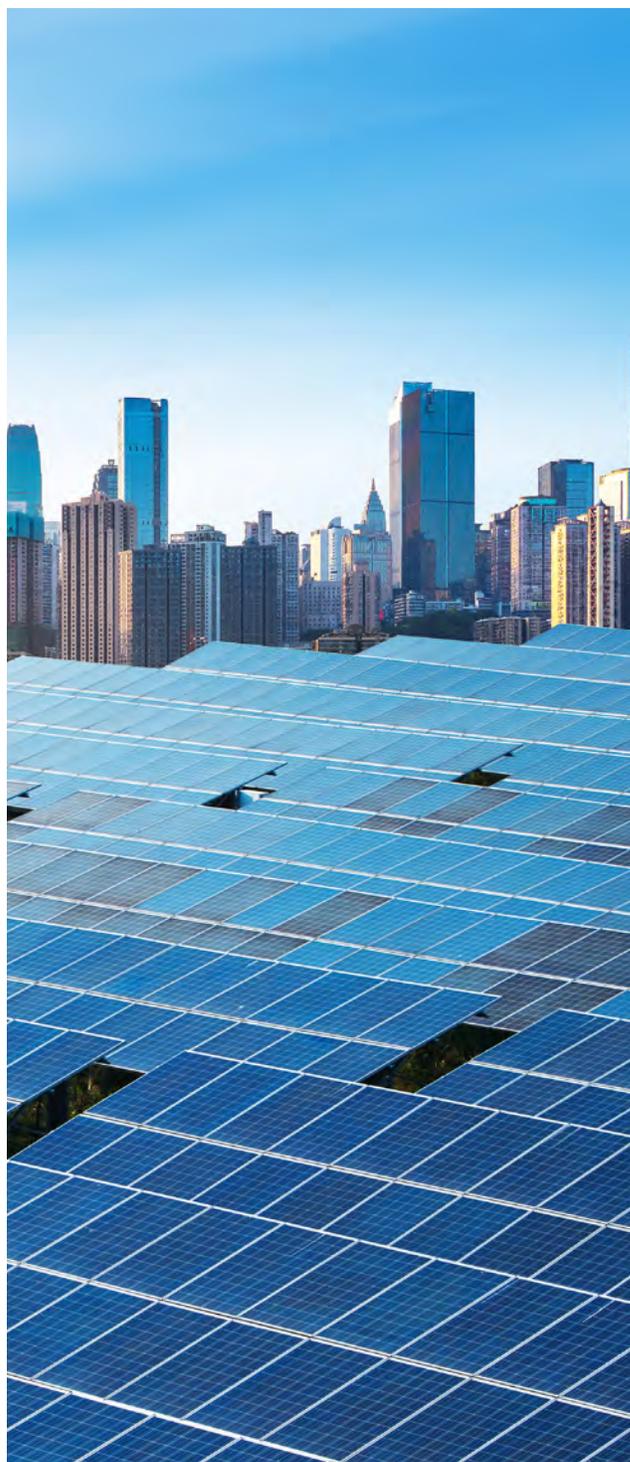
我们认为，在零碳能源转型趋势下的储能市场发展将呈现两大趋势，相应地，最具有发展和规模化潜力的储能技术也将具备一定的特质。通过对零碳转型趋势把握和对各类储能技术的特性分析，可筛选出应用前景较广、有望近中期快速发展且投资回报相对可观的储能技术和应用，作为零碳能源转型中储能领域投资的重点关注方向。

趋势一：能源互联网趋势下分布式储能逐步规模化应用。

在能源互联网中，分布式能源系统将广泛存在，尤其集中在工商业用户应用场景中。同时，在新基建大规模发展和5G趋势下，备用电源也是具有巨大市场潜力的应用场景。在这一趋势下，可特别关注运行安全性好、选址自由度高、成本具有竞争力的技术。此外，电动汽车产业发展带来的规模效应也将大大带动储能的综合应用和需求侧管理潜力的释放，能量密度高、安全性好、成本较低、寿命较长的电储能将成为技术发展方向和投资的关注点。在这些用户端、分布式的使用中，市场的扩张的核心逻辑往往是成本竞争力的发挥。

趋势二：零碳电力系统中高比例可再生能源并网催生对大规模容量储能的需求。

在落基山研究所和能源转型委员会分析的零碳情景中，到2050年，中国电力系统中近65%的电力将来自风能和太阳能。由于这些可再生能源发电具有不确定性和波动性，高比例的可再生能源将催生大规模的储能市场，以满足系统中电力供需平衡的要求。在此场景中，储能系统的作用是提



高可再生能源的跟踪计划出力能力，提升可再生能源的并网能力，促进其就近消纳。在此要求下，存储容量大、持续放电时间长、系统效率高、循环性能好的技术将脱颖而出。

总体而言，中国仍处于储能的产业化初级阶段，未来较有可能出现多种储能技术并存的形势。而不同技术由于其不同特点，在不同的应用领域体现其优势，未来主流的储能技术将基于市场选择。目前来看，尚未有某一种技术能够完全满足循环寿命、可规模化、安全性、经济性和高能量密度五项储能关键技术指标。综合来看，目前业界最看好的三种储能技术分别是锂离子电池、铅炭电池和液流电池。

锂离子电池：基于电动车市场的规模效应带来的成本优势显著，目前占据主流地位，进一步降本增效的突破口在于电极材料的升级和电解质的优化。

从产业的发展路径看，在短期内，电动车动力电池仍然是锂离子电池最主要的市场，锂离子电池也将依赖这一市场迅速积累规模效应。在锂离子电池成本持续降低、产业高速发展的情况下，预计锂离子电池仍将代表未来电化学储能市场的主流。如果在规模化使用时的安全性、循环寿命等性能上进一步突破，还有可能在大规模储能市场成为液流电池的有力竞争对手。目前，国内张北风光储输、南网宝清电站等大型储能示范项目，都将锂离子电池作为重点技术路线发展。

锂离子电池的充放电性能好、响应速度快、能量密度高，在众多应用领域都有技术优势和成本优势。截至2019年年底，在中国已投运的各类电化学储能中，锂

离子电池的累计装机规模达1378.3MW，占到80%以上。目前，锂离子电池已在储能领域占据一定市场规模，处于平稳复苏期。要持续发展进入产业成熟期，锂离子电池需要进一步取得技术突破，持续降低成本以巩固已有市场，并优化性能以进入新的市场。

锂离子电池技术的主要突破方向就在于电极材料的升级和电解质材料的优化两方面。在电极材料的升级方面，目前磷酸铁锂和锰酸锂电池的能量密度已接近理论极限，而钴酸锂和三元材料还有发展空间。通过开发高镍、低钴或者无钴的三元材料等措施，还可实现进一步降本增效。若使用富锂锰基正极材料，理论容量极限更是高达480mAh/g，目前中国实验室研究已可做到400mAh/g，工业上也已实现300mAh/g，都还可进一步提升。此外，正极材料的比容量是关键，因为负极材料的比容量可高达1000mAh/g，远超现有正极材料，而由于正极材料本身结构限制，实际比容量一般不超过150mAh/g。但是，电池能量密度的提升必须建立在保证安全的基础上。因此，材料体系和工艺技术的安全性非常重要，发展防短路、防过充、防热失控和不燃烧的电池安全技术是解决安全性问题的有效途径。

在电解质材料的优化方面，使用固态电解质的固态电池在安全性与能量密度方面具备更大潜力，近年来受到了学术界与产业界的广泛关注。从原理上看，固态电解质的适配性较好，有利于提升能量密度，而固态电解质的绝缘性又能避免短路，同时充当隔膜功能。Solid Power固态电池制造商研发的新型固态电池，不仅用锂金属材料代替石墨阳极，且用一块固体件（通常是陶瓷、玻璃或阻燃聚合物）来代替液体电

解质和隔膜，可将能量密度至少提高50%。此外，电解质材料的优化也将大大提升锂离子电池的安全性。从技术角度分析，“枝晶锂”是锂离子电池采用液态电解质所特有的，锂离子还原结晶不断生长，到一定程度可能会刺破隔膜，目前技术上主要从两个角度寻求突破，一是包被涂层，二是研究固体电解质。

铅炭电池：前期凭借铅蓄电池的先发优势占据了部分市场份额，目前市场集中在5G基站等特定场景，但锂离子电池迅速降本增效对铅炭电池形成较大影响。

铅蓄电池是技术最为成熟的电池之一，且由于发展得较早，具有市场占领的先发优势，且成本优势非常显著。目前，铅蓄电池销售收入在整个电池行业中占比较大，尽管部分市场份额逐渐被锂离子电池替代，但短期内铅蓄电池的市场地位仍然难以动摇，若能持续有技术突破，也将是具有前景的投资热点。但是，长期来看是否会被淘汰，还取决于其性价比是否能满足市场的要求，以及和锂离子电池等持续的降本增效相比，是否还有竞争优势。

铅炭电池是从传统铅蓄电池演进而来的技术，由于在铅酸电池负极加入活性炭，性能得到显著提升。随着技术的不断突破，铅炭电池相比传统铅酸电池，已提高8倍充电速度，3倍放电功率，6倍循环寿命，循环充电次数达2000次。铅炭电池在技术成熟度曲线上处于稳步复苏期，基于铅蓄电池已有优势，已经锁定一定市场份额，也成为一些分布式发电和微网项目的首选技术之一。但是，铅炭电池要进一步进入产业成熟期，与锂离子电池类似，一方面通过降本增效巩固已有市场，另一方面寻求性能突破以占领新的应用场景的市场。目前，中国的铅炭电池关键技术和工程应用方



面和发达国家相比仍有一定差距，高性能碳材料仍需依赖进口，且系统集成能力不足。此外，尽管铅炭电池成本低于锂离子电池，但由于后者具备高能量密度和高倍率充放电能力优势，在秒/分钟级调频服务或对占地面积较敏感的应用场景中，铅炭电池依然逊色，而且长期来看，锂离子电池迅速的降本增效趋势也可能对铅炭电池形成较大威胁。因此，相关的技术突破值得期待的同时，投资者还要重点关注各种电池的竞争格局。

液流电池：在大容量型储能市场前景广阔，但需在市场爆发前迅速优化技术和降低成本，突破口在于上游材料成本降低和系统能量密度提升。

与锂离子电池和铅炭电池不同，液流电池主要瞄准的是大容量型储能市场，因为它最适应于大规模可再生能源并网的大容量储能需求。液流电池大量电解质溶液可以存储在外部，所以其规模相对于普通电池可以大幅提高。只要不受污染，寿命会很长，能进行大功率充放电，而且由于正负极电解液单独储存，安全性非常高，这在大规模储能中是其他电池无法比拟的。

目前，液流电池储能处于技术萌芽期，虽然已经有试点示范，但一直未得到大规模商业化，原因一方面在于容量型的储能市场并没有真正的出现，另一方面是在于技术成本仍然较高。但在零碳能源转型趋势下，若到2050年，中国65%的电力将由风能和太阳能提供，大规模储能市场将一触即发。所以液流电池要进一步发展，主要突破口在于迅速优化技术和降低成本，在市场全面打开前做好准备。

全钒液流电池是目前市场最看好的液流电池，其技术突破口在于材料成本的降低和能量密度的提升。首先，隔膜是液流电池的关键组分，其性能显著制约电池的性能和生产成本。具有高离子选择性的隔膜可以大大提高电池效率。目前，国内的隔膜主要依赖进口，所以成本较高。大连物化所新一代电堆所采用的可焊接多孔离子传导膜实现了对电堆工艺的改进，大大提升离子选择性，不仅保持了高功率密度，且总成本还下降了40%。此外，通过新型电解液的研究和材料替代，也可有大量的成本下降潜力。目前的商用液流电池薄膜两侧的正负极液体都使用了钒离子，但其成本较高，还需要注意避免潜在的污染问题。目前全世界最大的液流电池应用于中国某风力发电厂，耗资可能高达1000美元/kWh。近年来有机液流电池也是一热点方向。国外研究表明，廉价的醌类物质用于液流电池，充放电性能依然强劲，而成本可降到100美元/kWh以下。由于体积较大，传统液流电池的能量密度偏低。国内机构研发的有机液流电池还将能量密度提升至传统液流电池50Wh/L的4倍以上，还摆脱了电解液中金属元素储量低的限制，工艺也相对简单，可实现规模化生产。

