

“变革性洁净能源关键技术与示范” A类先导专项
“面向国家能源结构变革战略研究” 课题

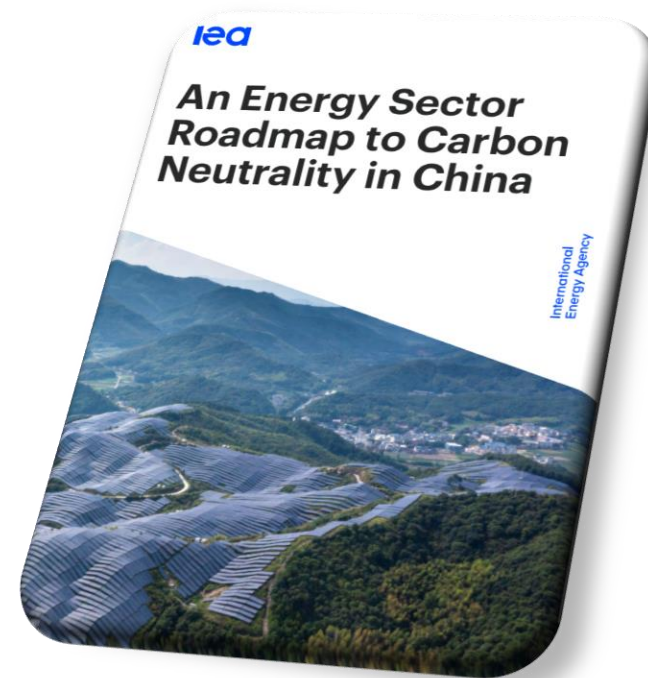


洁净能源重大信息专报

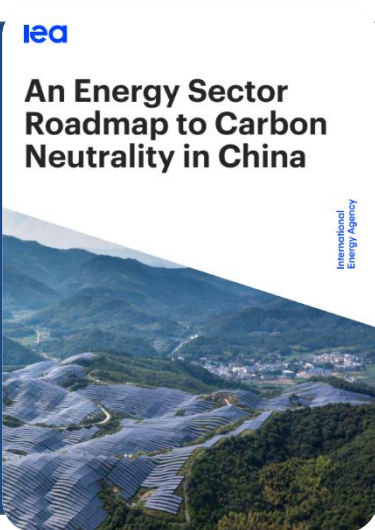
2021年第06期（总第12期）

本期看点

- IEA 《中国能源体系碳中和路线图》
报告要点解读



中国科学院洁净能源创新研究院
中国科学院武汉文献情报中心



IEA 《中国能源体系碳中和路线图》 报告要点解读

国际能源署 (IEA) 2021年9月29日发布

目 录

- ◆ 报告关键要点概览
- ◆ 中国碳中和愿景
- ◆ 中国能源系统转型
- ◆ 实现碳中和的部门路径
- ◆ 能源转型的技术创新需求
- ◆ 更快速能源转型的近期机遇
- ◆ 中国碳中和技术创新体系
- ◆ 实现碳中和的政策建议

iea

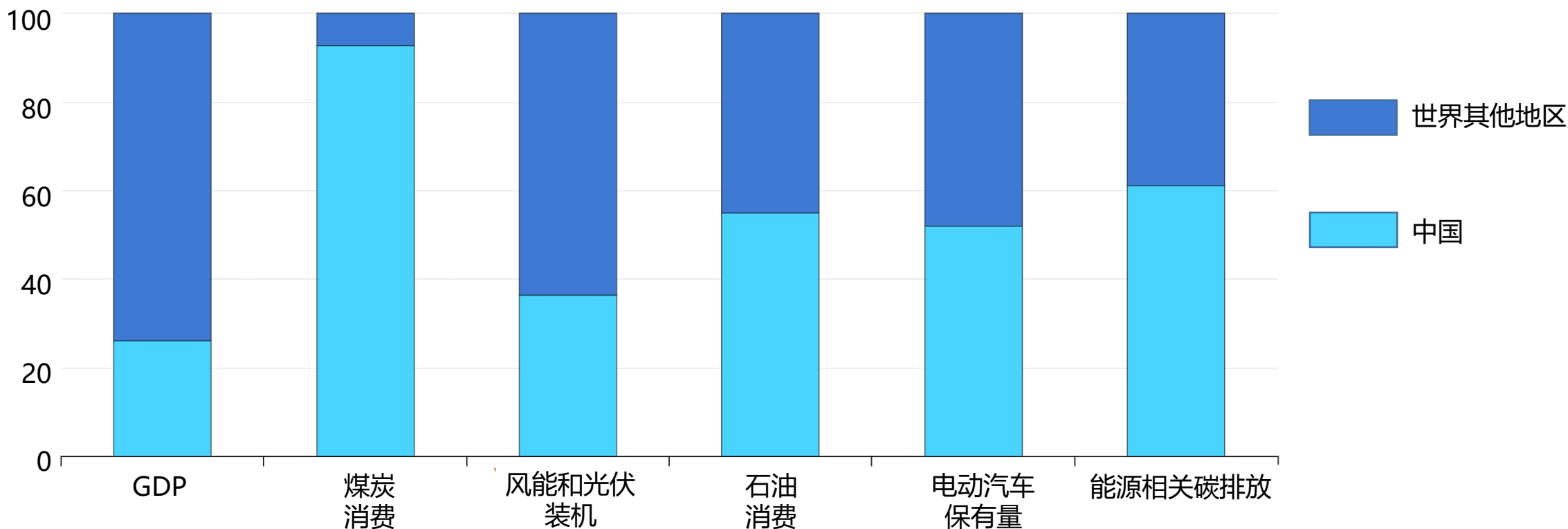
An Energy Sector
Roadmap to Carbon
Neutrality in China



报告关键要点概览

1、中国可以在目前的清洁能源发展势头上更进一步

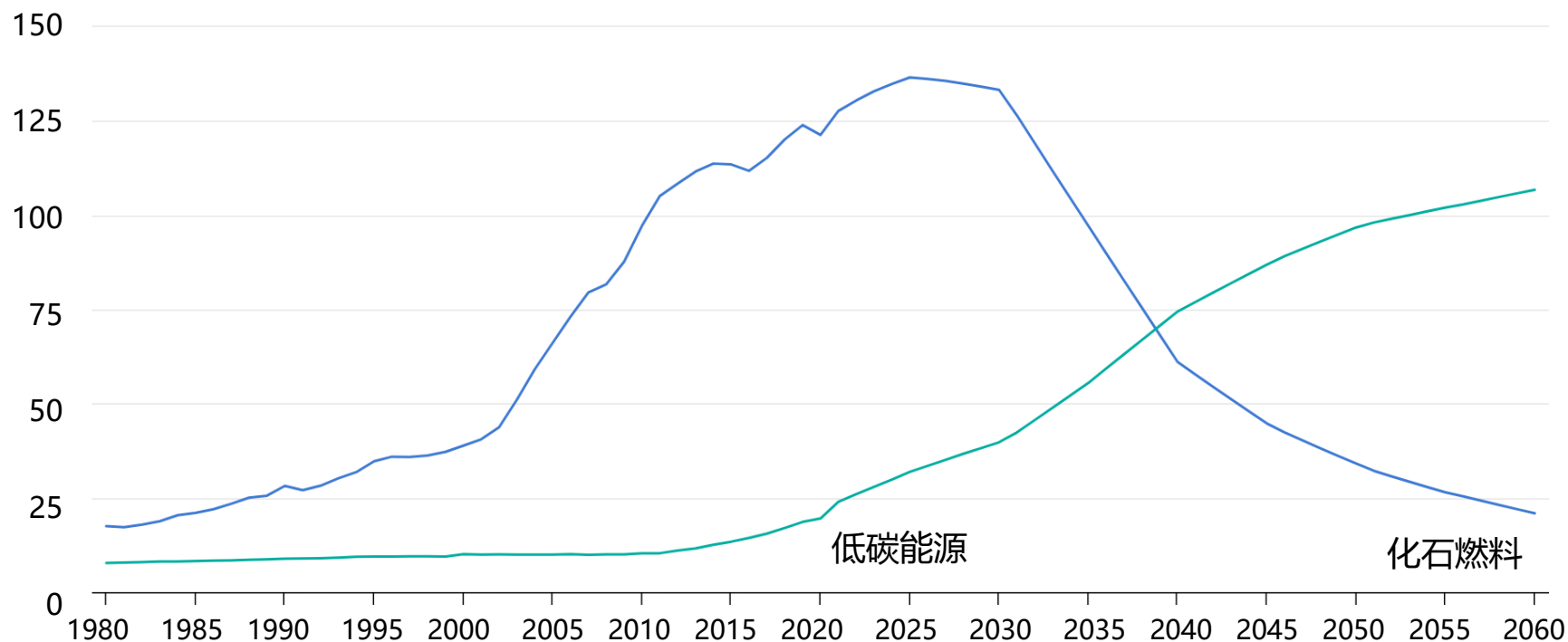
图1 1980-2020年中国经济和能源关键指标的增量在全球占比（单位：%）



- ◆ **如果没有中国参与，可能无法将全球气温升幅限制在1.5°C内。** 中国是世界上最大的能源消费国和碳排放国，其二氧化碳排放量占全球总量的1/4。中国近90%的温室气体排放源自能源体系。因此，能源政策必须以碳中和为导向推动转型。
- ◆ 中国的能源体系体现了几十年来在追求其他能源政策目标的同时，为使数亿人脱贫所做的努力。
- ◆ **中国的二氧化碳排放量仍在上升，但在2030年之前达峰是可行的。** 中国碳排放的主要来源是电力（48%）、工业（36%）、交通（8%）和建筑（5%）。如果中国实现已公布的“十四五”规划目标，其燃料燃烧产生的碳排放量将在2020年代中期达峰并趋于平稳，然后在2030年前略有下降。

2、实现碳中和目标要求能源体系快速而深度的转型

图2 APS情景下1980-2060年中国一次能源需求总量（单位：艾焦）



- ◆ **中国在2030年前实现碳达峰，有赖于三个关键领域的进展：提高能效、发展可再生能源和减少煤炭使用。** 在承诺目标情景（APS）中，到2030年中国的一次能源需求增长速度将远远低于整体经济的增长速度。主要原因是能效大幅提高，以及产业转型从重工业转向能源强度较低的经济活动。
- ◆ **中国完全有能力提供实现碳中和目标所需的投资水平。** 虽然投资总额将大幅攀升，但其在整个经济活动中所占比重却会下降。

3、中国每个行业部门都有可行的路径来实现深度减排1/2

图3 2015-2020年中国年平均新增发电装机容量
(单位: 吉瓦)

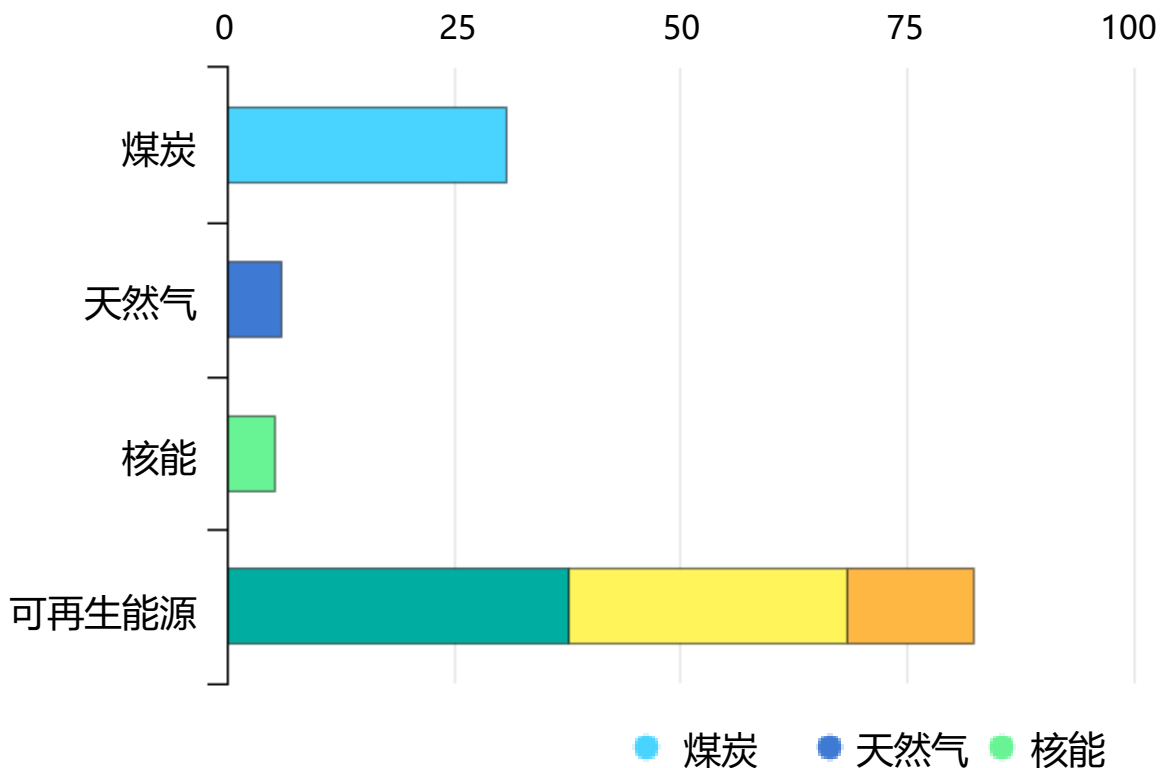
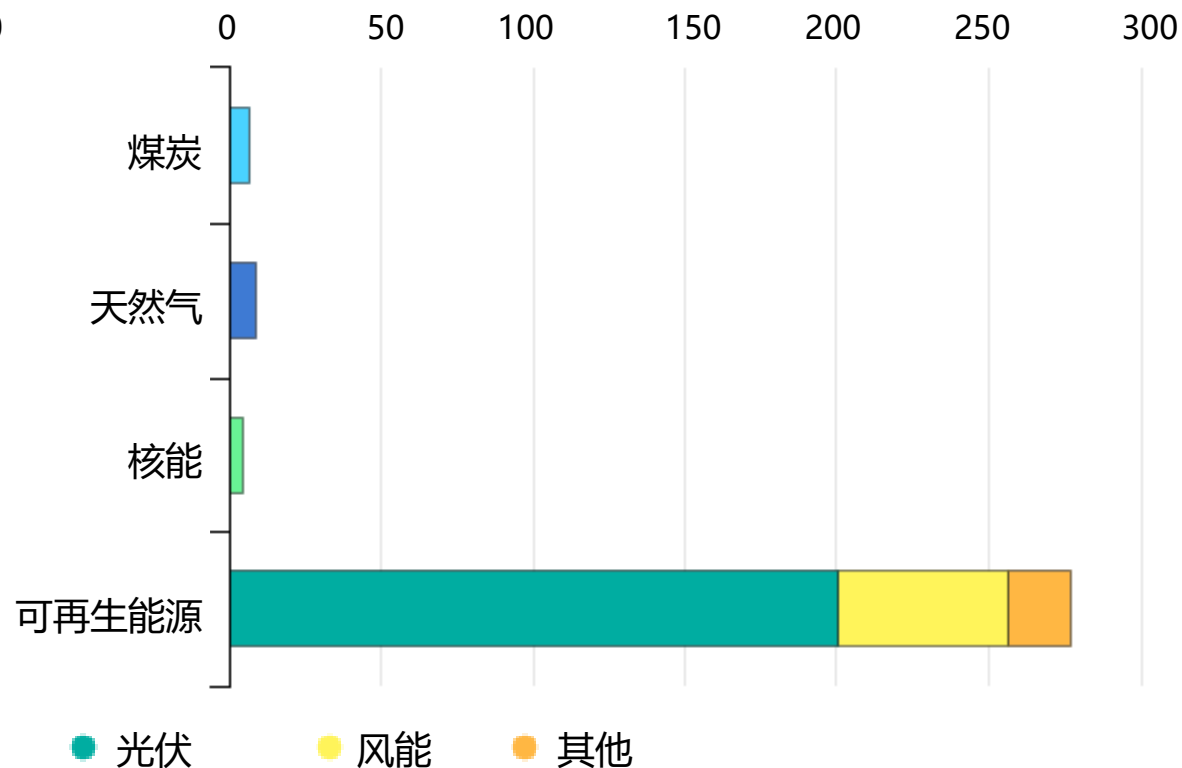


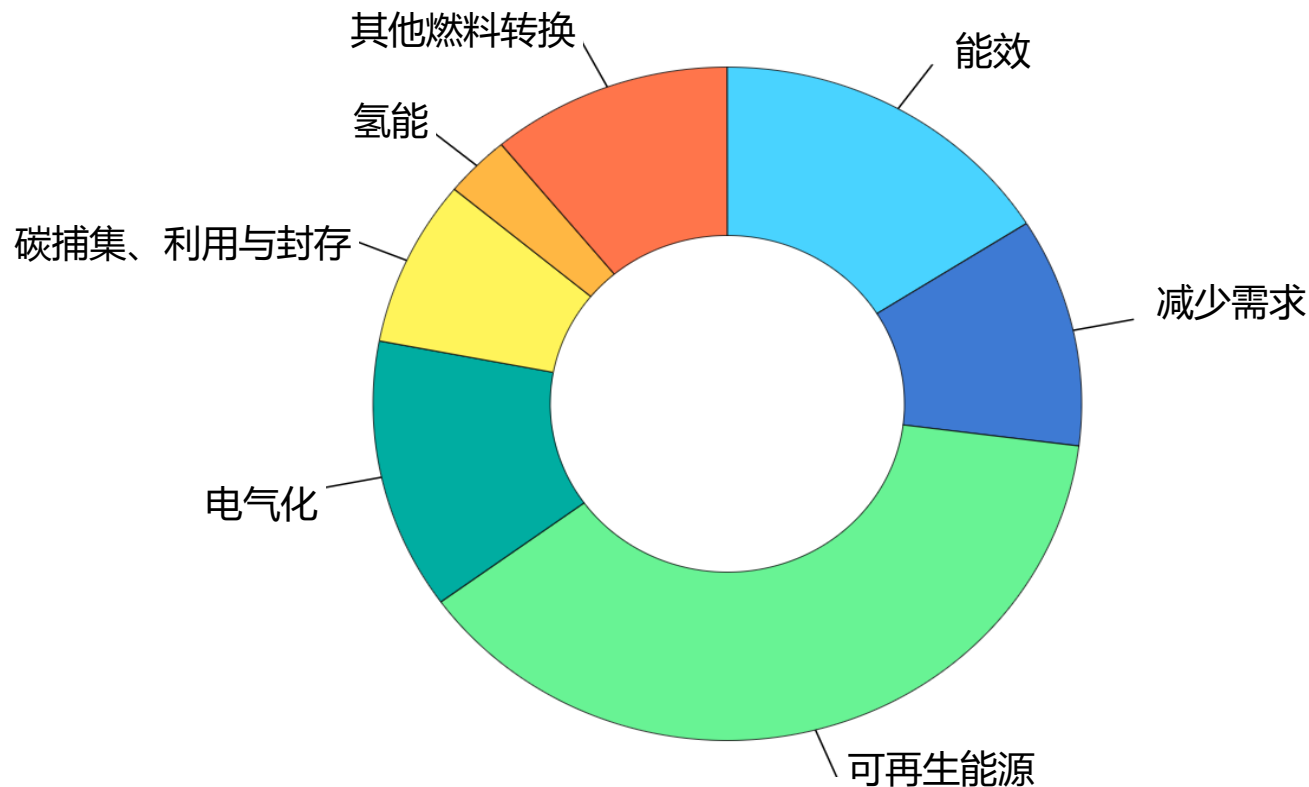
图4 APS情景下2020-2060年中国年平均新增发电装机容量预测
(单位: 吉瓦)



◆ **以可再生能源为主导的电力部门为中国清洁能源转型奠定了基础。**在APS情景中，中国电力部门将在2055年前实现净零排放。预计到2060年，中国发电量将增加130%，其在终端能源需求中占比将翻一番达到50%以上。可再生能源发电量（主要是风能和太阳能光伏）在2020年至2060年间将增加近7倍，届时将占发电总量约80%。

3、中国每个行业部门都有可行的路径来实现深度减排2/2

图5 APS情景中不同减排措施对中国到2060年累计减排量的贡献



- ◆ **提高能效和当今的市场化技术只能使工业部门部分实现净零排放。** APS情景中，到2060年中国工业部门碳排放量将下降近95%，未采用减排技术的煤炭使用量将降低90%，剩余排放将被电力和燃料转化行业的负排放所抵消。能效提高和电气化在短期内推动了大部分工业减排，而新兴的创新技术，尤其是水泥、钢铁和化工行业的氢能和CCUS应用，将在2030年后发挥主导作用。
- ◆ **电气化是交通和建筑部门去碳化的关键。** 到2060年，通过采用电气化、清洁的区域供热和提高能效等措施，建筑部门直接碳排放将下降95%以上。

4、在2030年前加快减排进程不仅可能而且大有益处

图6 2020-2030年中国能源和过程相关碳排放
(单位: 十亿吨CO₂)

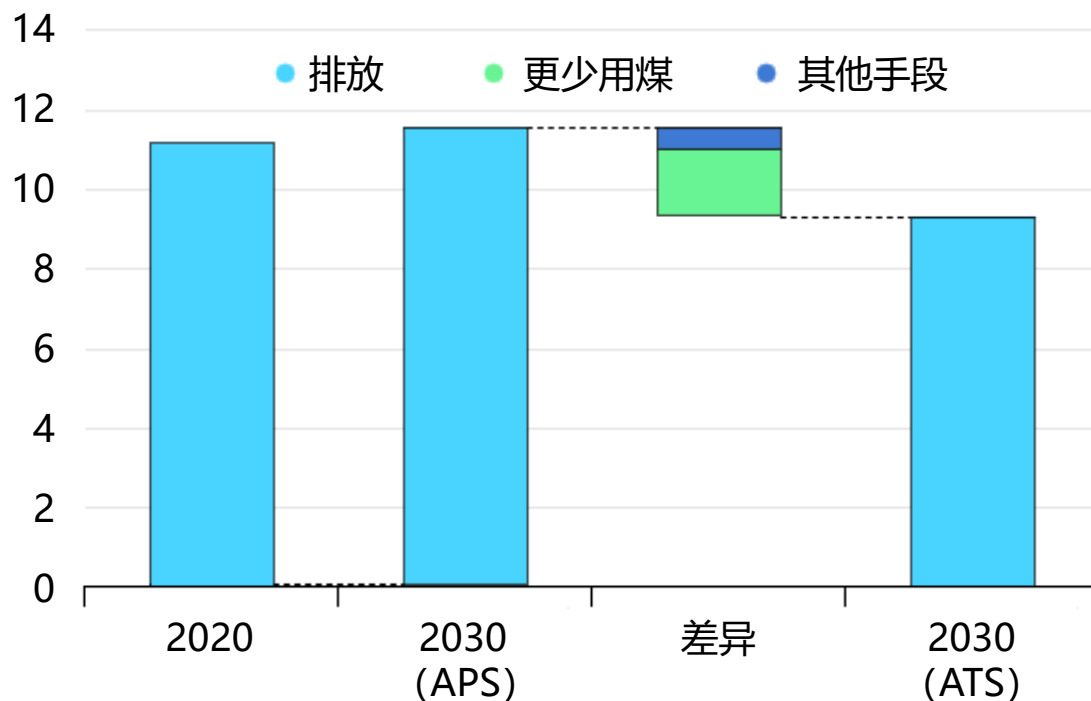
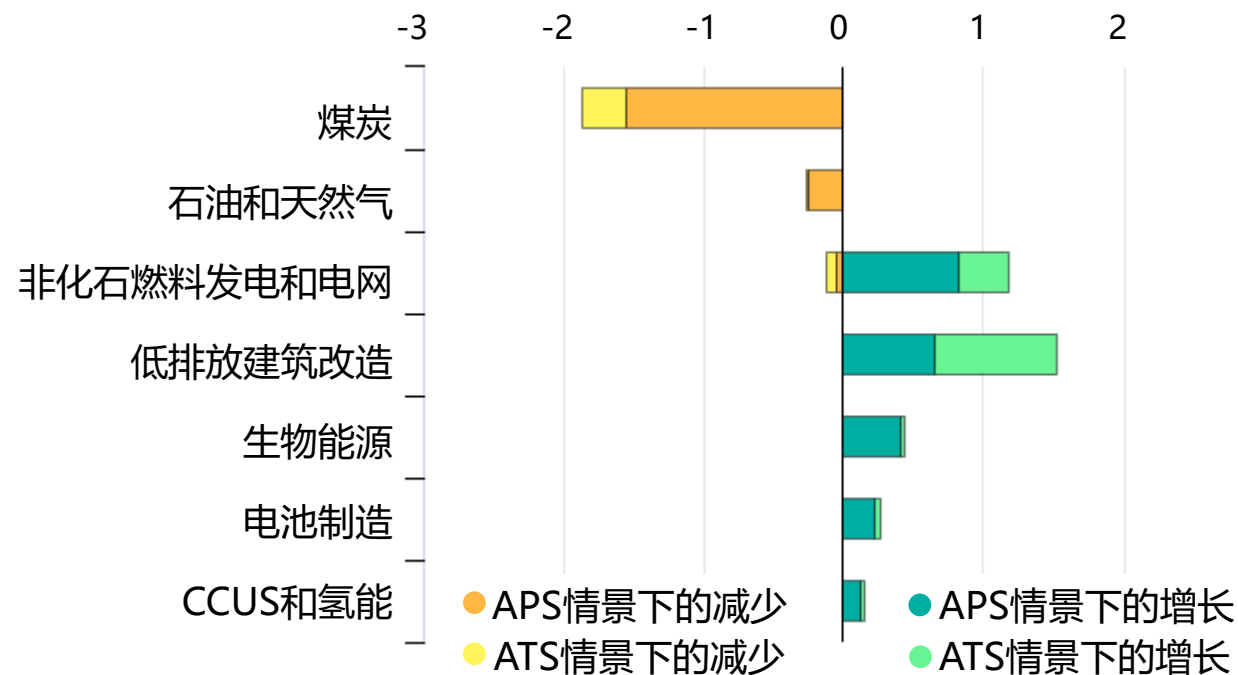


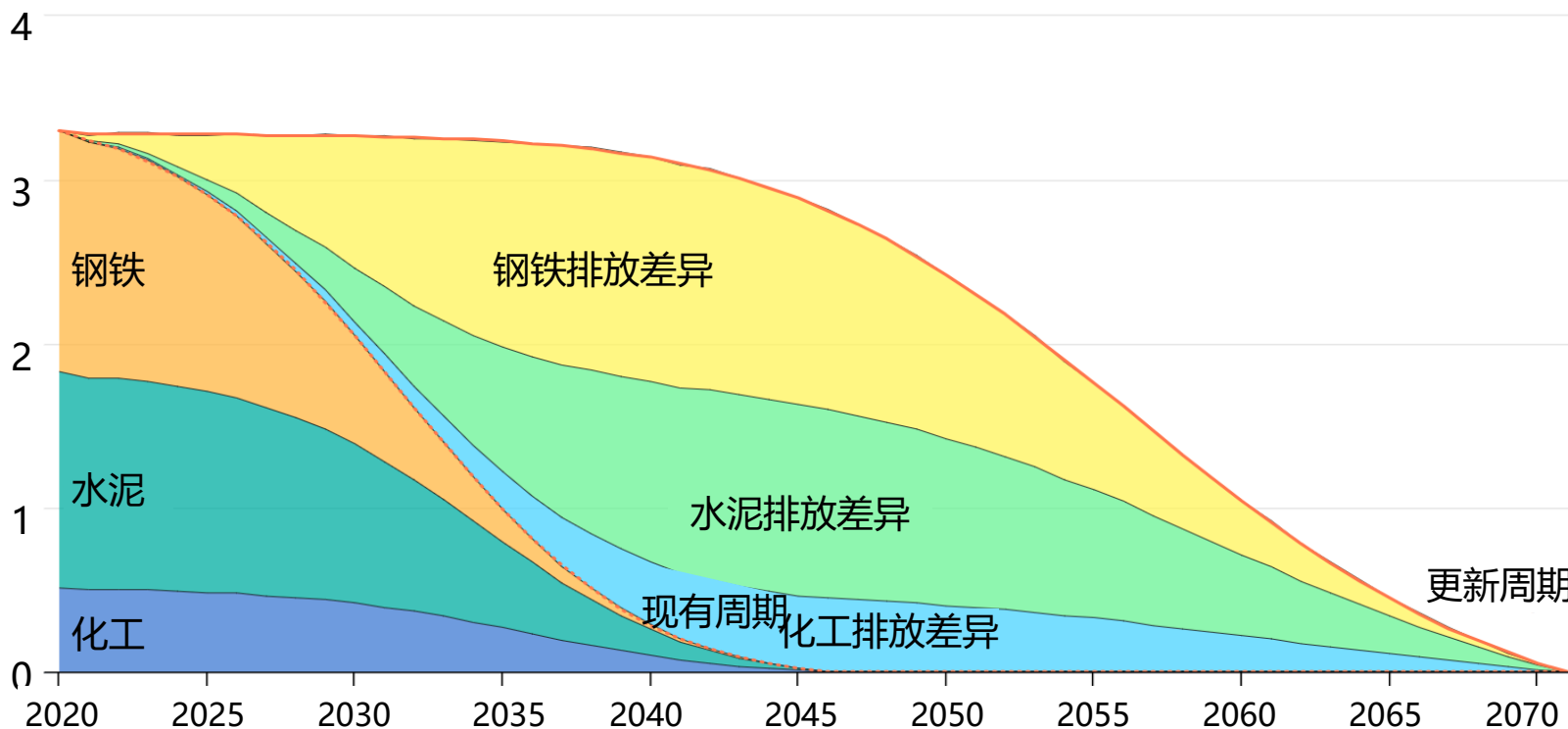
图7 2019-2030年按情景划分的中国就业岗位变化
(单位: 百万个)



- ◆ **加快实现2030年碳减排目标可以减少2030年以后的减排负担。** 中国拥有的技术能力、经济手段和政策经验，可以比APS情景更快实现2030年的清洁能源转型目标。
- ◆ **加快实现2030目标所带来的社会效益不仅限于应对气候变化。** 到2030年，加快国内行动将使中国清洁能源供应领域的就业岗位增加360万个，而在化石燃料供应和化石燃料电厂减少的就业岗位为230万个。而加速转型情景(ATS)中，净增长的就业岗位比APS情景多出近100万个。
- ◆ **将中国的中和目标范围扩大至所有的温室气体，将凸显碳排放早日达峰的益处。** 这可能要求中国能源体系在2060年前就达到净零碳排放，以抵消更难消除的非能源部门排放。

5、处理现有排放密集型资产有助于能源有序转型

图8 2020-2070年中国现有重工业基础设施在更新周期下的排放量（单位：十亿吨CO₂）



- ◆ 即使不对化石燃料进行任何新的投资，中国能源体系的排放量仍然只会非常缓慢地下降。如果中国现有的排放密集型基础设施继续以近年来的相同方式运行，从现在到2060年可能将产生1750亿吨碳排放。
- ◆ 如果没有更清洁的替代品，中国下一轮的重工业投资可能会导致大量的新增排放。在APS情景中，到2060年中国能源体系约40%的碳减排量来自于今天仍处于原型或示范阶段的技术。当计划淘汰现有产能时，必须要有可用的新低碳工业技术，以避免迎来新一轮排放密集型产能更新。
- ◆ 到2030年，更快的清洁能源转型可以使现有资产及其利益相关者更容易适应这一进程。ATS情景避免了到2060年APS情景中约200亿吨的“锁定”排放。这些排放来自于2030年之前的电力和工业部门投建的长寿命资产。