在碳中和目标下，未来储能的发展方向将更贴近具体应用场景，并从经济性、安全性和电池的可回收性三个核心要素综合考虑。

总体来说，中国储能技术整体上仍处于产业化初期阶段，但由于各类应用场景的多样性和适用技术的差异性，最符合未来趋势的技术已脱颖而出，或已处于稳步复苏期，正快速进入产业成熟期（如锂离子电池、铅炭电池），或虽处于技术萌芽期但市场前景广阔

(如液流电池)。因此,从投资者的角度看,从“面”上看,应关注推动整个储能产业发展的关键因素就位的时机,从“点”上看,应结合前景最好的若干重点技术所在的阶段特征,挖掘收益点。

从整个储能产业看,目前中国储能的价格机制不明确,应用收益衡量困难,因此项目投资如何收回和盈利能力难以预估,需要相关政策的规范和支持。当前最值得期待的是电力市场改革进程带来的储能红利,一方面,需要明确和落实储能的收益机制,例如:储能参与辅助服务市场的地位认可、定价交易政策和模式的确立、付费补偿机制的完善、放开售电测以打开分布式发电和微网领域储能应用市场等;另一方面,需要采取一定政策优惠来扶持早期市场,例如:扩大储能项目采购支持力度、鼓励推出储能项目金融税收优惠、税收减免或贷款优惠等。

从重点技术的前景看,投资者可关注该技术在所处阶段中成本竞争力提升和重点市场占领的表现。由于各类应用场景的多样性和适用技术差异性,中国储能产业将呈现主流技术引领、多种技术共存的状态。锂离子电池和铅炭电池的技术水平相对成熟,一定程度上已经市场检验,进入稳步复苏期,并快速向产业成熟期进发。相应地,有潜力的投资标的具备的特征有:

- **成本优势持续维持,并能做到更优。**

从2010年到2019年,锂离子电池组平均市场价格已从1100美元/kWh降到了156美元/kWh,降幅达87%,且还有进一步下降空间。到2024年,其价格很有可能下降到100美元/kWh,到2030年下降到60美元/kWh³⁶。

在此趋势下,锂离子电池储能成本也将快速进入全面商业化区间。类似地,铅炭电池的成本性已经非常可观,仅为锂离子电池的1/3,在对能量密度无太高要求的场景下,铅炭电池的市场优势仍将维持,但锂离子电池迅速的降本增效也可能扭转竞争格局。

- **电池性能得到突破,从而渗透新市场。**

尽管锂离子电池作为电动车动力电池的前景被普遍看好,它在大容量储能应用领域不具备竞争优势,因为储能用锂离子电池对能量密度的要求较宽松,但对安全性、循环寿命和成本要求较高。要看锂离子电池是否能占领更大的市场,就要看已形成的规模效应对成本下降的贡献是否能在和目前成本较高但性能更好的大规模储能技术竞争,以及未来锂离子电池技术突破带来的性能改进。铅炭电池是由传统铅酸电池演化而来,在负极加入活性炭使其除了有铅蓄电池高比能量之外,还实现了短时间大容量充电,大大拓宽了可适用场景。因此,由于性能改善带来的新市场机会也值得投资者关注。

除此之外,以液流电池为代表较早期技术也在快速崛起,虽然仍处于萌芽期,但巨大潜在市场空间使其受广泛关注。对于萌芽期的液流电池,投资建议包括:

- **关注技术进展,抢占需求爆发前的准备时间。**

液流电池相对锂离子电池和铅炭电池的技术成熟度较低,但同时,液流电池的目标市场也比该二者开启得晚。目前,全钒液流电池已有产业化应用,但由于大规模储能市场目前还较小,规模效应还没有形成。

如何在大规模储能市场需求爆发前，迅速降低成本，树立绝对的竞争优势，是液流电池顺利度过技术萌芽期并在泡沫破裂期存活的关键。其中核心技术亟需突破，包括高稳定性电解液、高选择性离子交换膜、关键材料批量化低成本制备等。如果技术突破较市场爆发有迟滞，液流电池的优势将很难发挥。相反，如果技术到位，市场前景非常广阔。

- **跟进政策信号，尤其是对大规模储能市场的扶持。**

液流电池如何快速形成规模效应是关键，由于处在技术萌芽期，政策支持尤其重要。政策层面的有利信号包括两部分。首先是对技术研发的大力支持和十兆瓦级到百兆瓦级系统的示范推进。其次是对可行的商业模式的投入，因为大规模系统所带来的资金成本和风险，是商业化过程中一大障碍，政策设计要使可再生能源并网储能项目的投资方回收投资、获得收益。如果缺乏市场机制和政策基础，很难建立可以由市场调节、可实现高比例可再生能源接入的商业化储能应用系统。

- **关注细分市场，准确分析市场竞争格局。**

液流电池是业界公认最适合大规模储能的电池技术，从原理上具有天然优势，其他技术仍无法很好解决长周期、大规模储能的问题。因此跨天甚至是季节性的长周期的储能场景最容易发挥液流电池的优势，也是液流电池最应该抢占的市场。从竞争格局看，虽然锂离子电池由于规模优势存在成本较低，在某些场景被认为是液流电池的有力竞争，但由于规模、循环寿命等方面的限制，特定细分市场很难进入。投资液流电池最重要的是找到这部分市场，扬长避短，扩大优势。



(六) 氢能—未来实现碳中和的突破性解决方案

氢能是实现全球能源结构向清洁化、低碳化转型中的重要一环。作为一种可以完全由可再生电力制成、能量密度高、燃烧只产生水的能源，结合可再生能源的绿色氢能将在中国和全球清洁低碳能源转型中发挥重要作用。

能源国际能源署、麦肯锡、能源转型委员会、国际氢能委员会等机构的研究均认为氢能利用有助于解决当前能源行业面临的诸多挑战：钢铁生产彻底摆脱化石

能源的唯一可能替代路线；实现合成氨、甲醇等传统化工生产的绿色替代；氢能的高能量密度和密度小等特点，为货运、船运、航空等长途运输等行业提供了脱碳的新途径。同时，氢能也可以提供较低成本的能源储存方式，调节可再生能源发电量的波动，并促进能源结构多元化和能源供应安全。

在零碳发展情景下，根据落基山研究所测算，我国的氢气需求将从目前的每年2500万吨，增长到2050年每年8100万吨，若全部使用绿色氢气，30年内氢能将累计为零碳能源转型贡献200亿吨以上的二氧化碳的碳减排量（图15）。

图 15
零碳情景下的2050年氢能消费量（万吨）

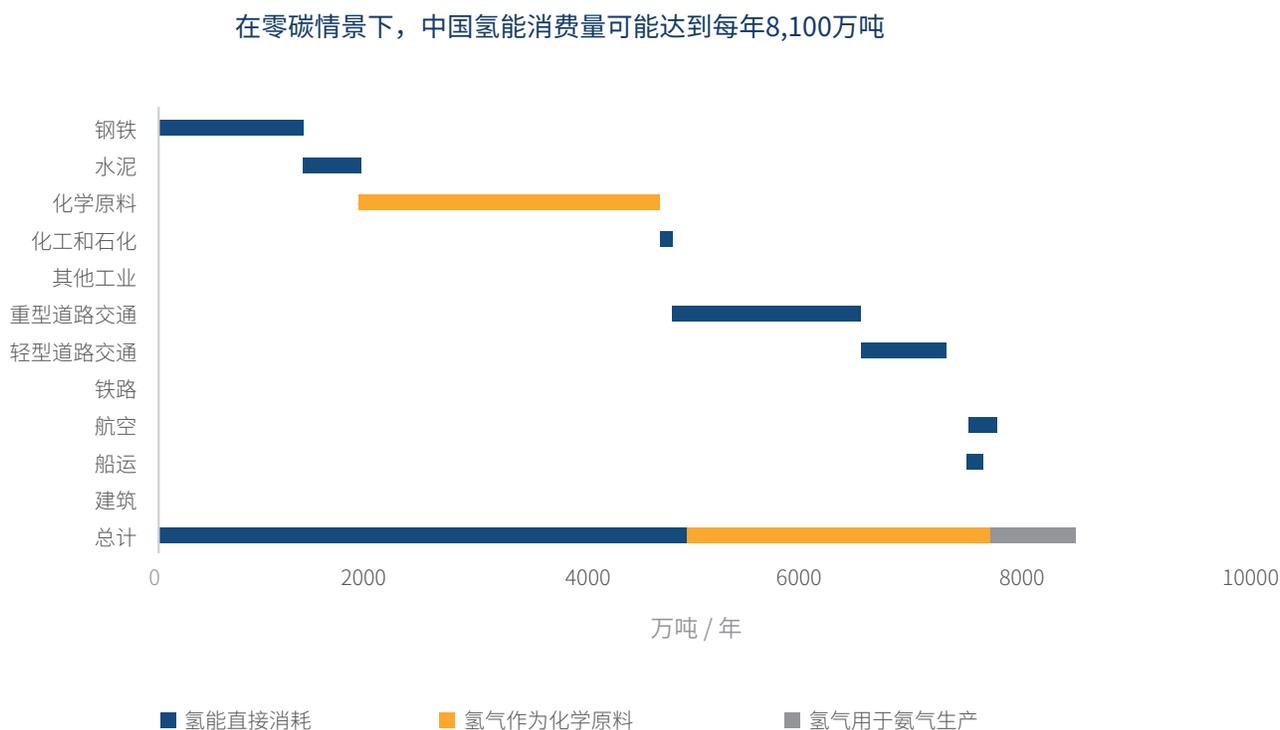
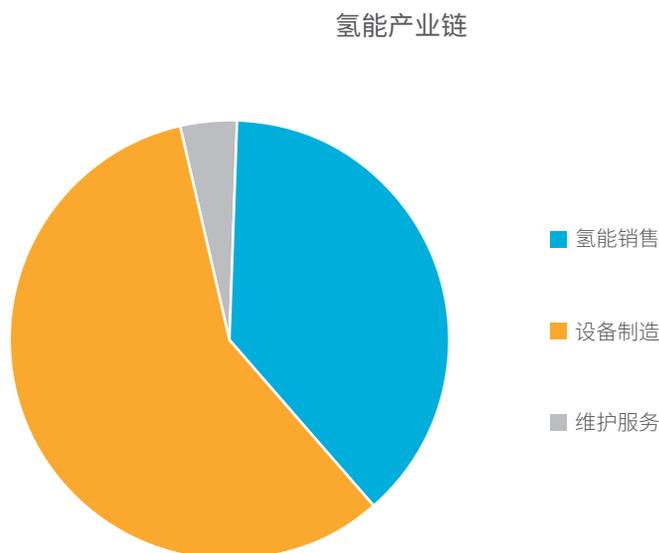


图 16
氢能产业链的2050年潜在市场规模及分布



氢能的未来市场潜力巨大，2050年仅氢气销售即可带来每年6300亿元的产值。同时，氢气上下游产业链中制氢端的电解槽、储运端的储氢瓶、输氢管道、加氢站、用氢端的燃料电池汽车、船舶、飞机及钢铁化工等工业新合成炉、燃烧炉等设备，也都将带来巨大的经济贡献。根据落基山研究所的测算，仅2050年一年，新生产各种设备的产值就将达到9000亿元，使得2050年当年新增加的氢能产业产值总量达到1.6万亿元（图16）。