6、创新是成功转型的关键

- ◆ **到2060年实现碳中和需要大幅加速清洁能源创新。** 中国正在成为清洁能源创新的世界领袖。自2015年以来，中国用于低碳能源的公共研发支出增加了70%。中国在可再生能源和电动汽车方面的专利申请量占到近10%。近年来，中国的初创企业吸引了全球超过三分之一的能源早期风险投资。
- ◆ **应妥善利用中国创新体系，以激励广泛的低碳能源技术进步。** “十四五”规划旨在将创新重点转向低碳技术，并制定新的政策措施。中国目前的政策激励措施更适合像CCUS和生物精炼这样的大规模技术，而非网络基础设施和面向消费者的产品，但后者才是中国目前的制造优势。除了直接提供研发资金，还可以通过竞争性利基市场、基础设施投资和其他监管措施来激励创新者，以推动技术部署。

iea

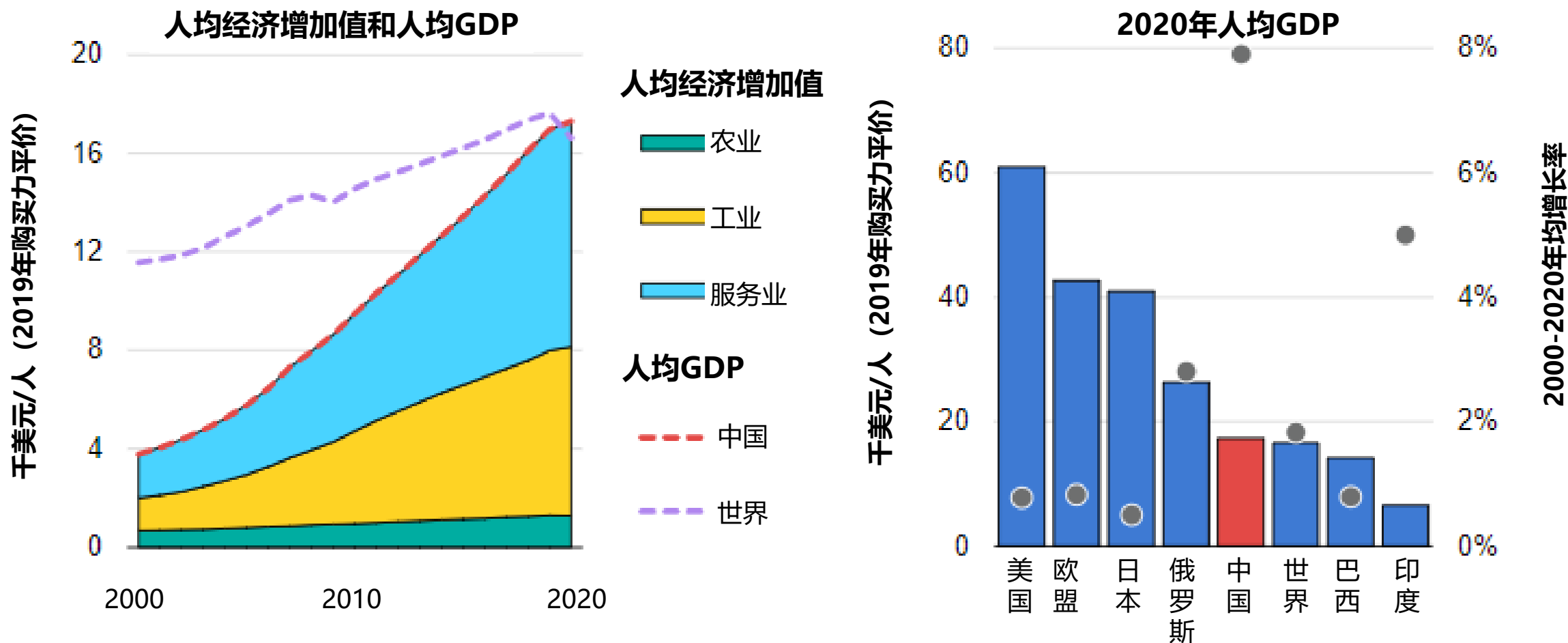
An Energy Sector
Roadmap to Carbon
Neutrality in China



中国碳中和愿景

1、中国已成为全球最大经济体，工业化和城市化是经济转型的主要动力

图9 中国和选定国家的经济发展指标



- ◆ 1980年以来，中国一直是世界上增长最快的经济体，GDP增加了30多倍。2020年，按购买力平价计算，中国已成为世界最大经济体。
- ◆ 工业化和城市化一直是中国经济转型的主要动力。按增加值计算，中国占全球工业总产值的1/4，生产了全球一半以上的水泥和钢铁。

2、能源生产和消费的快速增長是中國經濟增長的驅動力和結果

图10 中国一次能源需求 (单位: 艾焦)

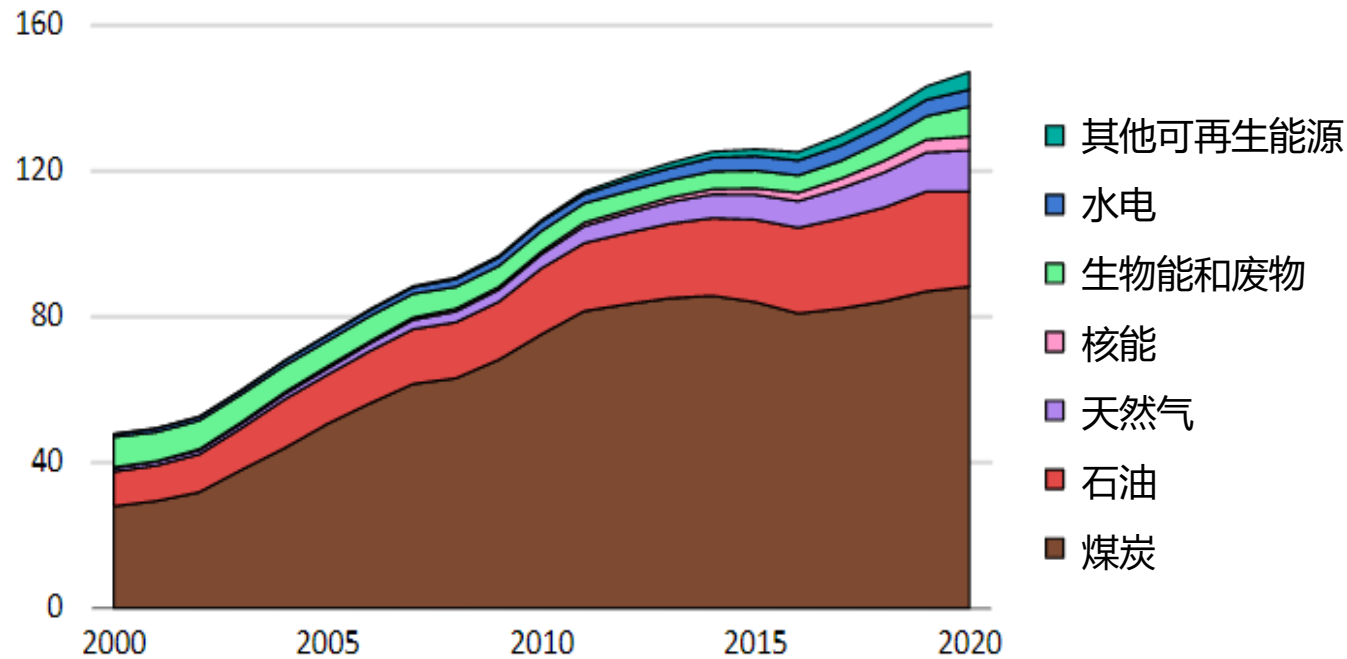
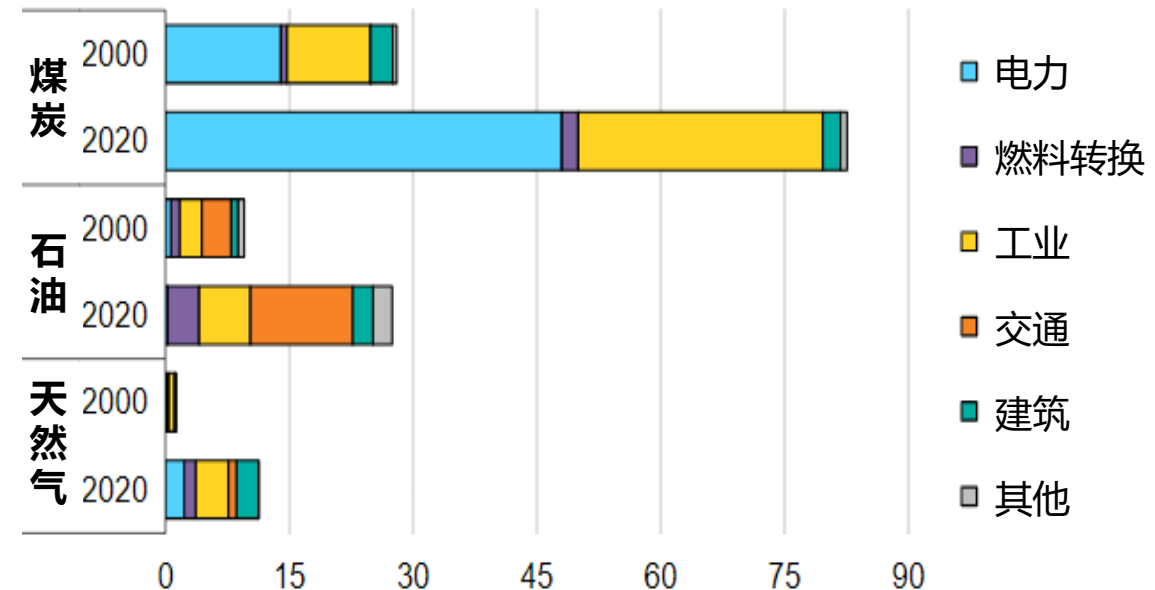


图11 中国化石能源消费 (单位: 艾焦)



- ◆ 中国在2009年成为全球最大能源消费国，近年来一次能源需求增长放缓，从2000-2010年的年增长8%降至2015-2020年的略高于3%。
- ◆ 尽管可再生能源和水电增长令人瞩目，但中国仍严重依赖化石燃料，2020年化石燃料占其一次能源需求的85%左右，仅煤炭就占近60%。
- ◆ 中国是全球最大煤炭消费国，也是太阳能、风能和电动汽车的最大市场。

3、中国是世界最大的温室气体排放国，约占全球排放量的四分之一

图12 2020年中国及其他地区 温室气体排放

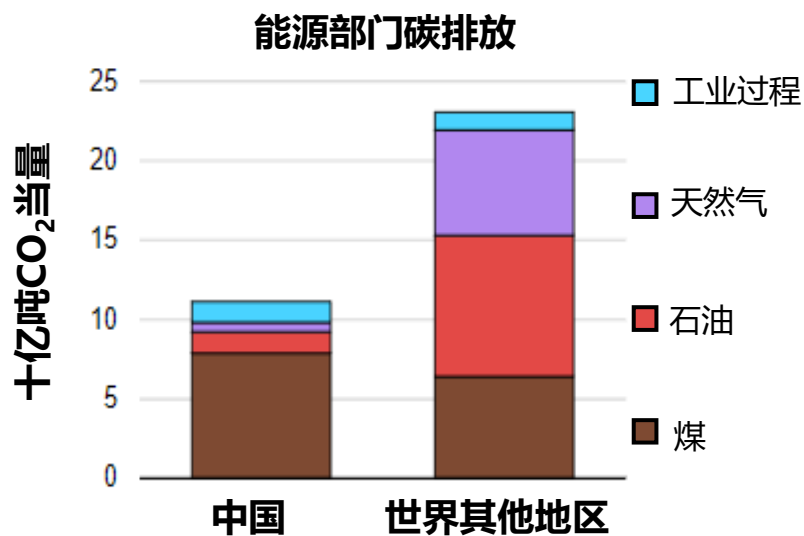
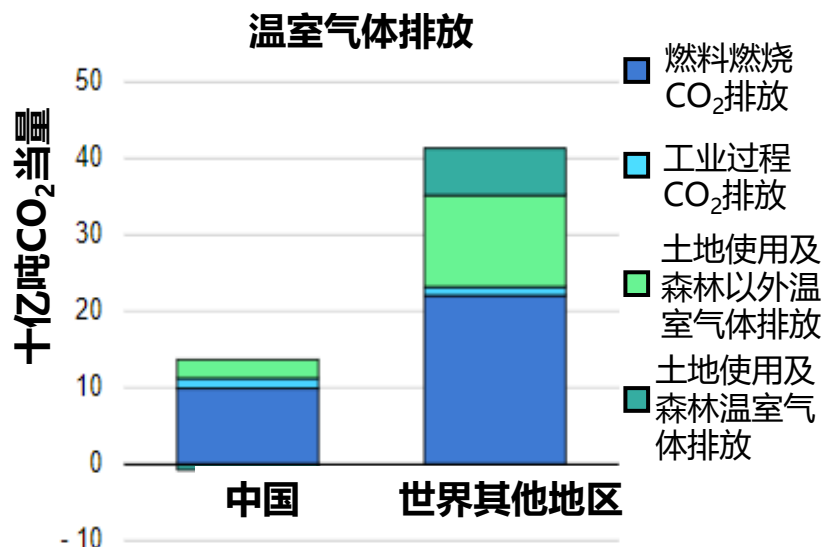
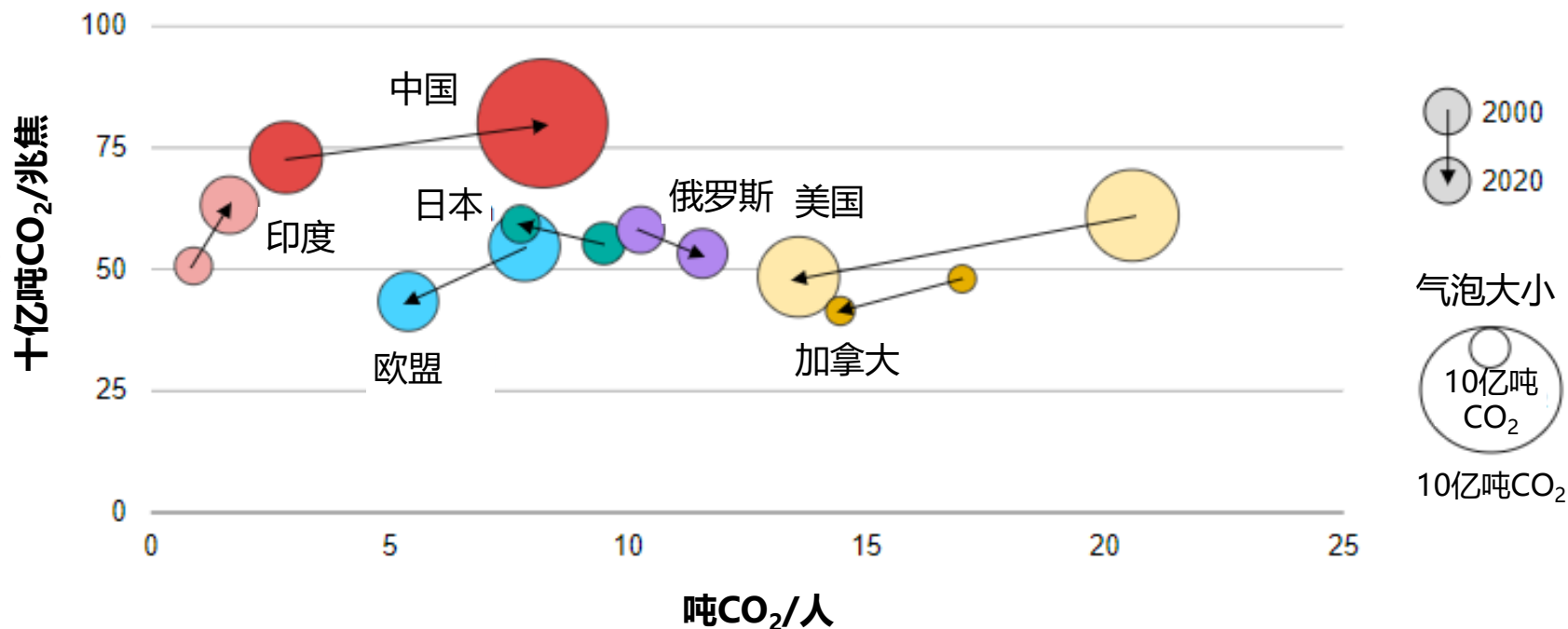


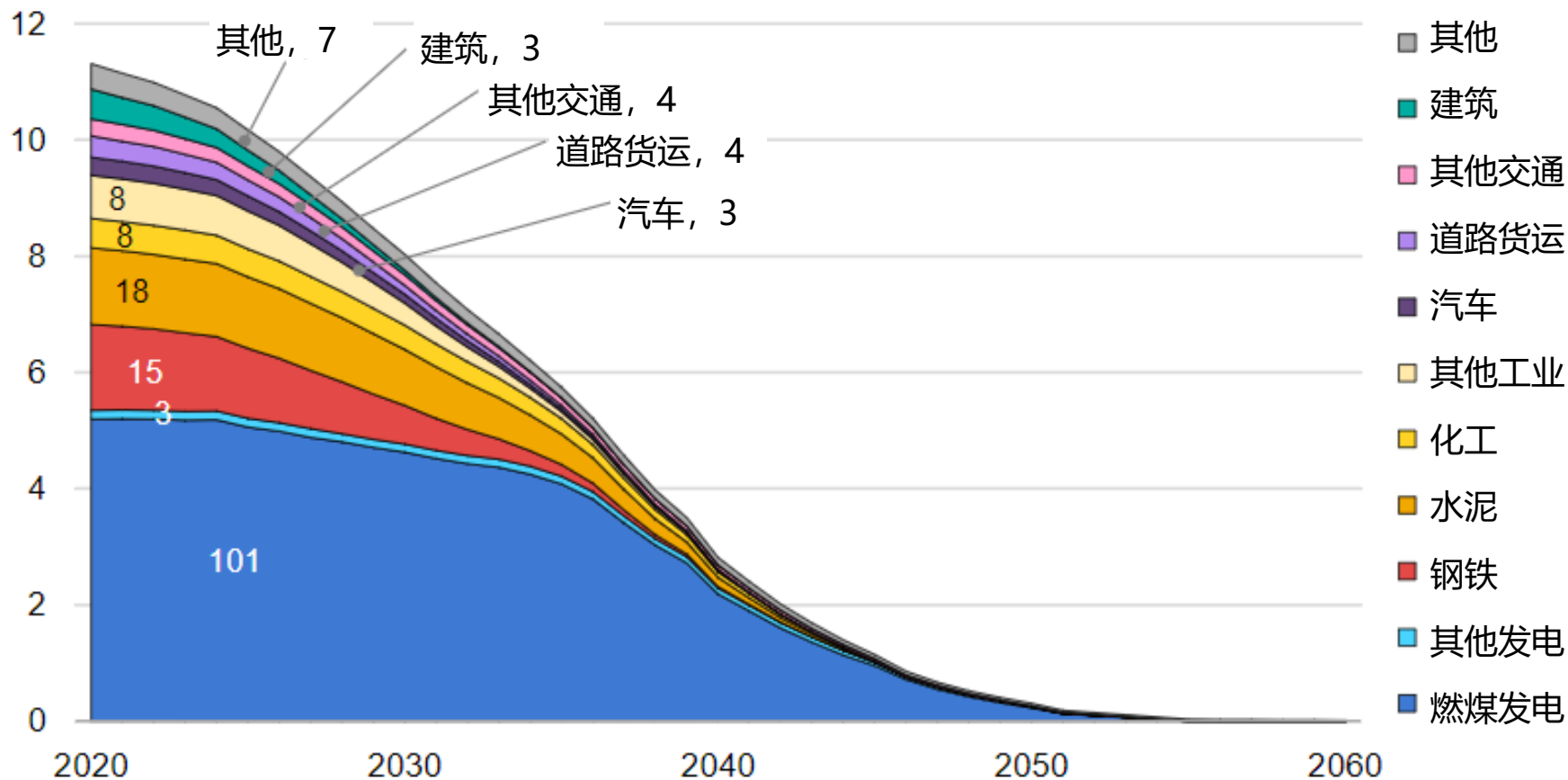
图13 2000和2020年不同国家/地区的一次能源消费碳强度及人均碳排放



- ◆ 中国占全球温室气体排放总量的1/4，大部分来自化石燃料燃烧。
- ◆ 2020年，中国燃料燃烧和工业过程的碳排放超过110亿吨，其中约90%来自燃料燃烧。
- ◆ 由于严重依赖化石燃料，中国一次能源使用的碳强度仍然很高，人均排放量则低于一些发达经济体。

4、到2050年现有未改造能源基础设施累计碳排放可能达到1750亿吨

图14 中国现有能源相关基础设施在典型寿命假设和运行条件下的碳排放量 (单位: 十亿吨CO₂)



- ◆ 如果中国现有的排放密集型基础设施继续以近年来相同方式运行，到2050年可能将产生1750亿吨的累计二氧化碳排放。如果要全球温度升幅限制在1.5°C，这一累计排放相当于全球剩余排放预算的三分之一。
- ◆ ATS情景避免了到2060年APS情景中约200亿吨的“锁定”排放。这些排放来自于2030年之前的电力和工业部门投建的长寿命资产。

5、中国实现碳中和目标面临诸多挑战

- ◆ **与发达国家相比，中国承诺从碳达峰到碳中和的时间更短。** 法国、德国和英国在1970年代就实现了能源相关碳排放峰值，美国、意大利和日本也分别在2000年、2005年和2013年实现。
- ◆ **经济繁荣程度是碳达峰的关键因素，在经济和能源服务需求不断增长的时期实现排放峰值需要付出相当大的努力。** 从历史上看，法、德、英等国在1970年代达峰时人均GDP在2.2-3万美元（按2019年购买力平价），美、韩、日等国碳达峰时人均GDP约为4万美元，而中国2020年人均GDP接近1.75万美元。然而，中国经济仍在强劲增长，近五年年均增速接近6%，而法、德、英在1970年代后期仅增长约3%。
- ◆ **重工业在中国的重要性使实现碳中和更为困难。** 2020年，工业部门占中国能源相关碳排放的36%。钢铁、水泥等碳密集型行业很少有商业可行的低碳替代技术。进一步提高服务业比重，降低高能耗产业比重，支持产业低碳解决方案创新和降低成本，将促进中国能源系统的脱碳。
- ◆ **交通部门应成为控制排放措施的重点。** 交通运输占2020年中国能源相关碳排放的8%。过去20年，公路运输的石油和天然气使用量年均增长超过7%，航空业的石油需求年均增速超过9%。
- ◆ **尽管过去30年已经将建筑的平均能源强度降低40%以上，但建筑能耗一直在快速增长。** 现有建筑仍有较长寿命，到2050年近一半的现存建筑仍在使用的，降低其能耗和进行低碳改造极为重要。
- ◆ **中国在发电和供热方面严重依赖化石燃料。** 2020年，煤炭占中国能源相关碳排放的近50%，逐步淘汰火电应成为实现“双碳”目标的核心。

6、“十四五”规划是中国实现碳中和的重要政策工具

- ◆ **实现中国碳中和目标对于应对气候变化至关重要。** 到本世纪末，可为全球平均温度降低贡献近0.2°C。这要求中国比大多数其他国家更快地从峰值达到净零排放。
- ◆ 在能源安全、经济发展、空气质量和气候因素推动下，**能效和可再生能源是近20年中国能源政策的核心。**
- ◆ **中国将碳中和目标视为推动中国转变发展模式的催化剂。** 通过实现碳中和，促使中国转向更高质量和更可持续的经济增长，以确保生态环境和人民健康。
- ◆ **“十四五”将是中国实现碳中和目标的关键时期。** 中国政府为主要空气污染物设定了减排目标，并确定了行动重点，包括推动更清洁的制造工艺、更清洁和高效的能源使用、发展更绿色的交通系统以及促进污染防治的区域协调。除了在减轻污染方面非常有效之外，还有助于提高能源使用效率，并鼓励向清洁能源转型，以实现经济、能源安全和气候目标。

iea

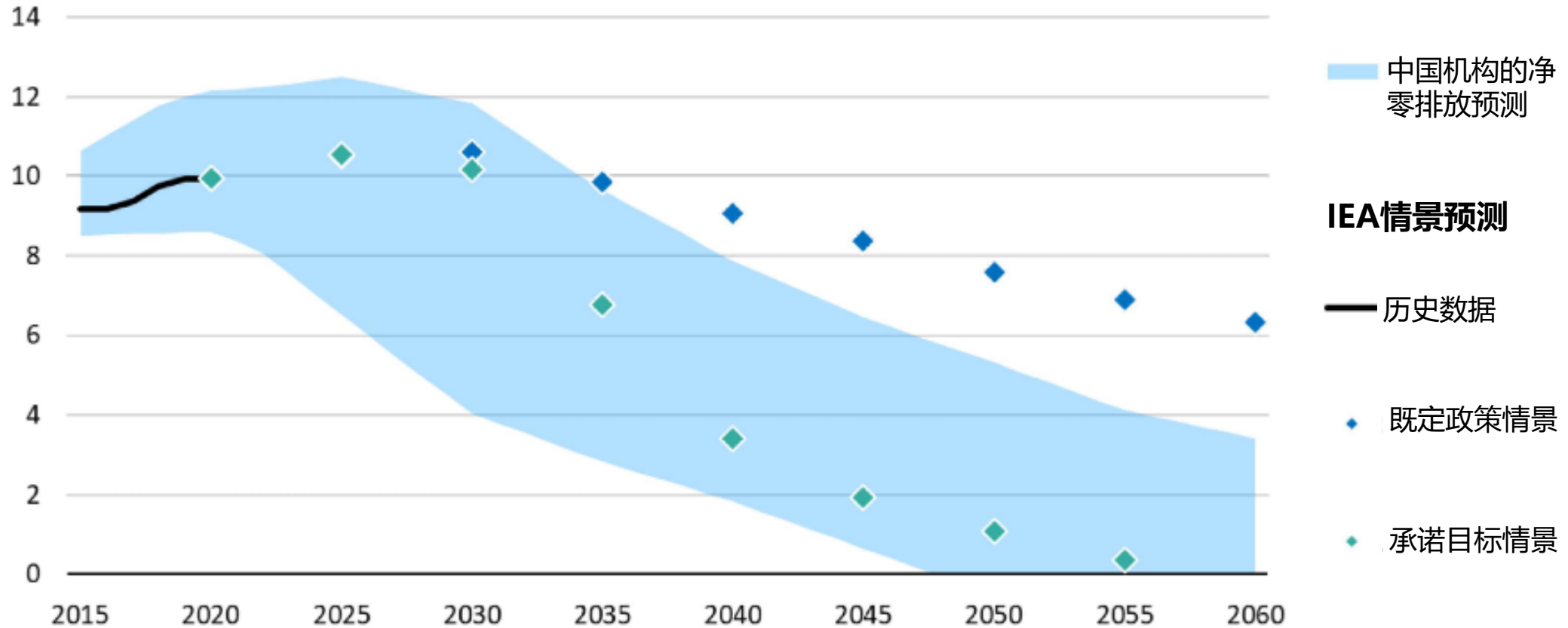
An Energy Sector
Roadmap to Carbon
Neutrality in China



中国能源系统转型

1、在承诺目标情景下中国将在2030年以后大幅降低碳排放

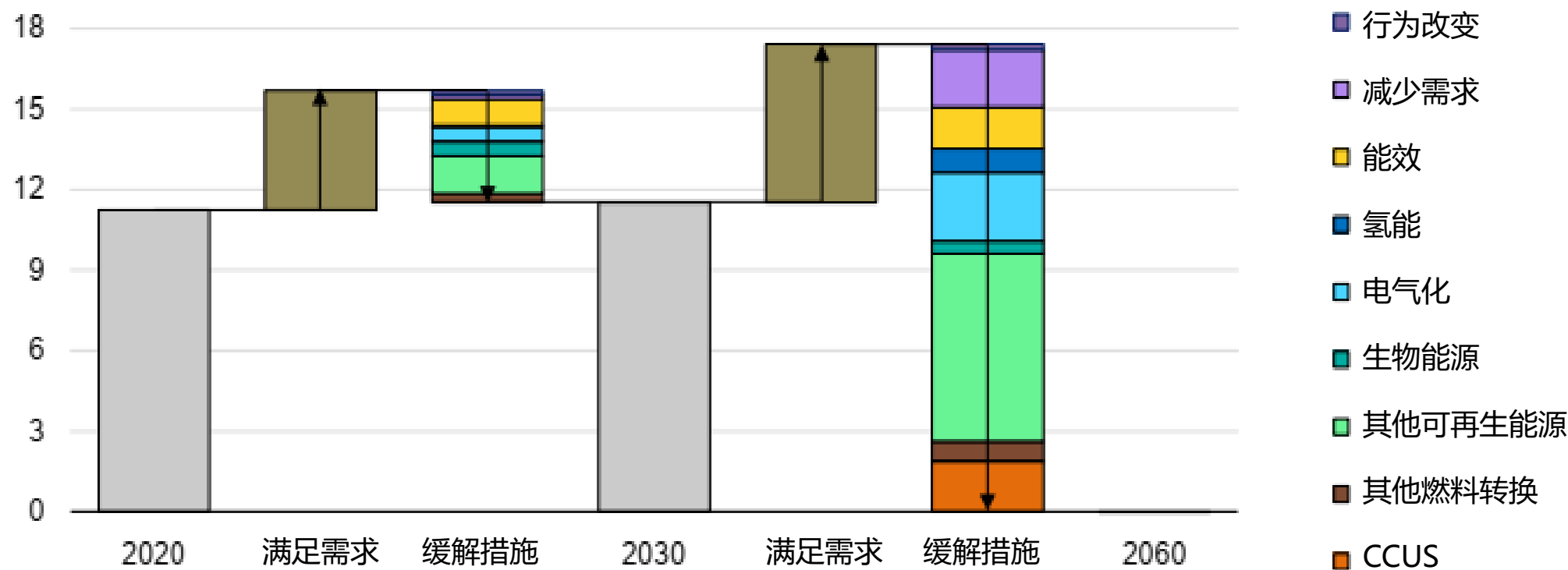
图15 2015-2060年中国能源相关碳排放（单位：十亿吨CO₂）



- ◆ 在既定政策情景（STEPS）下，碳排放将在2030年之前达峰，并温和下降到2060年，达到60亿吨，比2020年降低35%以上。
- ◆ 在承诺目标情景（APS）下，碳排放将在2020年后迅速下降，到2060年达到净零。
- ◆ 2021-2060年，在STEPS情景下的累计碳排放将达到4000亿吨，比APS情景高出约80%。

2、不同减排技术将在不同阶段发挥减排作用

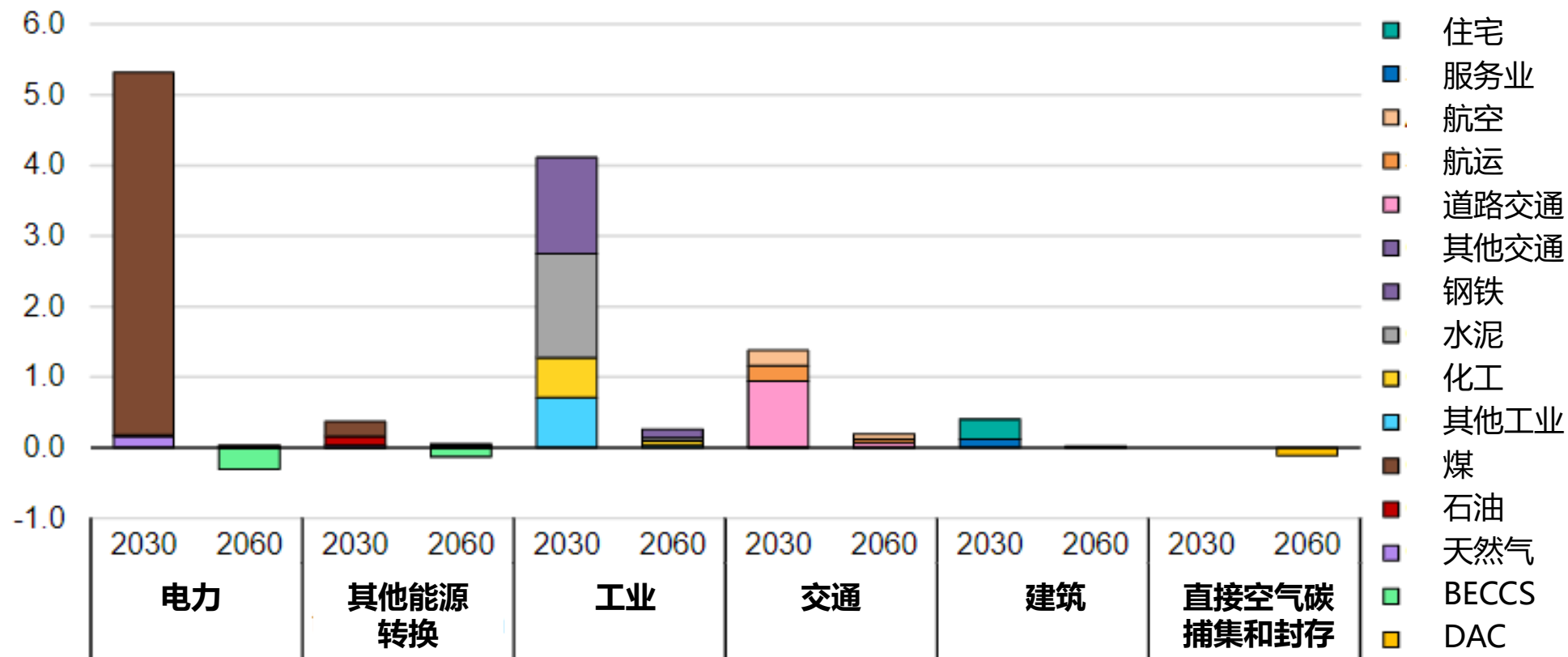
图16 APS情景下采用不同措施对中国能源体系碳减排的贡献作用（单位：十亿吨CO₂）