1. 发展现状与未来趋势

氢能的发展需要两个环节的系统共建——氢源和市场需求。零碳中国的路径下，氢源必将是绿色的、清洁的，将主要聚焦于与可再生能源结合的电解水制氢技术路线。氢能的市场需求包括交通、工业等多个能源部门。氢能的市场需求会带动氢源规模的增长，氢源

成本的下降又将推动氢气路线应用的市场扩张，两者相辅相成、环环相扣。同时氢能的市场需求又必将带动氢气储存、运输等中间环节的发展。

从产业发展阶段来看，氢能的发展整体处于早期增长时期，并且呈现出阶梯式发展的趋势。首先在制氢端，将从灰氢绿氢结合逐步向完全绿色氢气的方向过渡，绿色氢气的多个技术路线百花齐放，碱性电解槽技术相对成熟，质子交换膜电解槽（PEM）、固体氧化物电解槽（SOEC）等新兴路线为可再生能源制氢提供了更强的适配性，且甲烷裂解等其他绿氢制取方法也在发展当中。电解槽的设备大小也将不断扩大。其次在市场需求端，可能呈现先交通再工业的发展顺序，氢燃料电池正进入期望膨胀期，走向市场的“风口”：越来越多的企业、投资涌入氢能市场，氢能产业企业“遍地开花”，氢能小镇等产业形态不断涌

出，全国也已有40多个省市相继出台氢能产业规划。而氢气的工业应用技术虽然仍处于技术萌芽期，但将是未来巨大市场潜力所在。全球范围内多个国家开始出现绿氢直接还原铁、绿色合成氨等示范项目，将带来全新的行业技术路线方向，为绿氢创造巨大的需求规模。最后，对于氢气储运来说，技术上将从气态储氢到液态储氢再到管道储氢等多种路线并存的方向发展，市场形态上，将从储氢罐点对点运输出发，未来逐步形成全国“储氢罐+管道”的运输网络以及全球市场。氢能产业链的发展将呈现“产-储-运-用”生态系统的共建，各环节协同发展，共同促进氢能的技术进步、成本下降、市场扩大。

但是，处于早期增长时期的氢能上下游产业，特别是处于期望膨胀期的产业和技术来说，一定要避免低质量发展、低水平扩张的趋势，警惕泡沫破裂期的到来，降低投资失败风险。要着重于关键技术的突破、企业核心竞争力的建立和产业链的系统性扶持培育。

1) 制氢技术：绿色氢能需要持续的技术突破、规模扩大和清洁电力供应，从而在与化石能源制氢的竞争中占据上风

只有真正实现氢气来源的绿色化，才能达到氢能的清洁能源目的。结合可再生能源的电解水制氢方式，作为最主要的“绿氢”制取方式，在目前中国每年生产的2500万吨氢气中，仅占到4%。另外有40%来自煤气化、12%来自甲烷蒸汽重整等化石能源制氢方式。在零碳目标下，结合可再生能源的电解水制氢必将成为氢气供给的主流，目前电解水的应用规模也不断扩大，逐渐向兆瓦级电解槽项目迈进。

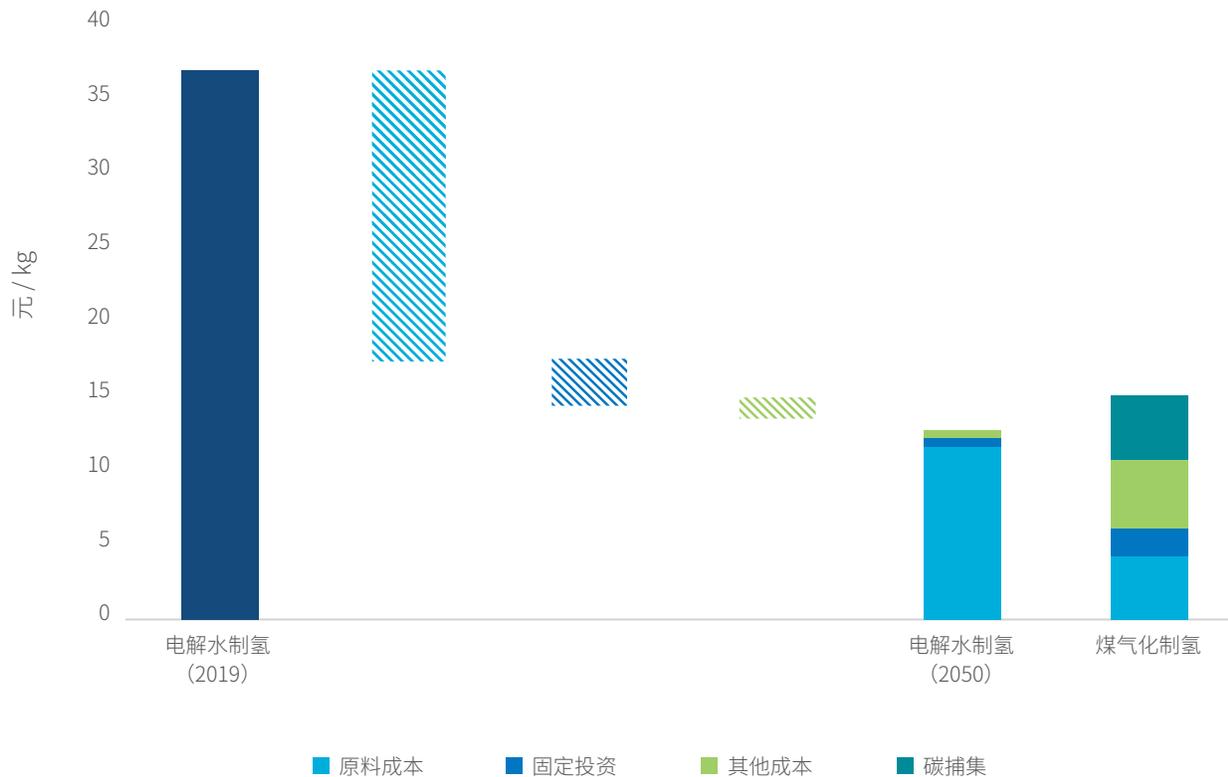
目前电解水制氢主要有碱性电解槽、质子交换膜电解槽（PEM）、固体氧化物电解槽（SOEC）等技术路线。碱性电解槽技术最早实现了商业化大规模应用，但是存在能源效率较低、难以快速地关闭或者启动、占地面积较大等缺点。质子交换膜电解槽虽然技术尚未完全成熟，但由于更优的灵活性和适用性，更适用于可再生能源电力结合，被许多专家认为会成为未来分布式能源电力结构下的主流。

电解水绿色制氢应用的主要痛点是成本性问题。在现有技术水平、产业规模和电网供电的情况下，电解水制氢的成本仍是煤制氢的2-3倍（图17）。但是电解水制氢的成本下降潜力巨大，根据BNEF等机构预测，³⁷未来电解水制氢成本将在2030年前下降50%左右，并在2050年前与化石能源制氢实现平价，成本下降的主要方面有：电力成本下降、电解槽能源效率的提高、设备成本下降等，将依赖于技术突破、产能规模扩大和电价下降的协同发展过程。

趋势1：电解槽技术路线优化，提高电解槽能源效率，降低催化剂材料成本

虽然我国电解槽成本远低于欧美水平，但电解槽技术并未完全成熟。一方面，电解槽的能源效率还能得到进一步降低。电力消耗强度目前在55kWh/kg H₂左右，美国能源部的目标值为44kWh/kg H₂，极限理论值为电力消耗量最低可达40kWh/kg H₂。电解槽能源效率的主要影响因素有电解液种类、电极的形态和组合方式（间距、数量、表面形态、连接配置组合方式等）等。对于电解液种类而言，质子交换膜电解槽的电解质为固体聚合物（即质子交换膜），其理论上可达到的能源效率可高于使用碱性电解液的碱性电解

图 17
电解水制氢和煤气化制氢成本比较



槽，但技术难点在于质子交换膜。而固体氧化物电解槽（SOEC）采用固体氧化物作为电解质材料，有望进一步提高电解水制氢效率，但是技术成熟度不高，仍处于实验室或小型示范阶段。而针对电极的形态和组合方式而言，需要通过大量试验对具体参数进行优化。如在特定电解液浓度下，多少个电极以什么样的形式排列可以达到最优的能源效率，或通过把PEM中的铂电极设计为松球结构，扩大了反应面积，加快氢气的生成速率。

另一方面，由于需要使用铂和铱等贵重重金属作为催化剂，质子交换膜电解槽的生产成本仍然较高，催化

剂的材料替代是电解槽技术突破的另一个重点。目前，研究的方向有基于铁镍、磷化铬等材料的新型催化剂。另外有碱性固体阴离子交换膜（AEM）技术方向。该技术结合固体电解质与碱性体系这两个特点，在碱性条件下，由于可以使用低成本铁、镍等非贵金属催化剂，从而使得电解槽成本大幅下降，但仍然需要交换膜等关键材料上的技术突破，相关研究团队包括美国国家可再生能源实验室、Proton Onsite公司、中国科学院大连化学物理研究所、武汉大学等全球许多大学实验室。

趋势2：规模效应和自动化水平提高帮助电解槽整体生产成本下降。

目前中国的碱性电解槽生产成本在每千瓦200美元左右，已经是国外水平的六分之一左右。这得益于我国低廉的劳动成本和一定程度上的规模经济效应。而在未来，随着市场规模的进一步扩张、生产自动化水平的不断提高，碱性电解槽以及质子交换膜电解槽的生产成本将进一步得到大幅下降。根据彭博新能源财经（BNEF）预测，2050年碱性电解槽生产成本可低至每千瓦80美元，质子交换膜电解槽生产成本可下降到每千瓦100美元左右。³⁸

趋势3：降低制氢的电力成本，使用弃风弃光将为绿色制氢提供过渡性路线。

电力成本在制氢成本中占到70%以上，降低用电成本是提高电解水制氢的成本竞争力的关键所在。随着风电、光伏度电成本的进一步下降，电解水制氢的“绿氢”的生产成本将在未来几十年内实现大幅下降。而在短期内，可以在我国三北地区及四川云南地区，率先推广电解水制氢路线，使用当地弃风、弃光、弃水等廉价的电力资源，提供清洁的氢气来源。另外，工业副产氢也可作为另一种清洁氢能的过渡性选择。钢铁、氯碱等工业生产中的氢气可以通过简单的提纯处理被分离出来，不会带来额外的碳排放，且处理成本低廉。

2) 交通应用: 交通氢燃料电池应用正进入市场快速扩张时期，需要克服系统耐久性问题，提高国产化水平，并注重下游氢能储运系统建立

交通领域将无疑是氢能应用的短期突破口，从技术发展、政策支持和市场规模角度来看，燃料电池都是氢能应用的排头兵。由于环保性能高、能量密度高、环

境适应性好，能够适应较长的行驶里程，氢燃料电池可应用于小型汽车、重型卡车、船舶、飞机等多种交通方式。虽然目前仍存在燃料电池系统技术不完善和市场过小的痛点，但未来十年将是重要战略机遇期。

氢能燃料电池汽车正进入期望膨胀期，市场扩张迅速。丰田、本田、现代等公司燃料电池汽车已实现量产。在我国，多个省市先后推出燃料电池产业支持政策，大力度布局这一新兴产业，仅2018年氢燃料电池产业相关投资及规划资金超过850亿元。我国氢燃料电池汽车销量也从2015年的10辆快速增长到2019年的2737辆，氢燃料电池汽车产业链上也涌现亿华通等一批企业。政策红利叠加资本涌入，正逐渐把燃料电池汽车推向风口，不断助推技术突破和产业发展。

船舶和航空方面，燃料电池也在崭露头角，可能为氢能交通应用的下一个重点市场。巴拉德公司在2020年9月推出首个船舶燃料电池动力模块，功率达200kW，可以通过串联达到兆瓦功率级别。ZeroAvia、HES等公司在开发燃料电池小型客机，前者也成功地进行了首次试飞。

并且需要注意的是，氢能市场需求与基础设施之间存在着“鸡生蛋、蛋生鸡”的死循环问题，氢能交通应用的发展应该不仅是燃料电池设备的发展，而是和加氢站、储运氢技术相辅相成发展的过程：燃料电池汽车等为氢气储运带来初始需求，加氢站的布局则是降低燃料电池用车总成本中的重要一环。作为氢能应用突破口，从燃料电池交通出发，要推动整个氢能生态系统的构建，要从材料、储运、加氢到最后的运行和客户服务一个完整生命周期内的技术和市场的发展，并不断提供反馈和优化，切忌任一环节成为短板。



趋势1：燃料电池汽车需要突破系统耐久性和系统成本限制，提高市场竞争力。

目前，制约燃料电池汽车商业化的最大技术挑战是燃料电池系统的耐久性。以重卡燃料电池为例，国内的相关企业氢燃料电池的稳定寿命仅达到10000小时左右，而国外已可以达到20000-30000小时。耐久性降低的主要原因是，燃料电池材料在车辆的启停、变速等频繁变工况运行过程中会加速损耗。提高燃料电池系统的耐久性，一方面需要车辆控制系统和策略的优化，延缓衰减。另一方面，更依赖于催化剂、膜电极、双极板等关键材料的改进，找到能够抵抗车用苛刻工况的、稳定的、成本性好的新材料。

特别地，对于双极板而言，需要满足导电、耐腐蚀、轻量化等要求以提高燃料电池系统耐久性。目前双极板分为石墨、金属及石墨金属复合三类。石墨板应用较早，但目前无法达到轻量化要求，且有潜在安全性问题。薄金属双极板能够满足轻量化要求，是目前研究的热点，但仍有导电、耐腐蚀、成本等挑战。结合两者优点的石墨金属复合双极板也在研发当中。

另外，燃料电池汽车系统成本仍然较高，但随着市场供需扩大，规模效应会大大加快成本降低的步伐。根据落基山研究所研究，按照学习曲线预测，电堆的单位成本可以从目前的每千瓦6500元，到2025年下降50%，到2050年达到每千瓦仅400-600元。

趋势2：燃料电池产业链的国产化水平在不断提高，需要填补技术空白并改进设备质量。

从燃料电池产业链角度整体来看，我国在关键材料和核心部件制造的实力仍然相对薄弱。首先，产业上游

的燃料电池电堆组件未实现完全国产化。膜电极和双极板的生产，未完全实现规模化；炭纸、胶垫剂等大多采用进口材料，被国外垄断，价格极高；质子交换膜、催化剂等材料近年来可实现量产，但是性能上仍然与国外存在差距。其次，中游的燃料电池系统集成和辅助系统方面，我国已经出现了亿华通、重塑科技等燃料电池发动机生产商，且空气压缩机、氢气循环泵也逐步实现了国产厂家的突破，但是在增湿器等关键设备上，我国仍然没有成熟产品，依赖美国、日本、德国等国供应。最后，对于下游整车系统制造商而言，不掌握核心技术，燃料电池汽车的整体性能会受到上游设备部件性能的限制。2020年，丰田、一汽、东风、广汽、北汽联合亿华通公司成立燃料电池系统研发公司，车企进入上游市场，推动核心部件及关键材料的国产化的趋势逐渐形成。

趋势3：燃料电池交通与氢气储运产业协同发展，共同建立氢能生态系统。

燃料电池汽车作为氢能需求的早期突破口，需要与氢气储运和加氢站系统共同成长。氢气储运技术的发展，是氢能生态系统不可缺少的基础。降低氢气储运成本、加氢站成本都会帮助降低用车总成本，帮助推广燃料电池汽车的应用。

氢气储运系统目前以短距离、分散式为主，主要使用高压气态储氢。未来，氢气储运系统将走向中短距离使用气态或液态储氢，远距离使用氢气管道、化学储氢（液氨储氢、有机液体储氢等等）等多条技术路径，规模分散式和集中式共存的方式。

图 18
中国氢燃料电池产业链发展



目前中短途储氢（及车载储氢）技术质量密度仍有待提高。美国能源局（DOE）要求2020年美国国内车载储氢的氢气质量密度须达到4.5%，2025年达到5.5%，最终目标是6.5%。³⁹对于气态储氢，需要对储氢瓶的材料进行优化，目前III型瓶采用金属内胆和外部碳纤维缠绕储罐，储氢质量密度为3.8%-4.5%；IV型瓶则采用塑料内胆和外部碳纤维全缠绕储罐，储氢质量密度可达到4.0%-7.0%；V型瓶会采用无内胆轻质纤维缠绕储罐。氢气瓶的核心技术在于外层高效、低成本的碳纤维及缠绕成型，以及其他金属阀门、密闭性和传感器等。对于液态储氢，成本性仍然较高，需要依赖技术突破和规模扩大。另外，吸附储氢也是技术发展的另一方向，吸附储氢所利用到的吸附材料主要包括金属合金、碳纳米管、活性炭、金属框架物等，在实验室上可以达到10%甚至15%的氢气质量密度。

远距离的氢气管道运输、化学储氢方式目前应用规模仍然较小。但是，近年来，随着氢能与可再生能源项目的大量结合，欧洲等地多个管道运氢项目正在开发当中。并且，氢能国际贸易的发展也推动着液氢储氢等适合于船运的方式的发展。预计在未来会扩大应用规模。

中国的氢气储运技术仍落后于欧美和日本。日本、美国等国家对高端碳纤维技术形成垄断，已经实现了70MPa在乘用车上的应用。但中国虽然已经颁布70MPa储氢瓶的相应标准，但仍主要采用35MPa储氢瓶技术。我国液氢技术目前也主要应用在航天领域，以及少数的电子行业，成本仍然较高。管道运氢在我国仍然处于研究阶段，有赖于我国气体管网密度的提高及管道工艺的优化。

3) 工业应用：工业应用孕育着绿色氢能巨大全球市场，但需克服成本性问题和大规模资产重组的障碍。

绿色氢能利用是帮助钢铁、化工等重工业实现低碳甚至零碳化的必不可少的途径。在钢铁领域，氢气直接还原铁（DRI）技术可以实现从铁矿石到钢铁产品全过程的无化石能源化，在化工领域，合成氨的氢气供应可以由绿氢来替代；甲醇、甲烷等多种化工产品及合成燃料都可以通过氢气和二氧化碳结合的方式进行合成。这些技术虽然仍处于萌芽期，但技术成熟度（TRL）已经达到6-8的较为成熟水平，并且能够帮助重工业实现真正意义上的零碳。因而，工业领域应用将是绿色氢能巨大的潜在市场，其体量甚至可以超过交通领域。根据落基山研究所预测，在零碳情景下，到2050年，钢铁、化工、水泥等工业领域将带来4500万吨氢气需求，将占到全部氢气需求的55%。氢能的工业应用将是氢能经济发展的重要一环。

全球，特别是提出零碳目标的国家中，正在陆续出现绿氢炼钢、绿氢化工等示范项目。欧洲多个氢能炼钢项目正在如火如荼地推进当中，瑞典SSAB公司的第一家氢气直接还原铁炼钢厂，已经在2020年8月底建成并开始试运行。欧洲、美国和澳大利亚等地已有多个绿色合成氨、绿色甲醇项目，以可再生能源制氢为基础，从而完全摆脱煤、石油和天然气的利用，也为合成燃料等领域提供了全新的可能。我国宝钢、河钢等多家钢铁公司及许多化工公司也纷纷开始氢能应用路线的研发和示范项目投入。在全球零碳发展的趋势下，绿氢的工业应用，是大势所趋的未来方向，将在未来全面实现技术的商业化。

但是需要注意的是，氢能的工业应用仍需要应对成本竞争压力和已有资产搁浅等挑战。首先，钢铁、合成氨、甲醇等初级产品具有大宗商品属性，毛利率低，成本竞争压力较大。而除部分地区的合成氨达到了经济竞争性以外，绿氢生产路径的初级产品成本较传统生产过程高出60%以上，其大范围的推广仍然面临很大困难。生产成本的下降主要依赖于绿色氢气的价格降低，特别是用电成本的大幅下降和电解槽购置成本的降低。根据落基山研究所测算，其他条件一定下，到2030年，对于新建项目，当电价低于每千瓦时0.2元时，使用绿色氢气路线的粗钢成本将于传统化石能源路线持平。如果有碳价机制加持，则绿色氢气的成本竞争性将更强。

其次，重工业生产的产能体量较大且工艺流程长，如替换为以氢能为基础的全新技术路线，则需要将既有生产路径的部分产能完全替换（合成氨除外），或成立新项目增加新产能，会涉及较大的投资成本，并且可能会造成既有设备的提前淘汰和资产搁置。

因而在工业领域进行氢能的应用是涉及到企业未来战略发展方向、财务状况、风险管理等方面的重大决策。在投资时，需要对内部能力、外部风险、可能机遇与挑战进行全面的分析。特别是，针对钢铁等重工业产品的碳价、碳关税等环境成本正被全球多地区政府讨论，全球多家重要金融机构也停止对煤炭相关资产的投资。

并且，电解槽制氢方式可能会给工业生产带来新的业态。相比于传统的化石能源生产，电解槽的设备占地小、原料简单，可以提供便捷的氢气来源，从而可以支持小型的、分散的工业生产形态。专门适用于农场



使用的合成氨“分散式小型生产厂”（mini-mills）正在美国、澳大利亚等地得到讨论，可能会开启全新的工业生产方式和市场。

2. 产业发展和投资建议

从产业链发展来看，氢能产业链整体正处于快速扩张阶段，未来十年将是氢能投资的关键战略机遇期。

首先氢能产业链正迎来全球政策性利好，将直接或间接地促进我国氢能技术发展、市场扩大。欧盟于2020年推出《欧盟氢能战略》，欧盟计划未来十年内向氢能产业投入5750亿欧元（约人民币4.56万亿元）。其中，1450亿欧元以税收优惠、碳许可证优惠、财政补贴等形式惠及相关氢能企业，剩余的4300亿欧元将直接投入氢能基础设施建设。韩国于2019年推出“绿色新政”，决心建立“氢经济体”，将在2040年前生产620万辆燃料电池汽车，并建设1200个加氢站，其中300个加氢站将于2022年前建成，并建立“未来汽车加氢站现场支持小组”，计划从明年起，为扩建加氢站提供50%的补贴。在中国，多个省市已相继出台氢能产业规划。2019年氢能首次被写入全国政府工作报告。2020年以来，能源局、财政部、工信部等多个部委也都在相关文件中提出，推动储能、氢能技术进步与产业发展。制定实施氢能产业发展规划，组织开展关键技术装备攻关，积极推动应用示范。

此外，成本竞争力的提高，将快速推动氢能应用规模的扩大。近年来，电解槽、燃料电池汽车关键设备实现量产，得益于规模效应和技术进步，生产成本正在以极快的速度下降。根据落基山研究所研究，在未来五年内，燃料电池重卡制造成本还有望下降50%，氢

能重卡的全生命周期成本性将有望在2035年前超越柴油重卡；绿色氢气用于炼钢、合成氨生产、化工生产也将在2050年前逐步获得成本经济性，扩大应用规模。

但是，对于正在蓬勃上升的氢能产业链，一定要警惕未来可能的泡沫破裂和市场淘汰。在不断扩大的企业数量和产业规模下，低质量发展的苗头开始显现。在愈加激烈的竞争环境下，技术制约、进口依赖、成本空间等瓶颈也开始制约低水平的企业的发展。对于产业来说，未来必将经历国内市场甚至在国际市场上的优胜劣汰，这将为产业带来很大的风险和压力，需要政策制定者、投资方和企业等方采取合理有效的战略和行动，帮助产业建立核心竞争力，挖掘可行的商业模式，共同推动氢能产业稳步发展。