- ◆ 到2030年，能效、太阳能光伏和风能将为能源部门碳减排做出60%的贡献。
- ◆ 到2060年，电气化（13%）、CCUS（8%）、氢能（3%）、行为改变（12%）和生物能源（7%）将在碳减排方面发挥更大作用。
- ◆ 到2060年能源部门剩余碳排放有6.1亿吨，主要来自于难以减排的重工业和长途运输行业，这些排放将被结合碳捕集的生物能源（BECCS）和直接空气碳捕集（DAC）技术的负排放抵消。

3、不同部门实现净零排放的进展速度有所不同

图17 APS情景下不同部门、行业及燃料的碳减排情况（单位：十亿吨CO₂）



- ◆ 许多清洁发电技术目前已经上市并快速部署，预计电力部门到2055年之前将完全脱碳。
- ◆ 其他部门的大多数低碳技术仍在开发中，部署较晚。预计到2060年，乘用车和建筑部门将完全脱碳，长途运输方式（重型车辆、航空和海运）到2060年排放量将下降60%，重工业（主要是化工、钢铁和水泥）排放将减少94%。

4、尽管经济活动大幅增加，到2060年中国一次能源需求将下降26%

表1 APS情景下中国一次能源需求 (单位: 艾焦)

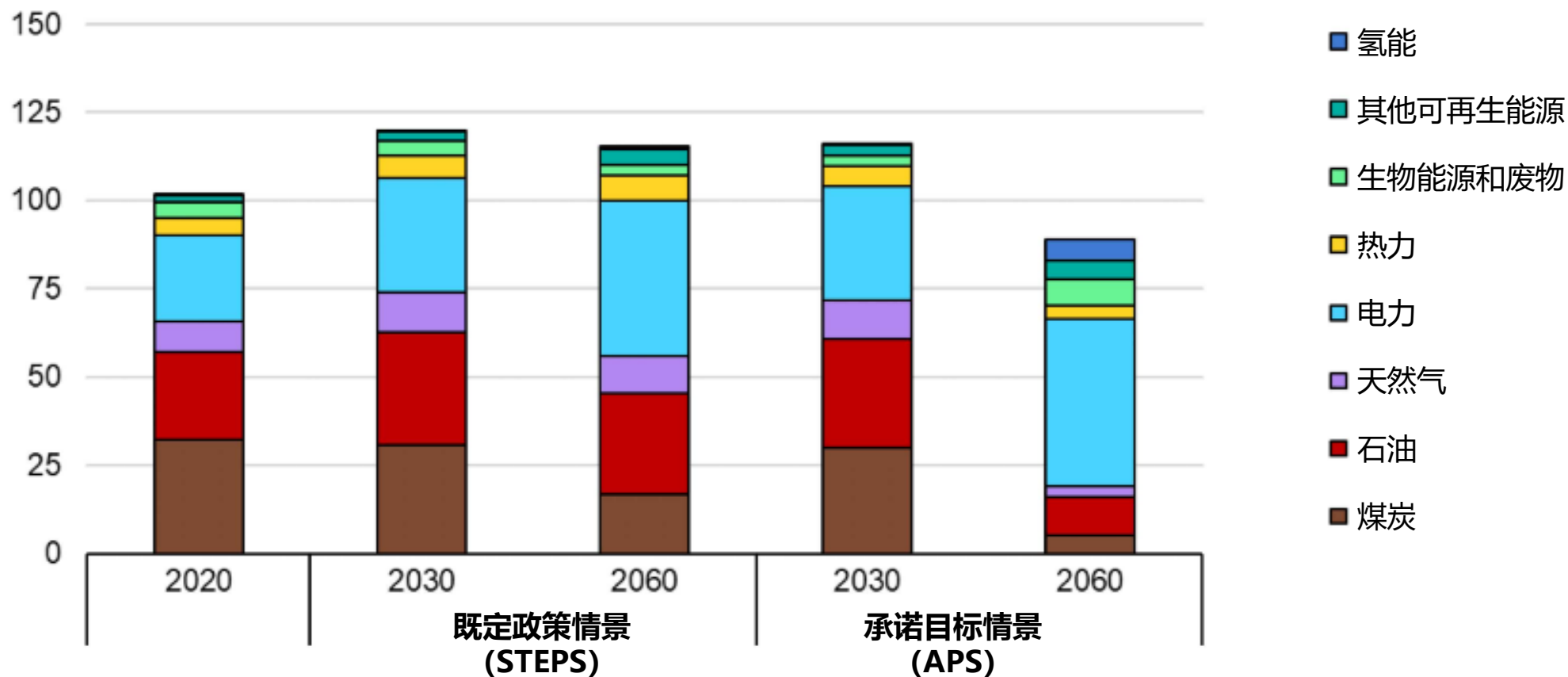
	2020年	2030年	2060年
煤炭	87	86	16
石油	26	32	11
天然气	12	15	7
核能	4	7	19
可再生能源	18	32	76
水能	5	5	7
现代生物能源和废物	4	11	16
传统生物质	3	0	0
太阳能	3	10	33
风能	2	4	16
其他可再生能源	1	1	3
总计	147	173	129
非化石燃料占比*	15%	23%	74%
非化石燃料占比 (PS法) **	16%	26%	80%
能源相关净CO ₂ 排放 (十亿吨)	11	11	0

*使用IEA方法计算; **使用中国统计局使用的部分替代 (PS) 方法计算。
备注: 能源部门碳排放包含化石燃料燃烧以及工业过程排放。

- ◆ 到2030年, 中国一次能源需求将增长18%, 但其增速将远远低于整体经济的增速。
- ◆ 到2060年, 尽管经济活动增加了一倍多, 一次能源需求将下降26%。主要原因是能效大幅提高, 以及产业转型从重工业转向能源强度较低的经济活动。
- ◆ 低碳能源在一次能源需求占比将从当前的15%增至2060年的74%。太阳能将在2045年左右将成为最主要的一次能源来源, 到2060年其占比将达到1/4左右。
- ◆ 化石能源消费将迅速下降, 到2060年煤炭需求将下降80%以上, 石油需求下降约60%, 天然气下降45%以上; 大部分化石燃料将与碳捕集、利用与封存 (CCUS) 结合使用。

5、能源和材料效率提升以及经济结构性变化将使终端能源消费稳步下降

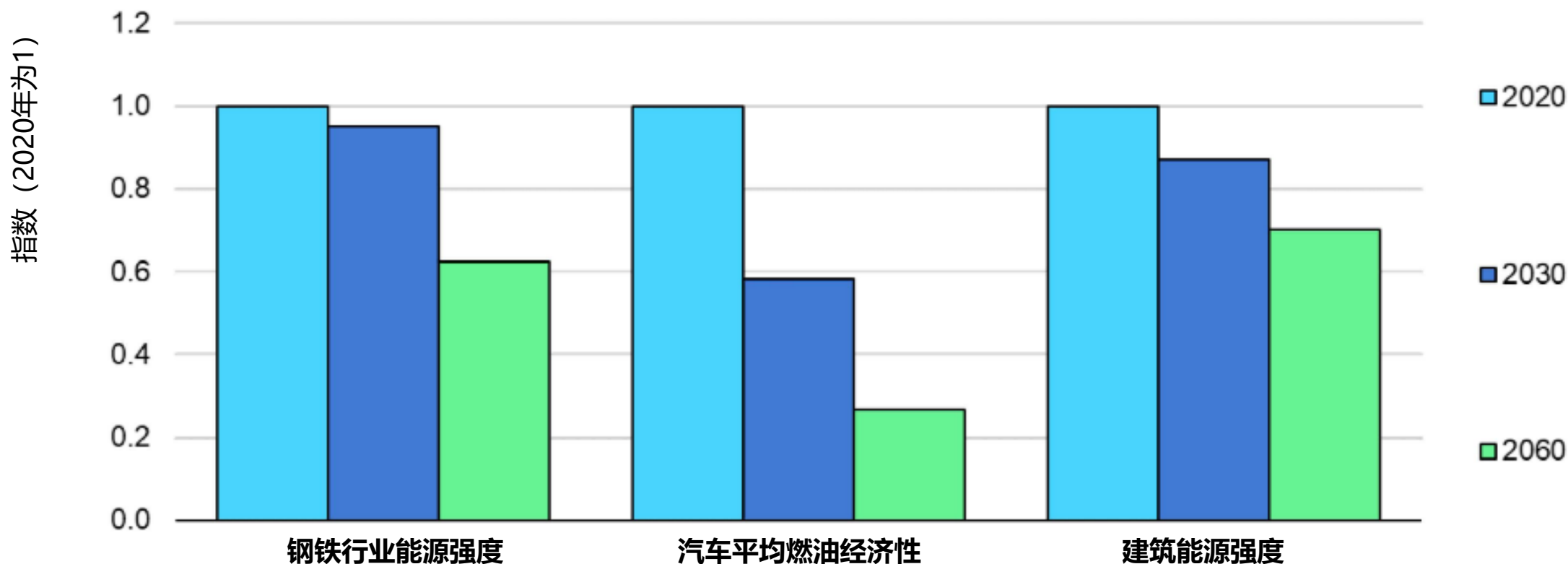
图18 到2060年按燃料和部门划分的中国终端能源消费情况（单位：艾焦）



- ◆ 在APS情景下，随着能源和材料效率的提高以及经济结构性转型，中国终端能源消费将在2020年代初期温和增加，然后到2060年稳步下降约15%，比STEPS情景低约1/4。
- ◆ 电力消费增长幅度最大，到2060年几乎翻一番；其次是氢，以低碳氢为原料的合成液体燃料将在2030年上半年用于航空，到2060年将满足26%的航空燃料需求。
- ◆ 煤炭需求降幅最大，在2020年至2060年将下降近85%。

6、所有终端用能部门的能效都将极大改善

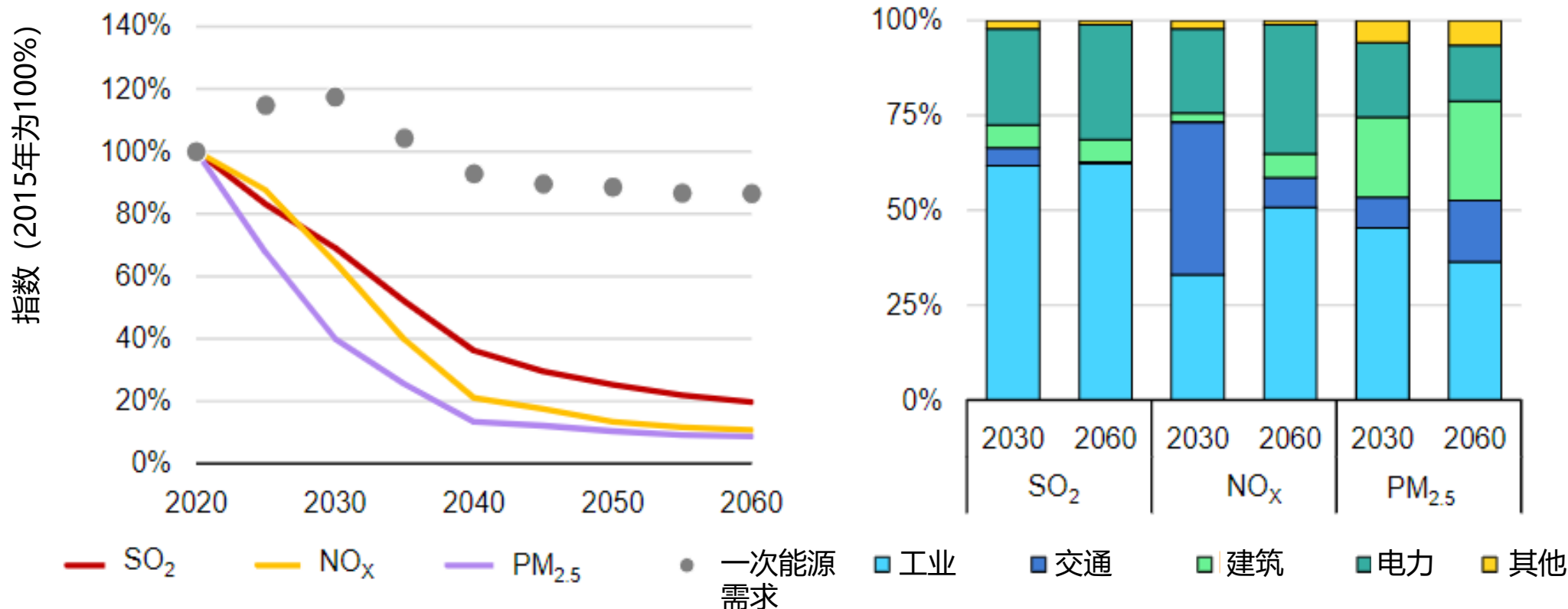
图19 APS情景下中国部分能效指标



- ◆ 工业方面，在2020-2060年间，由于采用最先进技术改进了能效，生产熟料（水泥的主要成分）的全国平均热强度将下降15%；钢铁生产的平均能源强度将下降40%。
- ◆ 交通方面，由于电气化、提高内燃机效率、改进设计和材料，轻型汽车每公里能耗将在2020-2030年下降4%/年，在2030-2060年下降1.8%/年；卡车到2030年燃油经济性将每年提升2.3%，此后每年提升0.5%。
- ◆ 建筑方面，2020-2030年单位建筑面积能耗将以1.4%的年均速度下降，此后到2060年将每年下降0.7%。