政策方面：

- **氢能产业政策应向核心技术支持、完整生命周期培育方向倾斜。**

对于氢能这样处于发展早期、尚未取得成本经济性的产业，政策支持是不可或缺的驱动力。但是为防止产业过热和泡沫破裂，政策制定者应鼓励技术创新，扶持具有核心技术能力的企业，引导产业向具有核心实力、有持续性的方向发展。同时，产业政策需要注意从单个产品到整个产业链、从建设补贴到运营补贴的方向转变，实现产业的完整培育。近日，国家财政部已经出台了氢能产业支持政策，以奖代补、以点示范的形式便是为氢能产业提供了良好的技术发展环境，促进有实力的头部企业发展。

政府产业基金等其他社会投资方在项目筛选时，也应关注项目团队的技术研发能力，是否具有核心技术，

能否实现技术突破等等。产业链上企业发展也需要重视技术。

- **对于氢能应用，政策需要对科研和示范项目提供针对性支持，帮助企业分散风险，引领长期战略。**

在全球能源转型和零碳发展的背景下，绿色氢能的应用是重要的战略布局方向，但是仍然面对着成本经济性问题。特别是氢能的工业应用尚处于产业发展的萌芽期，且应用项目的投入较大，企业大多停留于摸索和观望阶段。对于这类技术应用，政府的引领作用尤为重要，指导企业的战略路线转型，在全球竞争下占据有利位置。首先，政府需要对科研突破和示范项目提供有针对性的支持，以推动生产企业和技术部门持续地在氢气应用创新方面进行投入。另外，政府可以利用灵活多样的政策和金融手段，在不增加财政负担的情况下，为氢能应用项目分担风险，提高企业建设示范项目的积极性。

产业方面：

目前，氢能市场拓展的重点是已经处于期望膨胀期的电解水绿氢生产和交通应用，工业应用由于其发展阶段更靠前，则仍主要依靠政策扶持和大型企业研发。对于处于期望膨胀期的氢能交通应用来说，要尽量避免泡沫的产生，并且更加关注于核心技术的发展，以在可能的市场淘汰中站稳脚跟。

- **加氢站投资回报期较长，在政策加持下，适合有资产和基础设施基础的大公司提前布局。**

氢能产业的发展需要加氢站等氢能基础设施的支持，但是由于基础设施就位和氢能需求形成之间存在着“

鸡生蛋、蛋生鸡”的死循环问题，投资方需要具有一定资金能力并且能够接受较长的回报周期。一方面政府可对加氢站从建设端到运营端的扶持，建立试点项目分步进行推广。另一方面，如中石化、壳牌等具有用地资源优势 and 基础设施运营经验等的公司可以在已有资产基础上提前布局，通过共用基础设施，减小加氢站资金投入压力，在初期占领市场。未来，随着市场不断扩大，将可能产生多种加氢站模式。

- **氢能早期市场发展需要“线点结合”，夯实基础市场需求的同时，拓展已具有成本性的市场或由绿色环保理念驱动的市场等特殊市场切入点。**

扩大氢能市场，是氢能产业链发展面临的共同问题，也是破解氢能“鸡生蛋、蛋生鸡”死循环问题的另一关键。氢能产业虽然风头正劲，但是目前还面临着成本性上的不足。企业一方面需要将基础市场做稳，为产业发展提供反馈经验和规模效应；另一方面可以积极寻找市场中特别的切入点，并结合其他产品或服务，获得更多盈利点，不断扩大市场。

对于上游绿氢生产，首先可以发挥氢能储能特性，作为基础配套设施，与可再生能源项目结合。如欧洲荷兰、德国、英国等国的海上风电场制氢项目，可为电解槽带来几十兆瓦的市场需求。这也会促进大规模电解槽设备的升级优化。另外，对于化工等用氢的刚需部门，可以通过小规模电解槽等提供更为灵活的氢能供给。

对于下游氢能应用，公交客车等政策性采购项目为燃料电池产业提供了重要的基础需求市场，这些市场的产品需求相对标准化程度较高。通过标准化产品的



大量生产和销售，不仅可以为燃料电池企业提供稳定的现金流支持，可以对氢能整个产业链进行磨合和优化，提供反馈经验，推动产业的规模化发展。

另外，绿色氢能应用已经可以在某些领域、特定区域实现了成本经济性，投资者需要努力识别并开拓这些市场。如绿色合成氨的成本已经在天然气价格较高、电价较低的地区实现与传统生产路径成本的持平。燃料电池应用在电价较低、特殊商业模式辅助下也在不断缩小成本差距。

针对目前绿色氢能仍然价格较高的问题，需要寻找能够接受绿色环保带来的溢价的特殊市场。在企业端（ToB），有零碳发展要求的行业将是氢能的重要潜在多样化市场，如已提出2050年零碳排放承诺的BP等能源企业和航空企业，已成立零碳联盟的多家航运企业等等。巴拉德公司看准船舶行业，已于2020年推出首个船舶燃料电池动力模块。在用户端（ToC），可优先发展如观光船、私人游艇、小型飞机等由绿色环保等新型生活理念驱动的高端市场。这些市场的价格敏感性较低，并且较为热衷于绿色化、环保化、智能化等新理念或新服务。从这类特殊市场切入，可以帮助企业发挥技术能力，在早期尽可能获得更多盈利，稳定企业现金流，从而并助力技术的突破和成本的降低。随着氢能市场的扩张，市场将逐步从特定领域转向通用领域，再可能进入垂直领域进行专攻方向的深耕。

对于投资者而言，一方面要寻找有实力服务于这些市场的企业，另一方面也要帮助企业精准找到这些有潜力的特殊市场或客户，帮助企业度过市场低谷，获得投资回报。

(七) 数字化—推动能源系统优化的加速器

以信息和通信技术为基础带来的数字化转型正在对全球经济的各个领域带来变革。从传统快消品行业、汽车行业、金融科技行业，到新型的互联网通信行业，都在经历着数字化变革，实现业务的重塑。能源行业也不例外。数字化在能源行业的应用涵盖了需求侧数字化，供给侧数字化以及对整体系统的数字优化。

需求侧数字化应用主要包含三大行业，交通数字化、建筑数字化及工业数字化。作为传统的三大行业，其过去固有的重资产、市场化分散程度较高等特性为其数字化转型相较新型信息技术行业的数字化转型带来了更多困难。但与此同时，也带来了更多能效提升的机会。从能源供给侧来讲，数字化对油气、煤炭、电力行业等都带来了降本增效、智能化提升的机会。

另外，由于5G通信网络、数据中心等数字化技术大规模应用将带来的电力消费上升尽管也值得关注，但并不在本研究的讨论范围。

在上述能源需求和供给数字化应用场景中，能源需求侧的工业、交通、建筑数字化更多是以为客户提供更好服务、满足其体验和需求为目的，碳减排更多为这些领域数字化改造的附属效益之一；在能源供给侧，化石能源行业在零碳情景下将逐步被电力等清洁能源替代。落基山研究所和能源转型委员会研究显示2050年实现中国零碳能源转型电气化比例将大大提升，且电力系统中75%以上的电力将来自于可再生能源。⁴⁰在不断实现更高比例电气化的同时实现可以承载更高比例可再生能源的电力系统是中国能源转型的关键。因

此，能够助力这一清洁电力系统发展的数字化技术和相关产业是本报告主要关注。

电力市场改革和零碳转型背景下为数字化在电力系统的广泛应用提供了巨大市场机遇

电力行业的数字化不仅仅是用数据和信息工具为行业赋能，更是以数据为基础，以市场化为前提，最大化释放电力改革的潜力。相较消费零售、金融、互联网行业，电力行业由于其系统和技术的复杂性、行业的垄断性，并未被市场广泛关注。电力部门由于其本身需要大量实时的发电用电数据，匹配调度资源，其本身数字化基础相较传统能源和制造行业，包括石油、化工等更好，数字化水平也更高。电力市场改革的持续推进，零碳转型的宏观趋势也将为数字化在电力系统的应用带来更多的应用场景和市场化投资机会。

- **数字化技术能够提升电网灵活性，承载更高比例可再生能源。**零碳转型背景下，未来的电力系统需要更加清洁。数字化技术的加持能够提升电网系统灵活性，使高比例可再生电力系统成为可能。根据能源转型委员会和落基山研究所研究，中国甚至可以通过消费侧的深度电气化以及电力行业的深度脱碳在2050年提前实现零碳目标。过去十年持续的可再生能源补贴推动了快速增长的发电装机，2019年非水可再生能源发电比例已经达到9.2%。弃风弃光率逐年下降，其中，弃风率从2016年的17%降到2019年的5%以下。⁴¹2019年，行业期待已久的可再生能源电力消纳保障机制正式出台，国家将可再生能源消纳任务分解到各省售电公司和电力大用户等。从近两年市场情况来

看，包括“五大四小”的电力央企等都纷纷加大新能源领域投入；能源类企业也纷纷做出零碳承诺，GE已经宣布停止向新建煤电厂提供火电设备。未来电网系统下更高比例的可再生能源必将对电网的安全性与可靠性带来挑战，数字化技术的到来能够很好地通过更高精度的信息化手段，提升系统灵活性，为可再生电源并网保驾护航。

- **数字化技术使电力生产从集中式向分散式转变成可能。**考虑到集中式带来的规模效应，过去能源生产模式以集中式电站为主，但未来考虑到东南沿海作为负荷中心，土地资源愈发紧张，分布式能源发电形式以其方便灵活，靠近负荷中心等特色将成为未来的新增装机主流。从中小型工商业用户，到居民用户，都可以通过安装分布式光伏电站来供给自己部分用电的同时，将非用电时间段的光伏发电量卖给其他需要的买家，带来额外的收益，新的产销者模式将应运而生。未来，通过数字化技术的支持，屋顶光伏、分散式风电、户用储能等都将成为需求侧灵活性的重要资源，彻底颠覆过去以集中式大规模火电厂为主的系统，降低终端用户用电成本的同时，也为电力的清洁化带来裨益。
- **电力需求增长放缓，从增量转向存量，从数量转向质量，数字化技术赋能电力企业为客户提供更好的服务。**GDP增速放缓，用电需求增长放缓，未来的新机会将从增量转向存量，电网也需要从过去考虑如何服务更多的客户数量，变成如何提供更多样化的增值服务，例如为关注绿色电力服务的企业或个人买家提供

专门的绿色电力套餐，提升客户的体验。目前售电市场已经放开，售电公司如雨后春笋一般出现，终端电力消费客户选择众多，售电公司必须提供差异化的高品质服务才能从众多行业玩家中脱颖而出。如何通过数字化的大数据分析等技术，实时精准了解终端用户需求变化，为其提供更差异化的服务，将能为行业带来新的增长点。

后电改时代，整个电力行业更加开放，行业玩家将重新洗牌。过去几十年间，电力行业作为国计民生的基础，都由电网企业独家垄断，经过过去几轮电力市场化改革，从发电企业和电网企业分家，到如今的电力交易全面扩大，越来越多的新的行业玩家进入这个重量级市场。售电公司、综合能源服务公司，光伏风电企业等等，甚至来自于能源行业外的互联网和科技企业巨头也纷纷布局能源业务。这些新的玩家具备比庞大的电网企业和火电发电央企更大的灵活性，更快的决策流程，更大胆的想法和布局。因此，我们不得不思考，未来的能源行业主要玩家可能要重新洗牌，产生新的巨头。