7、能源转型将带来环境协同效益

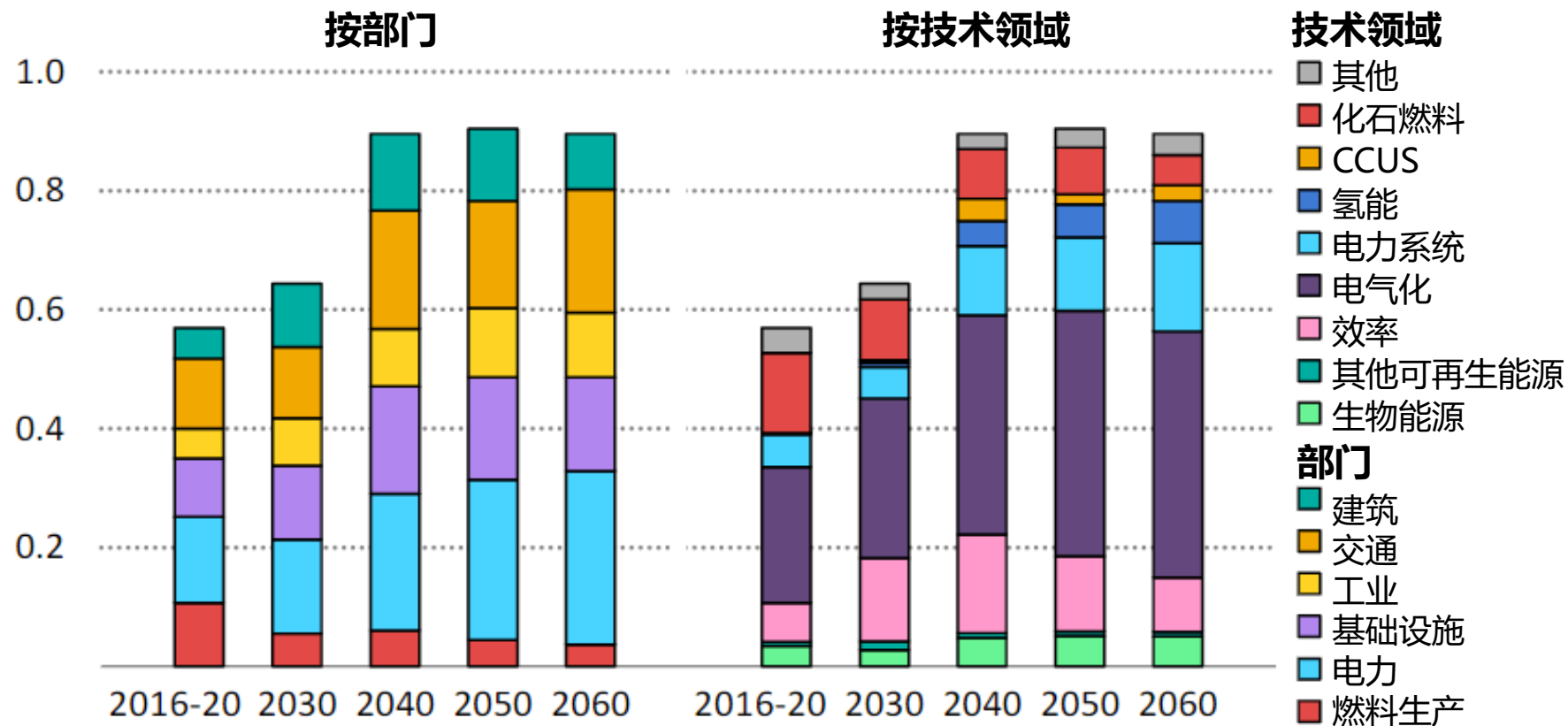
图20 APS情景下按类型和部门划分的中国空气污染物排放



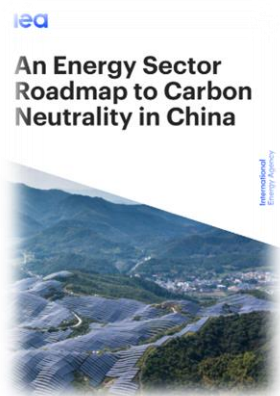
- ◆ 随着化石能源的逐步淘汰和严格的空气污染标准生效，所有主要污染物的排放均将大幅下降，空气质量将迅速改善。
- ◆ 预计到2030年，颗粒物（PM_{2.5}）将下降至当前水平的40%左右，到2060年则将降至当前水平的9%。
- ◆ 到2030年，氮氧化物（NO_x）排放将下降35%，二氧化硫（SO₂）排放将下降30%；到2060年，两者分别下降90%和80%。

8、中国完全有能力提供实现碳中和目标所需的投资水平

图21 APS情景下按部门和技术划分的中国年度能源相关投资（单位：万亿美元）



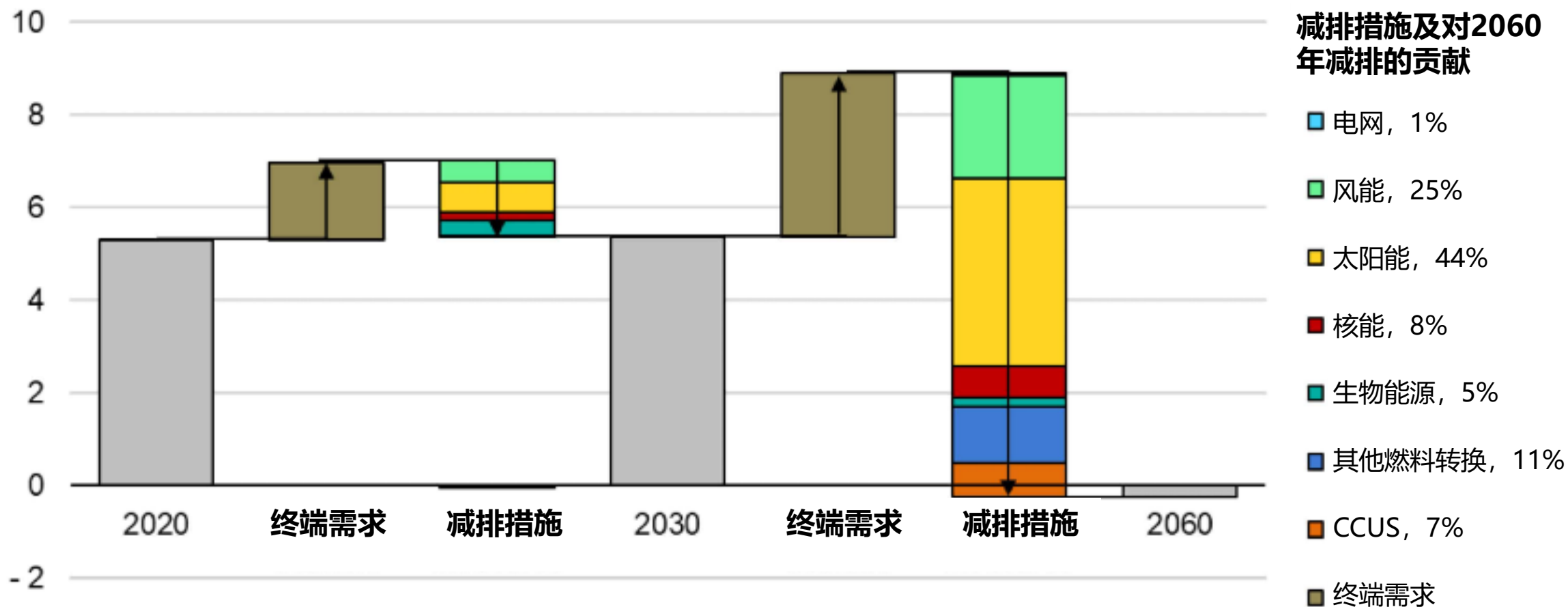
- ◆ 实现碳中和所需的清洁能源转型将需要持续大量增加能源相关投资。虽然投资总额将大幅攀升，但其在整个经济活动中的比重却会下降。
- ◆ 预计到2030年，能源相关年度投资总额将达到6400亿美元，比2016-2020年的平均水平高出10%以上；到2060年将达到近9000亿美元。
- ◆ 年度能源投资占GDP的比重在2016-2020年平均为2.5%，到2060年将下降到只有1.1%。



◆ 实现碳中和的部门路径

1、尽管发电量增长130%，中国电力部门将在2050年前实现净零排放

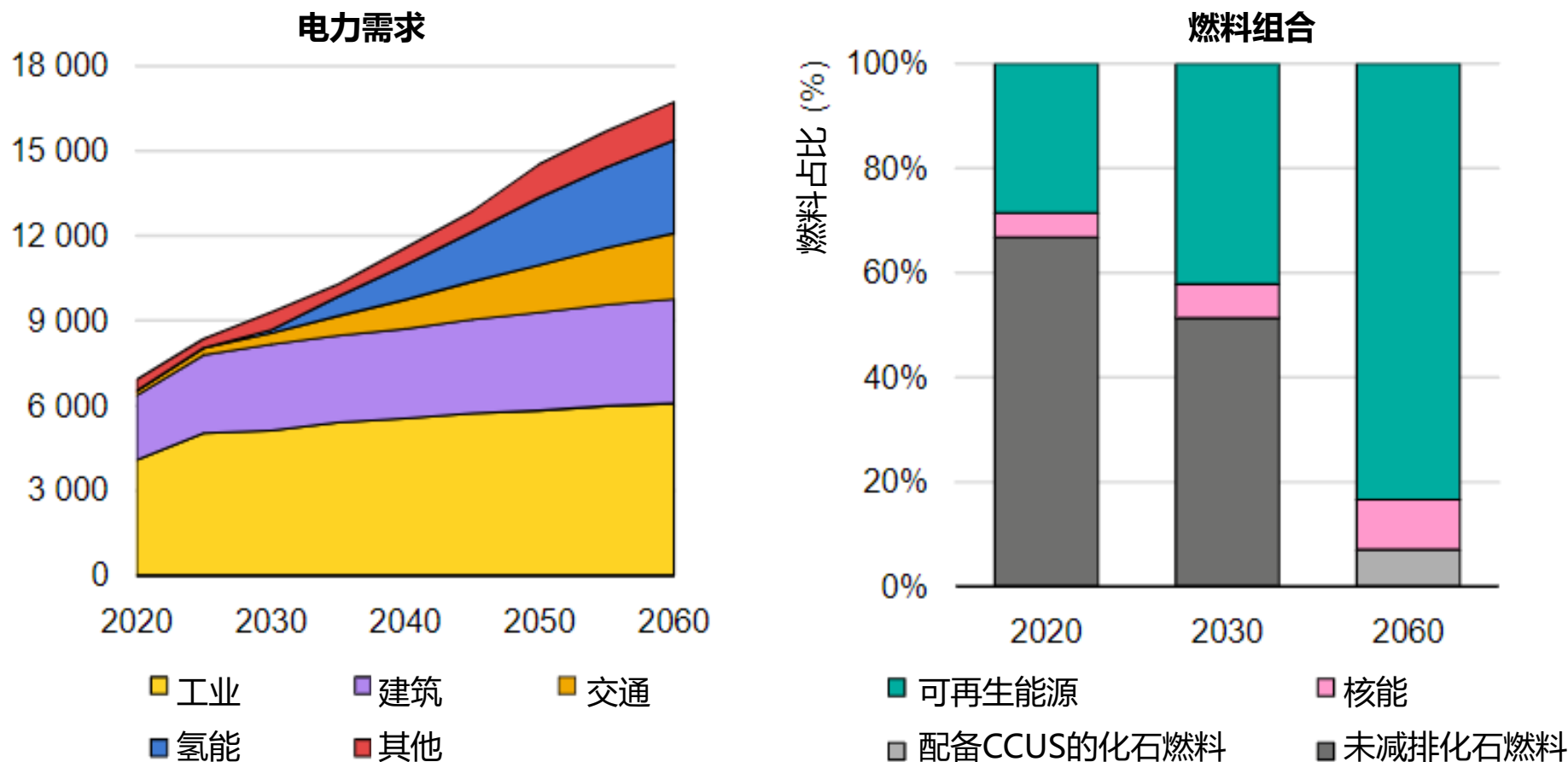
图22 APS情景下中国电力碳减排的驱动因素（单位：十亿吨CO₂）



- ◆ 由于发展可再生能源和逐步淘汰煤电，中国电力部门碳排放将在2025年左右达到峰值（56亿吨），然后在2055年成为首个实现净零排放的部门，并在2060年达到轻微负排放。
- ◆ 在2020年代，中国电力碳强度年均将下降3%；2030-2050年期间碳排放则将每年下降2.6亿吨。

2、电力需求将快速增长，可再生能源将取代化石燃料

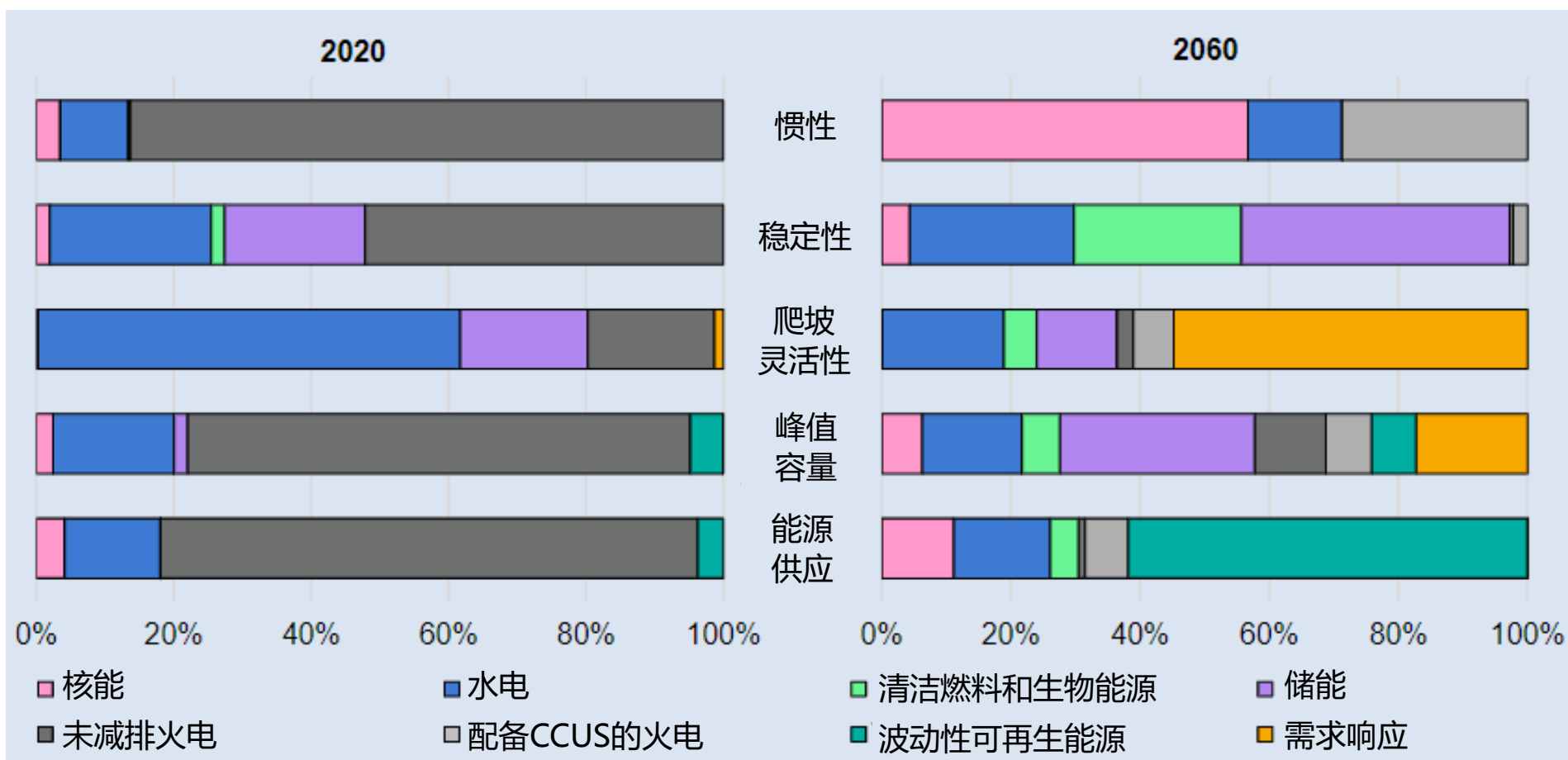
图23 APS情景下中国不同部门电力需求（单位：太瓦时）和不同燃料在发电结构的占比（单位：%）



- ◆ 预计到2060年，中国发电量将增加130%，其在终端能源需求中占比将翻一番，达到50%以上。
- ◆ 可再生能源发电（主要是风能和太阳能光伏）在2020年至2060年间将增加近7倍，届时将占发电总量约80%。到2060年，所有地区的可再生能源装机容量至少增加三倍。
- ◆ 煤电的份额将从超过60%下降到仅有5%，而未采用减排技术的燃煤发电将于2050年淘汰。

3、可再生能源占比增长将需要提高电力系统灵活性

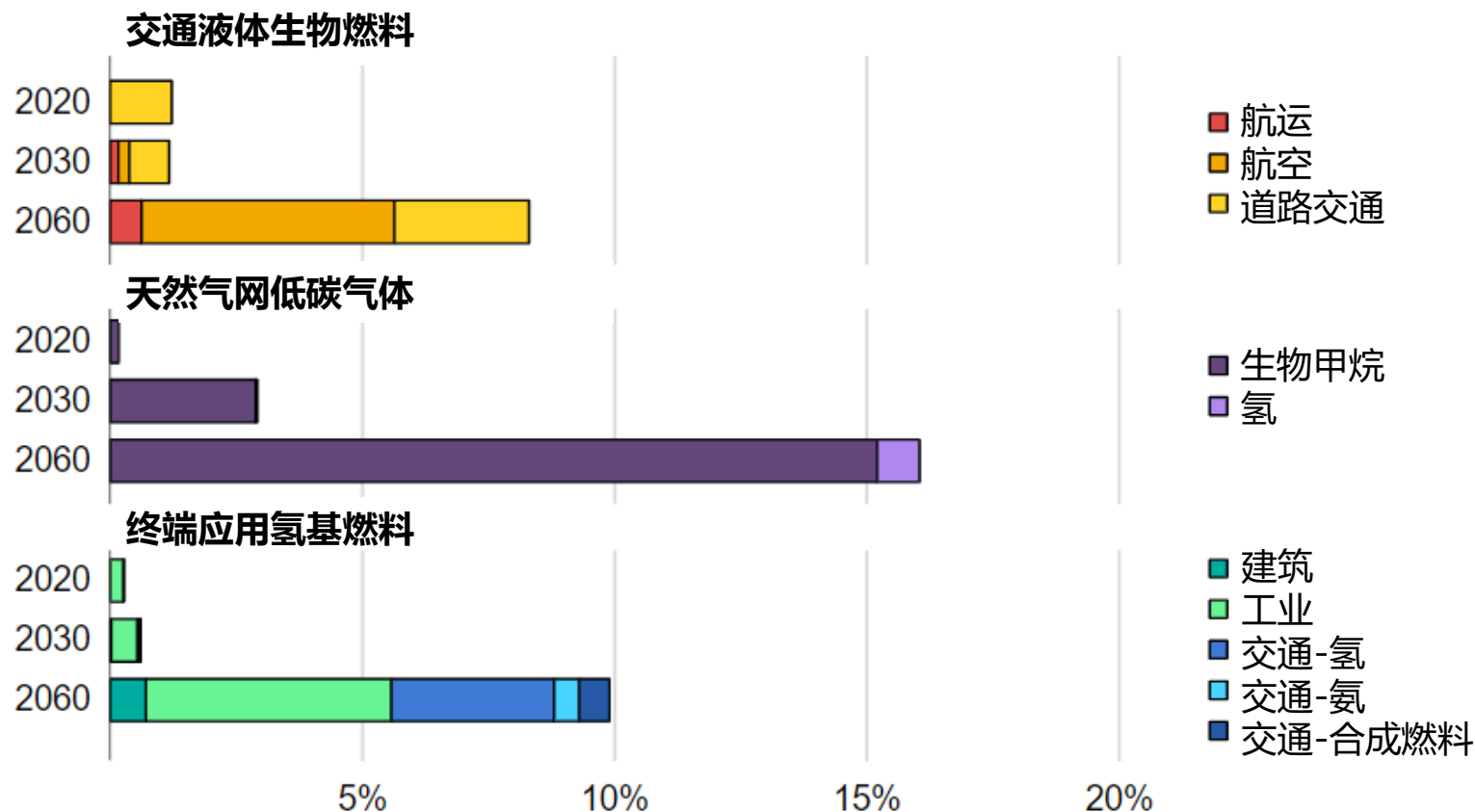
图24 APS情景下中国电力系统灵活性来源



- ◆ 电力系统的灵活性来源将发生根本性变化。
- ◆ 目前，几乎所有满足峰值负荷的灵活性都由化石燃料和水力发电满足。到2060年，储能将提供35%的灵活容量，水电等可调度可再生能源和需求响应将分别提供24%和5%。

4、氢及氢基燃料、生物燃料等低碳燃料不可或缺

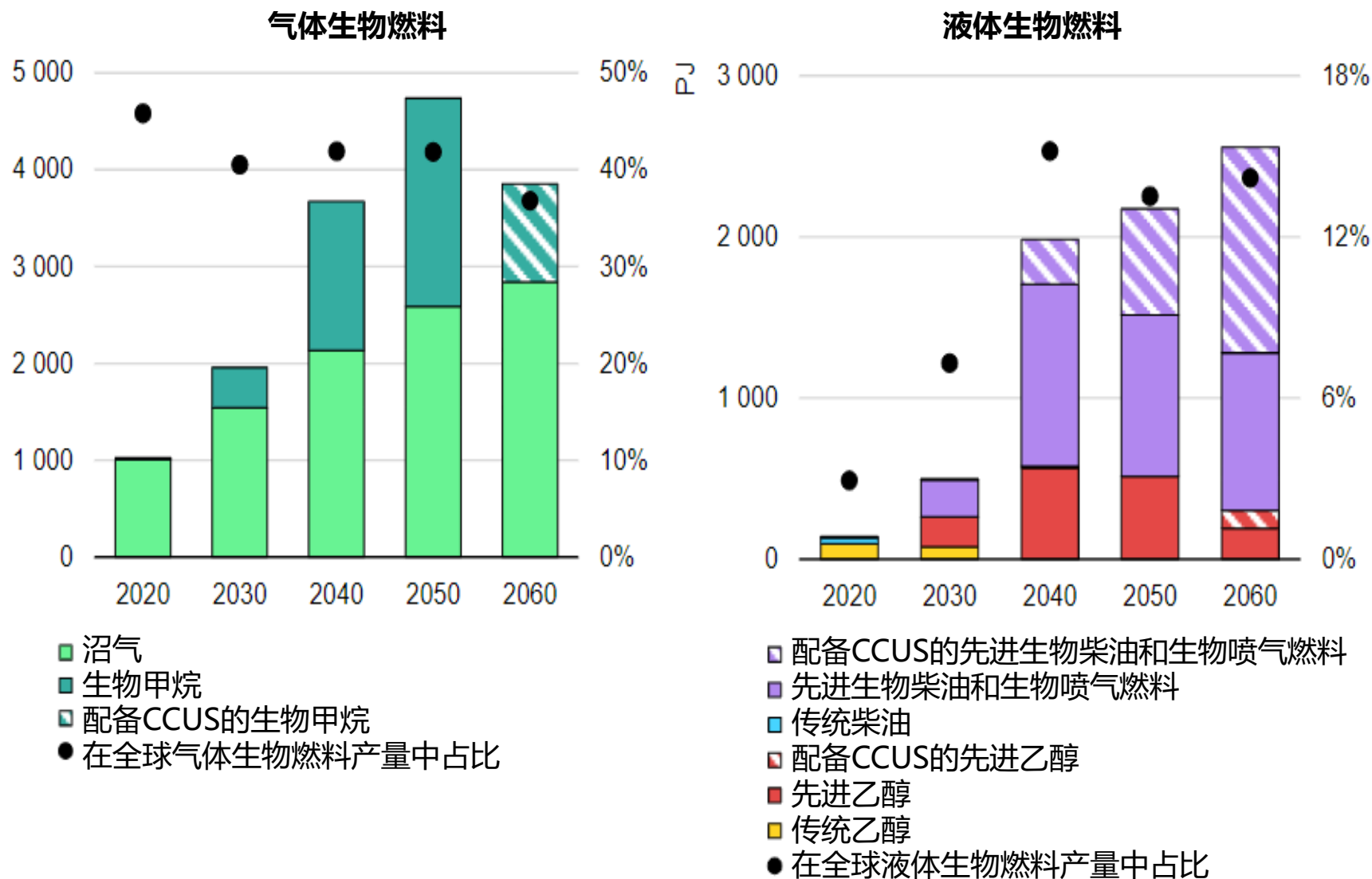
图25 APS情景下按部门和燃料划分的中国低碳燃料供应情况（单位：%）



- ◆ 目前，低碳燃料仅占中国终端能源需求不到1%，主要是生物燃料。到2030年低碳燃料占比将超过1%，到2060年增至9%。
- ◆ 液体生物燃料在2060年将满足9%的交通能源需求；低碳氢和氢基燃料在终端能源消费总量中的占比将达到近10%；低碳气体（生物甲烷和氢气）将占网络供应天然气需求的近15%。
- ◆ 中国将成为全球低碳气体生产的领导者，到2060年氢气和生物甲烷产量占比均将超过30%；中国也是沼气和生物甲烷生产的世界领先者，到2060年将占全球产量的35%左右。

5、中国将保持沼气生产全球领先，并成为喷气燃料主要生产国

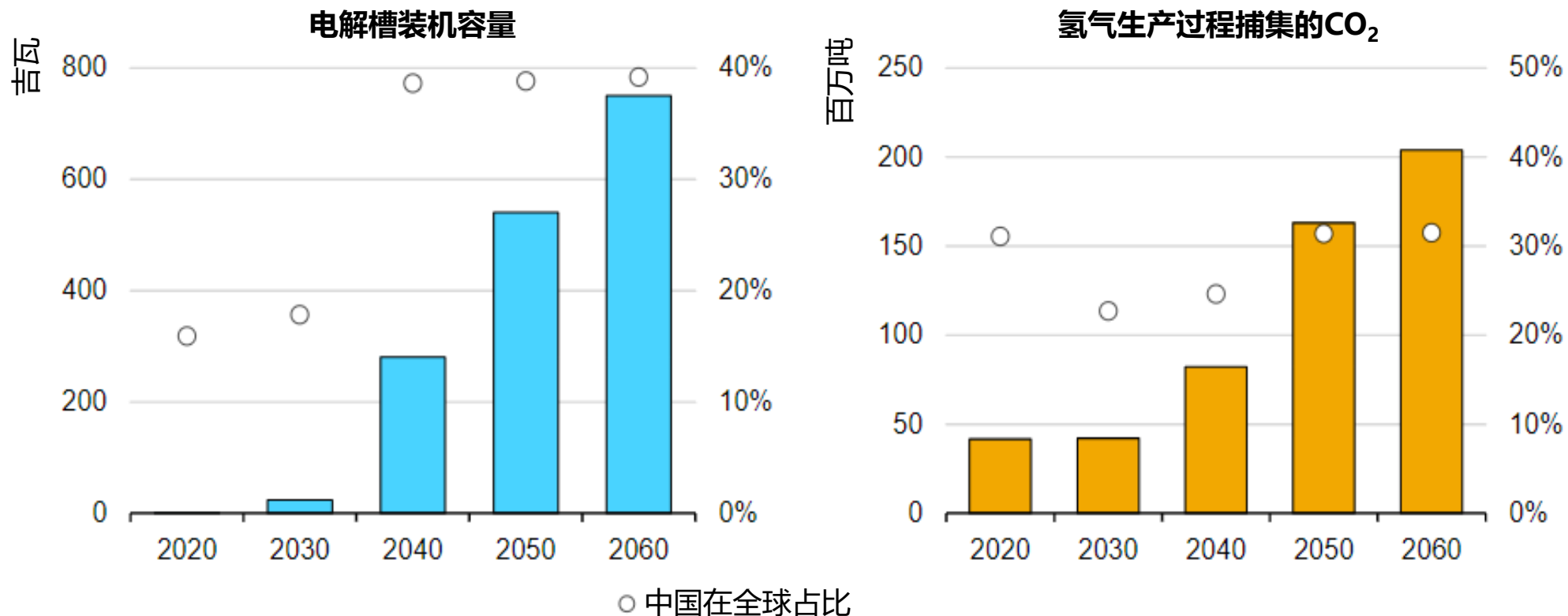
图26 APS情景下中国生物燃料生产情况（单位：拍焦）



- ◆ 2020年，中国几乎占全球沼气产量的一半。预计到2030年，中国沼气和生物甲烷产量将翻一番，到2060年将增加2倍多。
- ◆ 向天然气管网中注入生物甲烷占天然气总供应量的比例将从2020年几乎为零增加到2030年的近3%和2060年的15%。
- ◆ 当前，液体生物燃料、生物柴油的应用仍然较少，2030年后将受到先进技术的驱动大幅增长，产量从2020年的112拍焦增长至2030年的500拍焦和2060年的2600拍焦。先进燃料占比将从2020年的不足6%增长至2060年接近100%。
- ◆ 2040年以后，液体生物燃料将越来越多用于航空，中国成为仅次于美国的第二大生物喷气燃料生产国，到2060年可满足国内40%的航空燃料需求。

6、电解制氢产量将大幅增长，占2060年氢气总产量的80%

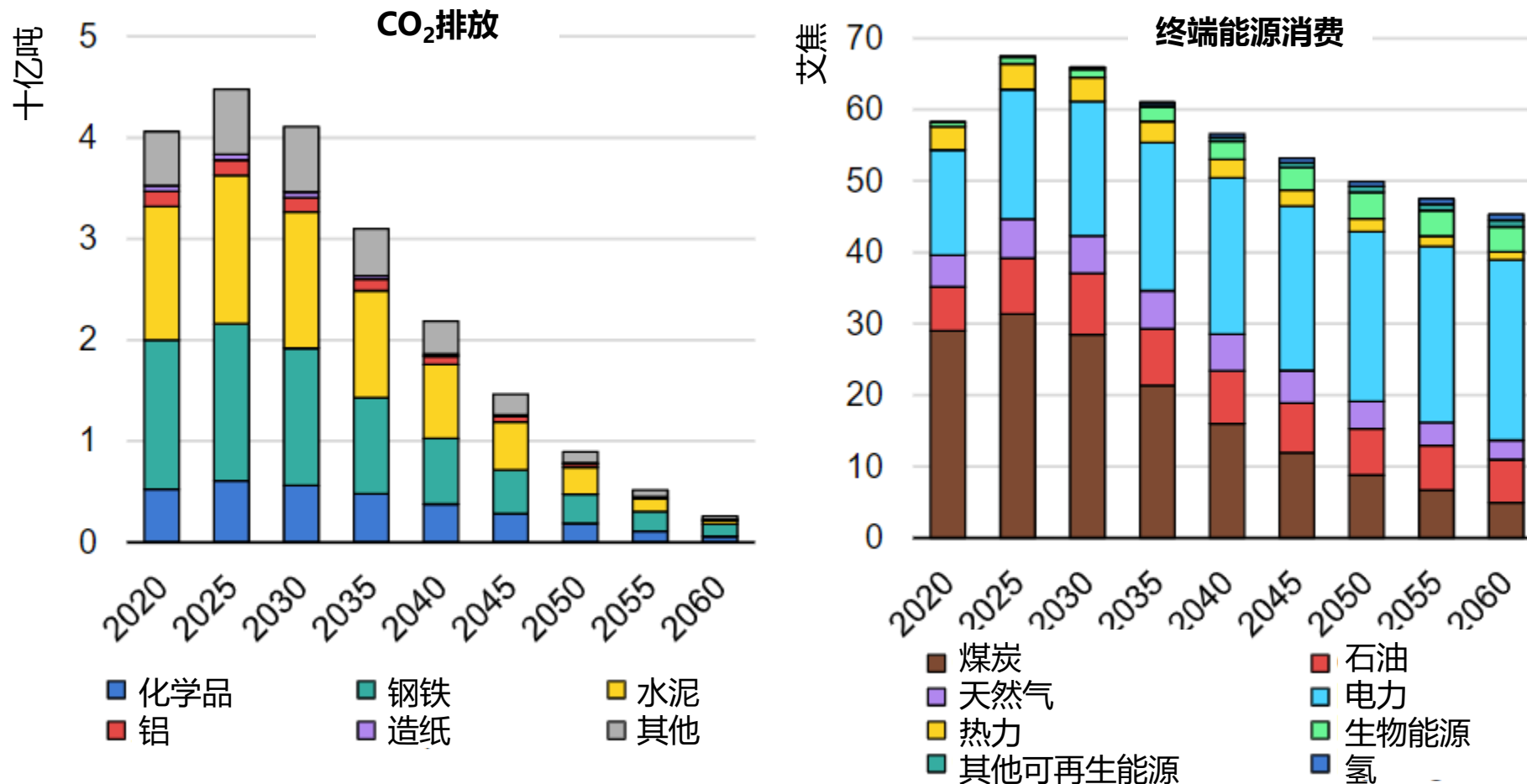
图27 APS情景下中国电解槽装机容量（单位：吉瓦）和氢气生产过程捕集的CO₂（单位：百万吨）



- ◆ 2020年，中国氢气需求量约为2500万吨，主要基于煤气化等化石燃料生产，直接排放约3.6亿吨CO₂。
- ◆ 到2030年，中国氢气生产量和消费量将缓慢增长至3100万吨，到2060年将增至9000万吨，低碳氢和氢基燃料在终端能源消费总量中的占比将达到近10%。
- ◆ 氢气产量的增量将主要基于低碳技术。到2060年，电解制氢产量将从当前的几千吨增加到7000多万吨，占氢气总产量的80%，配备CCUS的煤和天然气制氢则分别占9%和7%。预计到2030年中国制氢电解槽容量将从当前不到100兆瓦增加至接近25吉瓦，到2060年将达到750吉瓦，其增量将占全球新增容量的近40%。到2060年制氢过程将捕集超过2亿吨CO₂。