数字化技术在电力行业中的应用主要在运营和需求侧商业模式的优化两大场景。

- **运营的优化：**电力部门作为重资产行业，整个产业链条上从发电，输配电到最后的售电，过程中些微的效率提升将能带来显著的降本效果，尤其是发电与输电环节。在现有运营情况下，通过全面密集的传感器安装大范围持续性的收集运营数据，并通过数据分

析技术优化运营参数，能够大幅度提升企业的运营效率，降低企业运营成本。以风电厂为例，风力发电运营过程中可以通过数字化大幅度提升效率。运行优化工具通过分析电厂内部数据、历史运行数据或外部信息，提出前瞻性建议，以便通知相关人员，降低生产成本，提高电厂的灵活性。再例如在项目开发环节，通过智能资产规划优化项目选址，优化资本开支，降低项目成本，能帮助以最小的投资成本满足未来高度电气化下新增的电力负荷需求。另外一个数字化技术在电力行业比较大的应用是通过更好的资产绩效管理，降低运维成本。根据国际能源署预测，2016年全球电力行业的运维成本占到了3000亿美金。通过数字化技术的应用，到2040年，运维成本降低5%即能帮助电力行业内公司包括终端消费者节省超过每年接近200亿美金的成本。⁴²

- **需求侧商业模式的优化：**简单的数据收集和数据分析能带来运营上的降本增效，但商业模式的变革来自于整个数据的互通互联，对能源行业至关重要，是未来新的增长点。以电力行业为例，由于行业的垄断性，过去几十年发展模式都相对固定，电力企业并无商业模式创新的压力，参与者也相对单一和垄断。随着电改的进程，发电、输配电、售电环节慢慢打通，放开管制，允许市场化资本和玩家进入，以数字化技术为依托，如何突破原有的商业模式，例如综合能源管理，将带来非常多的市场机会。系统层面的优化包括需求响应，V2G，以分布式能源为主的产销一体化模式等，都将能够提升电网的系统灵活性，以帮助“难以预测的”风电光伏等可再生能源提升并网比例，朝零碳中国更近一步，创造未来新的巨大市场。



图 19
数字化技术在电力部门的应用



整个电力行业数字化变革进程中依托的底层技术与其他行业数字化的技术无太大差别，以大数据、云计算、物联网、人工智能等为主，但在技术应用过程中，电力行业因为体制机制，政策环境，行业发展特点等有其自己独特的难点和应用场景。

数字化技术在电力部门应用的关键是打破原有的垄断，将所有行为和信数据化、透明化以及智能化，做到资源的最大化有效利用。

数字化技术在电力部门的运营优化应用—

稳步复苏期：

数字化技术在运营优化领域的应用，例如能源资产绩效管理、发电优化等目前已经相对成熟，能够帮助企业提高电网设备使用年限，降低运营成本，实现更安全、智能、稳定的电力供应和消费。不管是软硬件提供，还是整体解决方案上，市场上都有成熟的供应商可以提供相应服务。企业也可以直接从这些数字化技术对运营领域的管理和优化，获得成本上的显著降

低，相对来说就更有动力去接纳这些新的数字化应用技术。我们认为未来运营领域优化将会从单一设备的改造，或针对某一问题的解决，转为预防型主动智能运维，挖掘深层次效率提升潜力，提高企业竞争力。

1. 资产绩效管理

电力行业发展至今，基础设施最为完善，是社会最重要的重资产行业之一。电力设备投资巨大，如何提升设备的使用年限，降低设备的运维成本，对整个行业投资回报影响巨大。电力部门主要成本集中在发电和输电环节，使用数字化技术对这些相关设备开展全生命周期管理对于电网企业降低成本提升管理水平至关重要。通过对电力企业一整套设备改造为智能设备，借助数字化分析工具和人工智能算法，进行整体资产的状态监控，将过去的被动式问题解决型运维改为全面主动型的预测性主动维护模式，可以有效地帮助企业降低其运维成本。随着宕机时间减少，运维成本的降低，资产的使用有效率得到提升，企业将能带来利润的增加。

目前，基于数字化技术的资产绩效管理技术已经相对成熟，施耐德，ABB，西门子等巨头以及新的初创新秀禄智能源，风脉能源等都在为企业提供系统的资产绩效管理服务。在未来零碳能源转型的背景下，以资产绩效管理等相对成熟的应用场景作为切入点，提升数字化渗透率，对实现进一步的系统优化至关重要。

2. 智能资产规划

零碳能源转型未来需要大量新增的风电和光伏资产装机，而这些新增资产的选址和规划并非是一个简单的决定，选址决定后，其对电站未来几十年生命周期内

的发电效率将产生持续性的影响。尤其是未来东南沿海土地资源已经相对紧张情况下，如何通过数字化智能技术、智能勘探、筛选和规划新建项目选址，将能帮助显著提升发电效率，最大化风电和光伏的资源利用率，锁定未来20-30年电站的收益提升。

在风电和光伏电站的选址中，相较过去传统的人工勘探选址，数字化技术使无人机巡航勘探成为可能，并结合数字化平台和分析工具，能够快速精准的定位潜在风电和光伏项目位置，预估发电量及收益分析，为政府和开发商提供风电和光伏项目的发展规划，宏观和微观选址优化。

目前，国内光伏和陆上风电选址技术已相对成熟，但海上风电技术近些年才开始发展，投资又大，其选址规划方面的研究目前尚较少，缺乏标准和经验可参考，是下一步需要重点攻关的难点。国内成熟的新能源领军企业，包括金风科技，远景能源等都有较成熟的数字化平台和产品，为开发商提供智能项目选址等服务。

3. 发电优化

在电站资产建成后，风电厂通过新型数字化技术的应用，能够有效提升管控精度，将运维、检修等工作安排在没有风或少风的时间段，可以很大程度上提高发电效率，增加发电收入。根据远景公司的数据，通过为涡轮机配备传感器，从而让公司能够收集到风机如何运转、如何发电、需要什么样的维护等等各项数据，基于对风速和风向等因素的监测让风力涡轮机进行实时调整——例如改变叶片的倾斜度等——风电场可将发电量大幅度提升。

其次，考虑到电力行业的特性，要持续稳定安全的为电力用户保证电力的供应，发电厂在并网阶段要接受电网的考核。通过云计算等数字化技术的应用，提升风电厂发电效率和功率的预测准确度，能够帮助发电企业降低考核成本。

最后，通过对发电量更稳定精准的预测，也能够推进电网可再生能源比例的提升。行业内普遍认为可再生能源发电的波动对整个电力系统的调度带来了挑战，需要更多的备用容量来保证发电量和用电需求的实时匹配。通过更多数字化技术的加持，例如提升目前预测数据的质量，持续的更新改善预测的算法和软件，以及不断地完善预测系统，提高预测频率等手段，能够有效地降低可再生能源发电的不稳定性、减少电网调度备用容量需求。

4. 用电负荷管理

过去电力用户在购买用电上没有任何选择，电网侧也不会对需求侧进行市场化管理，这就导致了某些时段电网负荷集中，调度压力增加，分时电价等需求侧管理的行政措施也就应运而生。在数字化技术的帮助下，用户可以通过安装智能电表以及控制设备等，实时监视自己用电情况，甚至通过过去用电行为预测未来用电曲线，能够针对电力市场电价实时价格进行智能化用电负荷管理，简单来讲，即更好的选择自己的用电时间，安排自己的生产，来达到降低用电成本的目标。当然，目前这种应用还相对较为小众，首先是因为具备用电负荷管理能力的工业企业及居民用户少之又少，大部分人和企业还是在进行简单的用电买电流程；其次，电力市场改革尚在进展当中，在完善的市场价格信号形成之前，难以形成有效的市场激励手



段，督促用户进行负荷管理。未来随着售电市场的进一步完善，售电公司可能起到帮助用户提供负荷管理的职责，大工业用户也可以自己内部培养用电负荷管理能力，在不影响生产率的前提下优化生产计划，降低用电成本，帮助电网削峰填谷，降低不必要投资，数字化技术的成熟是这一切场景成为可能的前提。

数字化技术在电力部门的需求侧商业模式优化应用—期望膨胀期：

数字化技术应用于以虚拟电厂、需求侧响应等为代表的系统优化场景目前处于技术发展曲线当中的期望膨胀期，市场关注度很大，但下一步发展如果缺乏有效的政策支持和完善的市场机制环境，将很有可能对技术的进一步发展和应用造成比较长久的障碍。在相应技术成熟基础之上，如何建立市场主体之间有效的合作机制，例如让电力用户通过自己的储能和电动汽车向负荷集成商提供灵活性获益，负荷集成商通过整体调控分散式电源获得利润，通信技术公司通过提供底层电力控制技术和大数据分析获得收益，保证所有参与者的合理收益，实现这些模式的大规模应用。

5. 需求响应

电力市场的复杂即在于电力负荷的需求曲线是不断变化的，电力生产的供给也不是召之即来挥之即去的，电网调度管理如何能够持续、稳定、安全、可靠地保障供电，是关键。

需求响应这一模式是指在电力市场价格出现明显峰谷、或电力系统安全可靠存在风险（例如夏季中午尖峰负荷变大，电网调度压力变大）时，电力用户可以根据价格或其他激励信号，通过减少用电或改变用

电时间来改变用电行为，实现以最小的系统成本保障电力供需实时平衡，保障电网稳定。在数字化技术和互联网技术的加持下，新型自动化的需求响应能够更快速和精准的响应，并实现全自动调控。电力供应紧张时，电网公司可以向用户发出削减用电的需求响应信号，工商业和居民用户自动接收信号后可以通过自己的智能自动能量管理系统及时响应调整，使需求响应这一需求侧管理的模式能够最大化发挥其功效。

尽管美国和欧洲市场的需求响应已经发展较为成熟，但国内的需求响应才刚刚起步，目前大部分还是以行政干预为主。未来随着电力市场的发展，可再生能源装机比例的提升，以及人民生活水平提升带来的尖峰时刻用电需求对调峰带来的压力越来越大，都将进一步推动需求响应的市场发展。

需求响应的进一步发展需要以下几个方面的加持：

首先是底层信息技术和基础设施的支持。需求响应项目非常依赖于配套基础设施，通信设备，以及标准的统一。工商业用户单个居民可以提供的可供调节需求响应容量较低，通常只有几千瓦，因此需要负荷集成商来进行集合，统一管理，这需要基于完善的ICT技术，设备的智能化与数据互联。先进的计量技术，远程控制技术，双向通信技术等都是保障需求响应能正常运转的基础前提。因此需求响应的发展有赖于这些智能化、数字化信息管理系统的普及。与此同时，需求响应项目与国家或省电力管理平台系统对接的端口和标准统一也至关重要。

其次是电力市场改革的加速推进。需求响应潜力的释放受电力市场的市场化程度制约。我国电力市场建设

还处于较早阶段，当前的需求响应以行政干预为主，后续市场化难度依然较大。

最后从市场的角度来看，当前国内的需求响应用户主要以工业用户为主，工商业用户的市场意识还有待培育，需求响应的经济收益目前有限，难以激励市场的快速发展。用户参与度及参与粘性是衡量需求响应项目是否成功的一个重要指标，因此，如何设计需求响应项目的激励措施，加大需求响应项目的宣传，提升用户意识和参与度非常重要。

6. V2G

电动车电网双向充电技术比单向的有序充电更近一层，不仅实现了电动汽车在有充电需求时从电网充电，在电网负载紧张时，电动车内储存的能量也可以释放，达到双向交流效果。我国作为电动车保有量第一的国家，未来这些电动车的充电需求将会对电网造成巨大的压力，如果能够实现双向充电，将能够帮电网释放压力的同时，将电动汽车作为移动储能单元，帮助电网提高运行效率，提高其灵活性。

目前该技术的发展在欧洲和美国较快，在中国尚处于初期研发和试点阶段，由电网主导。未来该技术发展需要重点关注两大技术难点，一是如何保证电动汽车电池的寿命，双向充电增加了电动汽车充放电次数，这就必将影响电池的寿命，因此动力电池的进一步技术突破是实现双向充电的前提；二是提升电网自身的调度和运营能力，来保证未来更多电动汽车和电网双向互动之后电网运行的稳定。未来行业的快速发展也需要有统一标准的V2G管理平台，来协调车辆和电网之



间的双向互动。最后，决定该技术是否能够大规模商业化应用的基础是经济性，即电动汽车作为灵活性储能资源所能从电网侧获得的激励是否足够有吸引力，超过了双向充电本身对电池带来的损耗成本，让电动汽车用户愿意参与双向充电项目。

双向充电整体发展阶段尚处于技术成熟曲线的萌芽期，储能技术，尤其是动力电池技术的充放电次数突破是核心。我们认为在实现V2G大规模推广之前，固定式储能作为电网侧灵活性资源将率先实现商业化。

7. 基于分布式发电的产销一体化

如前文提到的，零碳转型背景下，未来电力行业将由过去的集中式为主向分散式发展，越来越多的工商业用户和居民家庭会采用分布式发电技术，通过自己拥有的分布式设备发电，包括屋顶光伏、储能、分散式风电等来满足自己的部分用电需求，降低电费账单的同时，也可以将富余的电量卖给电网或其他用户来产生额外收益。这种基于分布式发电的产销一体化的模式目前已经在分布式项目的自发自用，余电上网模式上体现，买卖双方主要是分布式项目业主和电网企业之间，未来分布式发电项目业主甚至可以直接将剩余的电卖给周边的有用电需求的其他业主，甚至是通过负荷集成商把富余的电力整合进入电力市场交易。目前，这种产销一体化模式在国内尚处于初级阶段，配电网级别的分布式市场化交易试点推动举步维艰。

未来，基于分布式发电的产销一体化模式不仅仅需要更多如区块链，分布式交易等数字化技术的加持，也需要发电技术成本进一步降低来支持这种商业模式的

经济性，政策和体制机制进一步放开，打破原有垄断格局，为电力用户降低成本，电网企业拓宽模式。

产业投资建议

电力行业是现代化社会发展的基础，2060年前实现全社会零碳，电力系统的脱碳是关键。未来高比例可再生能源下的电力系统需要大规模储能来解决可再生能源发电的间歇性、提升电网灵活性，保证电力供需实时平衡，数字化技术将通过信息技术手段在发电端提升发电效率、输配电侧实现系统优化与集成、用电侧开展需求侧管理，整体提升系统灵活性，实现高比例可再生能源并网的可能性。电力行业基础设施相较其他产业来说较为完善和成熟，电力技术本身与互联网信息技术的融合度也是最高的，因此，数字化、智能化、互联互通的电力未来是零碳能源转型的关键。

电力行业的数字化发展需要政策进一步引导和放开，允许和鼓励更多市场化资金和资源进入该领域。

新冠疫情这一偶发事件将前几年热过一阵的数字化领域投资再次提上热点。突如其来的新冠疫情带来的隔离封闭，造成了不少企业缺少人力，停工停产。疫情大大刺激了不少传统业务数字化进程的加速，业务也纷纷从线下转为线上。然而，目前数字化技术应用热点并非集中在电力行业。从历年投融资数据来看，当前市场上的投资机构关注的更多数字化技术应用领域集中在零售、金融、互联网等等，关注电力领域数字化应用的投资人和创业公司都相对较为少见，其中主要原因就是大部分电力部门的数字信息技术发展由电网企业自己主导，进入门槛较高。未来，如何通过

政策的有效引导和激励，放开电力部门数字化应用市场，吸引更多的市场资本了解电力行业市场情况，关注电力行业的数字化，引入市场化竞争，加速电力行业数字化水平。

电力系统错综复杂，从过去的黑匣子到现在慢慢放开，市场投资者需重点关注对该垂直行业需求充分了解的公司以获取先发优势。从电力物联网到能源物联网，电网的数字化转型早已是大势所趋。2020年国家电网“数字新基建”预计总投资将高达247亿元，十大重点建设任务中数字化平台是首当其冲，电力数字化市场规模潜力巨大。⁴³电网企业、发电企业及其他能源企业纷纷加码投入数字化转型，但需注意的是电力行业数字化与其他行业数字化不同，面临更多的挑战，例如其有很多实时海量电力数据，并且有专门的数据安全需求，以及对数据精度和速度要求极高。由于电力部门过去的行业垄断，数字化技术研发和推广都集中在电网企业内部，相对缺乏市场化，因此技术水平也相对较低。尽管目前市场上做数字化技术的公司很多，但能充分了解电力垂直行业具体需求的公司相对较少，投资者应重点关注这类公司。

配电侧和用户侧当前数字化水平较低，技术应用有较大市场发展潜力，是未来5-10年的蓝海市场。电力部门的发输配售环节上，发电和输电环节目前数字化水平较高，配电和用电环节数字化水平相对较低，未来有较大的提质增效空间。电力数字化技术在运营领域的应用，包括能源资产绩效管理，发电优化等等已经较为成熟，并不受当前电力体制机制所制约，但目前主要由电网企业自己主导，产业相关的后期成长型投资者可重点关注这些领域的头部公司和技术。然而像

虚拟电厂，需求响应，V2G等配电侧和用户侧的应用，其目前在中国尚处于起步期，虽有广泛的兴趣关注，并且电改的推进也对售电侧进行了一定程度的放开，但其未来发展非常有赖于政策的引导和进一步开放，因此更适合风险类投资者进入，建议在投资标的的筛选上重点关注在该垂直领域有自己的经验和独特认识的公司。我们认为，数字化技术在配电侧和用电侧的应用场景将是未来5-10年的蓝海市场。

最后，电力行业的数字化转型有赖于体制机制及其他相关技术的突破和改变。从技术发展阶段来看，电力行业的数字化依托于大数据、云计算、人工智能、物联网等底层技术的加持。零碳能源转型并非是仅仅靠数字化技术，其中更多需要依赖的是体制机制、政策和市场设计的改变、以及其他关键技术的突破，包括光伏和风电发电成本的持续降低，储能技术的成本降低、大规模推广应用等等。数字化转型潜力的全面激发需要依赖于电力市场改革的红利：只有打破现有的垄断形式，允许更多的市场主体参与和交易，拥有完善的电力市场价格体系，很多电力行业的数字化应用才能真正带来收益，而非单纯的停留在节能减排。

未来，我们相信能源行业的全面数字化将颠覆原有行业格局，对能源终端用户来说，未来有更多的购买电、热、冷等的来源和选择，获得综合一体化的能源服务；能源企业本身能够扩展现有商业模式，更精准的了解客户需求，提供新的增值服务增加营收，并提升现有运营模式的效率，降低成本；对能源转型来说，数字化的能源未来将能够使清洁零碳电力发电成为可能，实现真正的零碳中国。

中国零碳产业发展的特点与展望



中国零碳产业发展的特点与展望

1. 零碳产业包罗万象,七大领域近二十项技术创新正处于不同的发展阶段,共同形成广阔的投资空间。政府在产业发展早期的作用尤为重要,需要合理设计循序渐进、环环相扣的政策行动;市场力量则是产业发展中后期的主要推动力。

零碳中国七大领域中的多项技术或产业,正处于不同的发展阶段,共同形成了广阔而多样的投资空间。由于处在不同发展阶段,这些技术或产业发展的关键任务也各不相同。工业电加热、工业直接氢能应用、液流电池、动力电池回收等仍处于技术萌芽期,其主要任务在于基础技术的研发,并形成一代产品;绿氢制取、氢燃料电池正迈向期望膨胀期,电动车也正处于期望膨胀期,并面临着可能的市场低质量扩张,其关键任务是要建立技术的核心优势,夯实实力;热泵采暖等产业则经历了泡沫破裂期的大浪淘沙,需要在政策、资本、技术等多方面共同努力下,通过市场淘汰,并打造二代产品,开启新一轮的增长;以锂离子电池为代表的多种储能技术及高耗能行业产品再生等循环经济产业则已经进入稳步复苏期,需要不断利用规模效应推动成本降低,并尝试开发多样化的产品,树立竞争优势;光伏、风电、核电等零碳发电技术则已经进入产业成熟期,在成本已经具有一定的竞争力的情况下,努力不断提高市场渗透率。

零碳产业的发展具有资本体量大、技术以硬件为主、技术路线惯性较大、投资回报周期较长等特点,因而投资和产业发展受政策的影响很大。特别是在产业发展的早期,政府必须有效发挥“指南针”的角色,通过多种政策手段的组合,对产业发展起到引导作用。

对于处在不同发展阶段的创新技术,在技术萌芽期,政府需要提供科研支持和示范项目鼓励,促进工业直接用氢、动力电池回收等新兴产业的战略布局;在期望膨胀期,政府可以利用产业政策有效地引导燃料电池、电动车等产业向开发关键技术、建立核心优势的高质量发展方向倾斜;政府对于热泵等产品的相关标准制定等,则是帮助产业建立秩序、完成优胜劣汰,推动产业有效度过泡沫破裂期的关键行动。而进入稳步复苏期和产业成熟期后,政策“看不见的手”的引导作用可以相应弱化,如逐步退出对光伏、风电等产业的补贴,给产业足够的空间去进行良性的市场竞争和自我优化。在零碳产业的政策引导方面,我国有着很大的优势。一方面我国上下各级政府具有多样的政策手段去进行产业支持和引导,另一方面我国几十年来也已积累了丰富的经验,针对能源相关产业制定相应适合的政策。这将帮助我国在零碳产业的发展上占得先机。

市场力量在产业发展的中后期是主要推动力,需要长期协同部署生产效率提升、产品优化、应用场景拓展和辅助服务设施。

在产业发展的技术萌芽期和期望膨胀期,市场力量扮演的角色较为探索性,主要表现为基础产品的研发和大型企业在基础设施的提前布局,适合于高风险高回报倾向的投资行动。泡沫破裂期,市场力量在政府推行的有关行业标准下推动产品的优化更新,同时探索生产效率优化和量产、推动周边配套设备的布局 and 判断准确的应用场景,是帮助产业打好发展基础的关键。在稳步复苏期和产业成熟期,市场力量的引导作

图 20
中国零碳产业发展的阶段性特点

发展阶段	技术萌芽期	期望膨胀期	泡沫破裂期	稳步复苏期	产业成熟期
代表技术	<ul style="list-style-type: none"> 工业电加热 工业直接用氢 液流电池 动力电池回收 电力系统优化 	<ul style="list-style-type: none"> 绿氢 氢燃料电池 电动汽车 	<ul style="list-style-type: none"> 热泵采暖 	<ul style="list-style-type: none"> 铅炭电池 废弃物的能源化利用 高耗能行业产品再生 锂电池 电力系统运营优化 	<ul style="list-style-type: none"> 建筑/工业能效提升 光伏 风电
关键任务	基础技术成型 研发初代产品	突破关键技术 布局配套设施	市场筛选优化 研发二代产品	降本增效 研发多样化细分产品	进一步扩大市场
主要驱动					

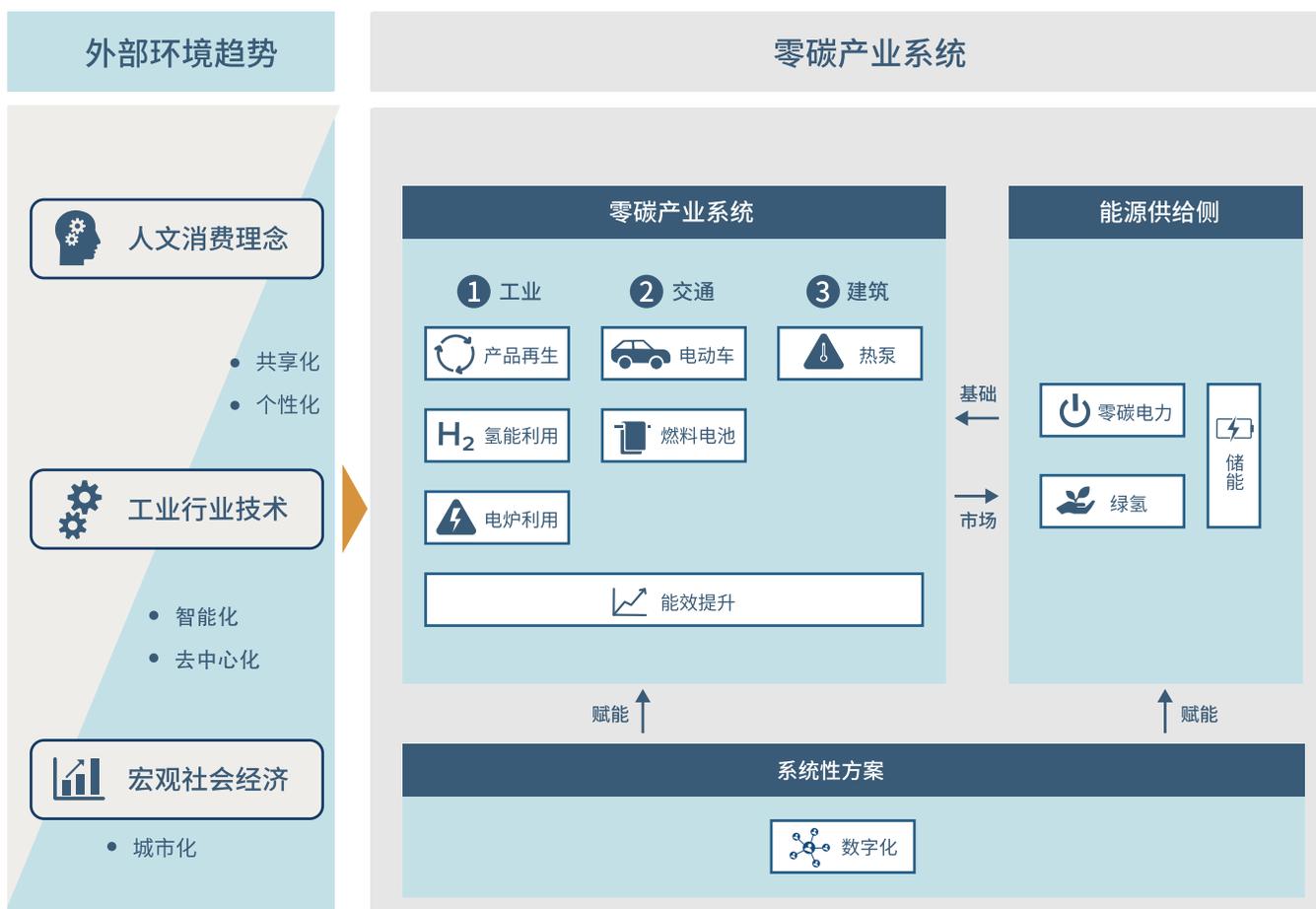
用比政府更加关键。二代、三代产品的投资，生产流程的整合优化，配套基础设施的完善和应用场景的拓展依然能起到相互配合，协同推动产业发展的作用。

2. 零碳中国七大投资领域之间具有很强的协同性。政策制定和市场投资更应有战略性全盘考虑，洞察不同技术领域在零碳生态中的角色和关联。同时应考虑其他外部宏观社会经济、工业行业技术和人文消费理念的新发展为零碳产业创造的发展机会。

1) 零碳电力、绿氢和储能是“基石”，三者相互成就。这些创新属于能源系统中的供给侧创新，需要大规模的产业建设、优化技术、降低能源供给价格，为消费者端的零碳产业助力。

2) 数字化是整个零碳生态发展的“加速器”。数字化为整个能源系统赋能，从需求侧的工业数字化节能、智能楼宇、电动车双向充电、需求响应，到供给侧的发电优化、资产绩效管理、分布式电力产销一体化

图 21
中国零碳产业发展的协同性



等，数字化可以与几乎其他所有领域相结合，通过信息技术手段优化能源供给、运营、消费等方面面。

3) 工业、交通和建筑部门的零碳投资领域是重要“支点”。工业、交通和建筑是重要的能源消费部门。各技术创新将改变能源利用方式，推动新的产业

链形成，产生新的利润池。例如，电动汽车不仅带动了基础设施的新一轮投资及上游电池生产、服务和资产管理公司的发展，还成为无人驾驶等新科技的载体，甚至有机会成为移动储能的工具，反过来推动能源供给侧的零碳创新。

4) 其他外部宏观社会经济结构变化、工业行业技术革新和人文消费理念发展也将构成全方位影响力，助力中国零碳转型的各项重点技术和产品形成新竞争优势。

- **城市化：**城市发展、社会形态变化为能源零碳转型撬动了更多可能性。随着城市化的进程，农村人口减少，农村土地流转加强，统一经营的大农场模式将使得生物质收集摆脱小农经济分散化的困难，推动生物质能源的发展。

- **去中心化：**随着技术和制度发展，去中心化的新业态将为零碳产业发展打破市场壁垒。如未来可能出现的小规模、分散化的化肥等化工原料生产，将降低对氢气供给的要求，现有的电解槽规模即可满足，不需进一步扩大。再如分布式市场化交易模式等电网改革将推动分布式光伏上下游产业链的升级。

- **智能化：**经济和信息化技术的大发展使得智能化成为工业、交通和建筑各领域的新需求，有利于提升效率，改善体验。这将有力推动能源消费侧电气化的进程。

- **共享化：**共享经济的概念近年来在各个领域持续渗透，共享不仅代表总需求的减量，也代表效率的提升和物品有限价值的延续，从衣、食、住、行改变了人们的生活和消费习惯，也渐渐改变了人们的观念。因此，容易成为“共享”载体的能源消费侧创新将具有新竞争优势。

- **人本化：**经济发展和生活水平的迅速提升使消费从侧重功能性价值到追求人文价值，购买已不仅是交易行为，还是对新理念的拥护。可持续消费产品已是一股持续上升的力量。在这一背景下，面向用户的能源消费侧零碳创新（电动汽车、氢燃料电池汽车、空气源热泵家居等）将具有很大市场潜力。

针对零碳中国产业领域的协同性特点，政府在产业支持上，应通过法律、政策和规划等手段，推动零碳产业协同发展，从而达到“1+1>2”的协同效果。投资主体要关注领域间的相互联系，以利于为本领域的发展提供后盾基础、潜在市场、服务能力等。同时，应考虑其他外部宏观社会经济、工业行业技术、人文消费理念的新发展为零碳产业创造的机会，它们将构成全方位影响力，助力中国零碳转型的各项重点技术和产品形成新竞争优势。

零碳中国必将成为长期价值投资的新风向，一方面得益于零碳发展转型的全球趋势，另一方面归功于中国政府制定的日益清晰的零碳战略目标。考虑到零碳中国仍然处在发展建设的早期阶段，政府应围绕七大领域出台引领性和针对性强的细化政策措施，不断完善相关领域的投资环境；投资者应加强对零碳投资领域的了解，加紧扩大能力圈，为参与投资、收获价值回报做好充分准备。

参考文献

1. 国际能源署, 2020全球新能源汽车展望, 2020.
2. 彭博新能源财经, 2020新电力转型趋势, 2020.
3. 能源转型委员会, 落基山研究所, 中国2050: 一个全面实现现代化国家的零碳图景, 2019.
4. “Zero Carbon Cities” Thomson Reuters Foundation News. <https://news.trust.org/packages/zero-carbon-cities/>.
5. International Energy Agency (IEA). *Meeting Climate Change Goals Through Energy Efficiency: Energy Efficiency Insights Brief*, 2018.
6. 王庆一, 2017能源数据, 2017.
7. 姬嘉琳, 马伊澜, 王姗姗等, 工业园区能量梯级利用节能减排效益分析及其对城市空气质量影响评估, 环境科学学报, 2020.
8. 中国能效经济委员会, 中国能效2018, 2019.
9. 国网能源研究院, 中国节能节点分析报告, 2019.
10. 清华大学建筑节能研究中心, 中国建筑能源年报, 2019.
11. 华夏幸福产业研究院, 2019.
12. 国网能源研究院, 中国节能节点分析报告, 2019.
13. 能源转型委员会, 落基山研究所, 中国2050: 一个全面实现现代化国家的零碳图景, 2019.
14. 能源转型委员会, 落基山研究所, 中国2050: 一个全面实现现代化国家的零碳图景, 2019.
15. 清华大学建筑节能研究中心, 中国建筑节能年度发展研究报告, 2019.
16. 能源转型委员会, 落基山研究所, 中国2050: 一个全面实现现代化国家的零碳图景, 2019.
17. Hong Huo et al. *Projection of Chinese Motor Vehicle Growth, Oil Demand, and CO2 Emissions through 2050*, *Transportation Research Record*. *Journal of the Transportation Research Board* (2038, 69-7), 2007.
18. 中国工信部数据, 2020.
19. 恒大研究院, 中国新能源汽车发展报告, 2020.
20. 德勤, 一场蓄势待发的商业革命: 中国新能源汽车五大趋势分析与价值链定位模式和战略思考框架解读, 2019.
21. 德勤, 一场蓄势待发的商业革命: 中国新能源汽车五大趋势分析与价值链定位模式和战略思考框架解读, 2019.
22. Innovation for Cool Earth Forum (ICEF). *Industrial Heat Decarbonization Roadmap*, 2019.
23. Innovation for Cool Earth Forum (ICEF). *Industrial Heat Decarbonization Roadmap*, 2019.
24. Innovation for Cool Earth Forum (ICEF). *Industrial Heat Decarbonization Roadmap*, 2019.

25. International Renewable Energy Agency (IRENA). *Renewable power generation costs in 2019, 2020*.
26. BloombergNEF. *New Energy Outlook 2019*.
27. 华泰证券, 红日初升的核电行业—高效清洁的核心资产, 2019.
28. 兴业证券, 水电行业深度报告: 国之重器, 宁静致远, 2019.
29. Verband Deutscher Maschinen-und Anlagenbau (VDMA). *International Technology Roadmap for Photovoltaic*, 2020.
30. 中国光伏行业协会中国光伏产业发展路线图 (2019年版), 2019.
31. International Renewable Energy Agency (IRENA). *Future of Wind*, 2019.
32. International Renewable Energy Agency (IRENA). *Future of Wind*, 2019.
33. International Renewable Energy Agency (IRENA). *Future of Wind*, 2019.
34. International Renewable Energy Agency (IRENA). *Future of Wind*, 2019.
35. 中关村储能产业技术联盟 (CNESA), 储能产业研究白皮书2020, 2020.
36. BloombergNEF. *2019 Battery Price Survey*, 2019.
37. BloombergNEF. *Hydrogen: The Economics of Production from Renewables*, 2019.
38. BloombergNEF. *Hydrogen: The Economics of Production from Renewables*, 2019.
39. Department of Energy. *Target Explanation Document: Onboard Hydrogen Storage for Light-Duty Fuel Cell Vehicles*, 2017.
40. 能源转型委员会, 落基山研究所, 中国2050: 一个全面实现现代化国家的零碳图景, 2019.
41. 国家能源局, 2019年度全国可再生能源电力发展监测评价报告, http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-05/16/content_5512148.htm.
42. International Energy Agency (IEA). *Digitalization & Energy*, 2017.
43. 财新, 国家电网247亿投资“数字新基建”, <http://www.caixin.com/2020-06-16/101567894.html?NOJP>, 2020.



北京市西城区木樨地北
里甲11号国宏大厦A座1120

<http://zero-carbon.org.cn>



北京市朝阳区景华南街5
号远洋光华国际C座1606

<http://www.rmi.org>