7、由于煤炭用量下降和电力消费翻番，到2060年工业碳排放将下降94%

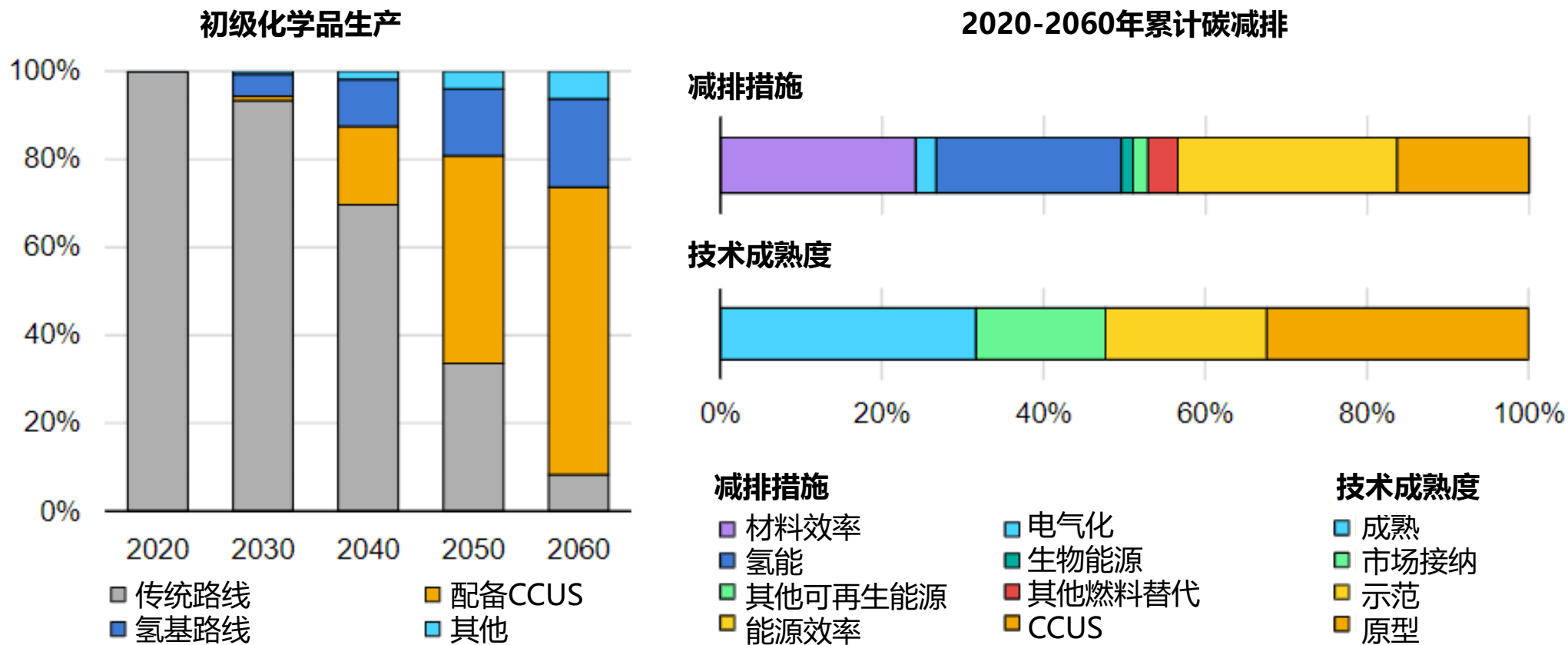
图28 APS情景下中国工业碳排放（单位：十亿吨）和终端能源消费（单位：艾焦）



- ◆ 到2060年中国工业碳排放量将下降近95%，未采用减排技术的煤炭使用量将降低90%，剩余排放量将被电力和燃料转化行业的负排放所抵消。
- ◆ 能效提高和电气化在短期内将推动大部分工业减排，而新兴的创新技术，尤其是水泥、钢铁和化工行业的氢能 and CCUS，将在2030年后发挥主导作用。

8、到2060年CCUS和氢基生产路线将占初级化学品产量的85%

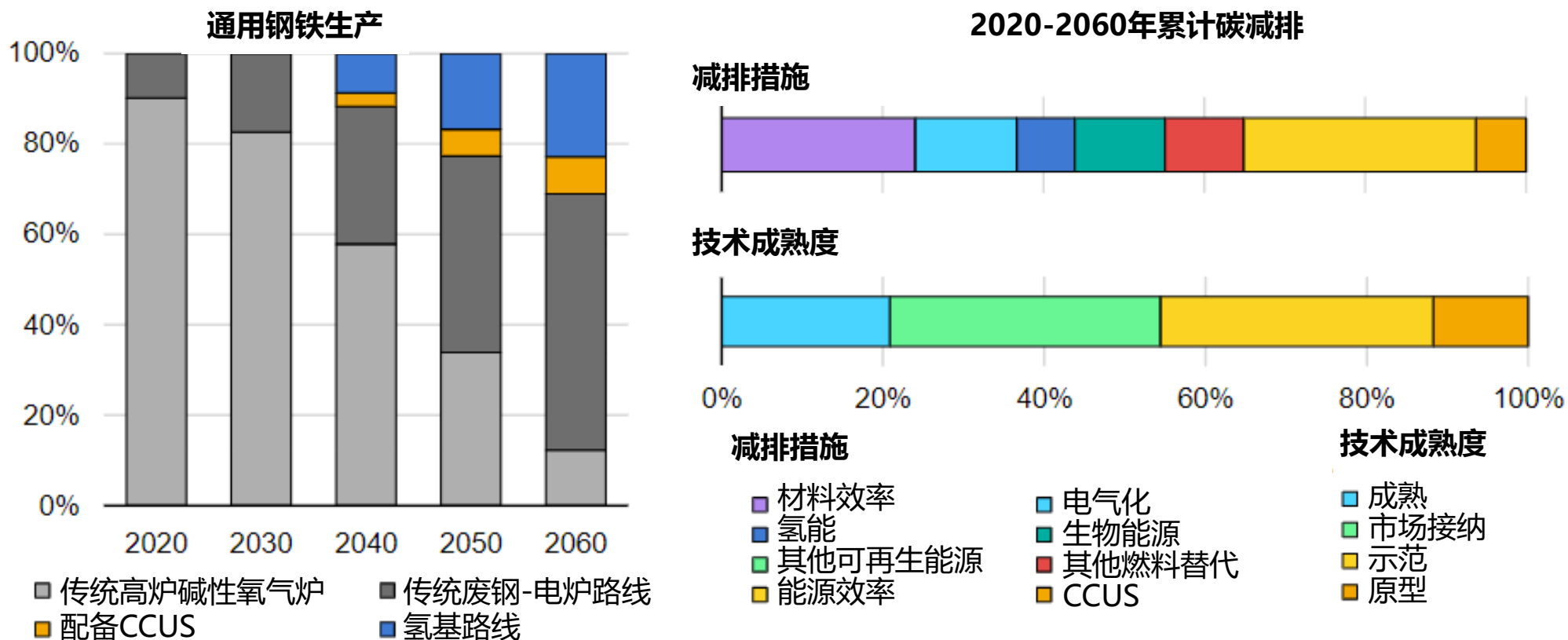
图29 APS情景下中国化工行业低碳技术渗透以及按措施和技术成熟度划分的能源相关碳减排贡献



- ◆ 中国拥有全球最大的化工行业，生产了全球近1/3的氨和超过一半的甲醇。
- ◆ 尽管到2030年初级化学品产量将增加近30%，到2060年增加40%，但化学品生产的直接碳排放将下降90%，从2020年的5.3亿吨降至2060年的6000万吨。
- ◆ 长远来看，化工碳减排主要依赖于CCUS、电解制氢等创新技术的部署。到2060年，这两项技术将涵盖85%的初级化学品生产，并将贡献40%的累计碳减排量；化工行业碳捕集量将增至2亿吨/年，其中90%来自甲醇和高价值化学品工厂。

9、到2060年超过2/3的通用钢铁产量将由创新技术生产

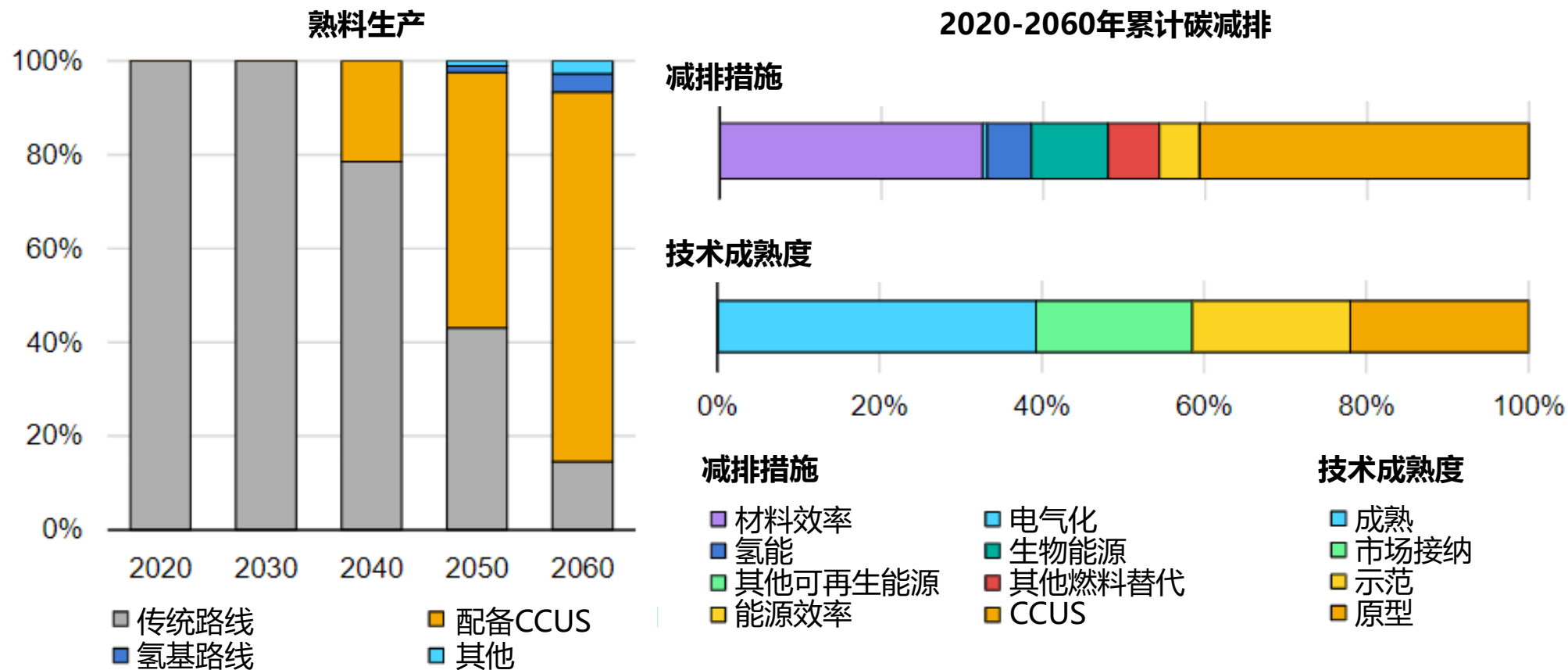
图30 APS情景下中国钢铁行业低碳技术渗透以及按措施和技术成熟度划分的能源相关碳减排贡献



- ◆ 过去20年，中国钢铁需求急剧增加，2020年达到创纪录的11亿吨，仅河北省的钢铁产量就占全球的13%。
- ◆ 中国约80%的钢铁产量来自铁矿石（世界其他地区为60%），使用碳基还原剂是当前铁矿石炼钢的唯一商业化技术。只有10%的粗钢生产涉及电炉，使用废钢为原料。中国目前大部分废钢都通过高炉碱性氧气炉路线回收，随着经济成熟，废钢供应量增加，预计到2030年以废钢为原料的电炉炼钢产量将翻一番，到2060年将增加三倍以上；到2060年基于废钢的电弧炉炼钢将成为中国最主要的钢铁生产路线，占钢铁总产量一半以上。
- ◆ 钢铁生产碳排放将从2020年约15亿吨降至2060年的1.2亿吨，材料效率和能源效率措施将贡献累计碳减排量的50%。

10、到2060年超过80%的水泥生产将配备CCUS

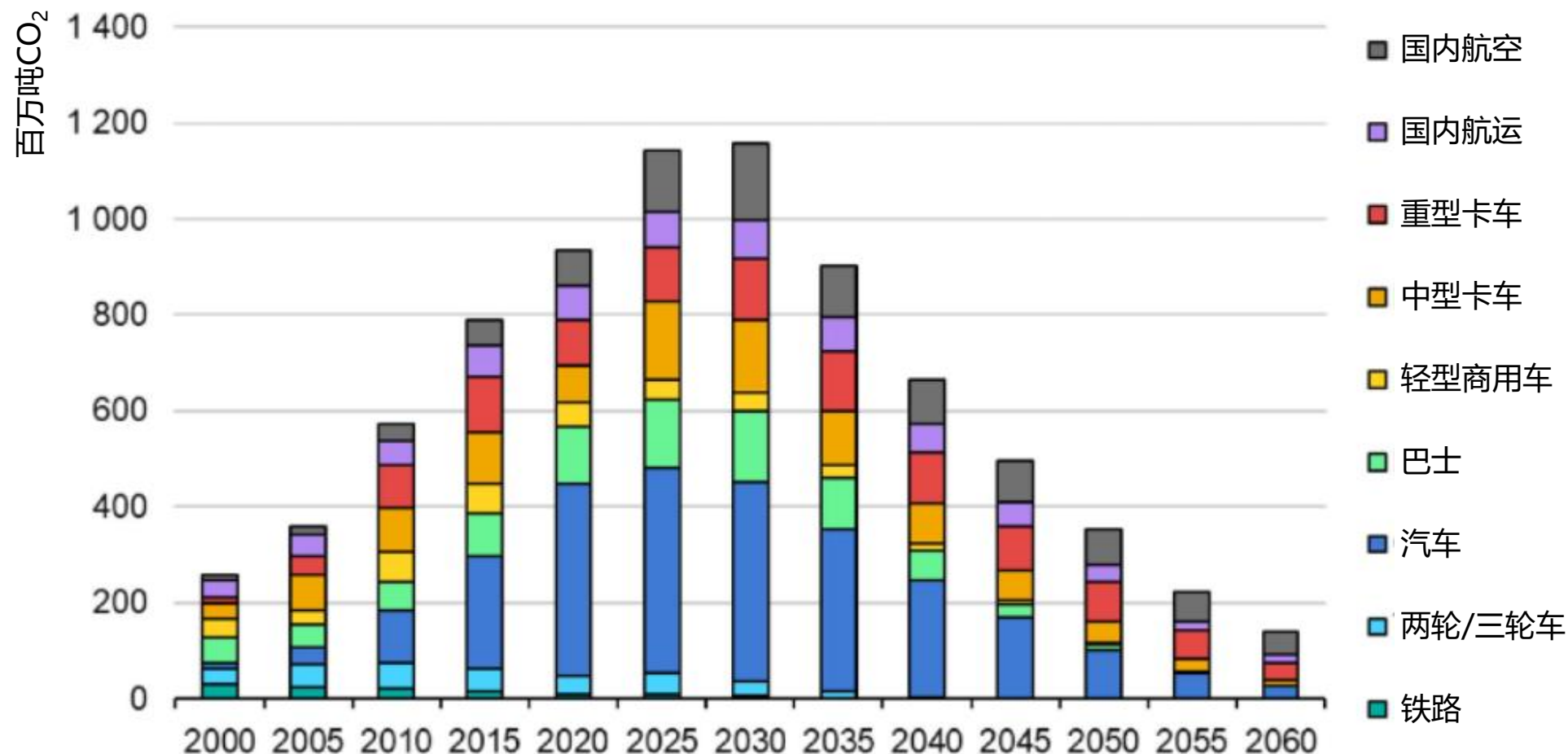
图31 APS情景下中国熟料生产低碳技术渗透以及按措施和技术成熟度划分的能源相关碳减排贡献



- ◆ 2020-2015年，中国水泥产量翻了两番，2020年小幅增长2%。预计中国水泥产量将在短期内缓慢增长，到2025年达峰。
- ◆ 煤炭约占中国水泥生产能源消费的75%，决定水泥生产排放强度的关键是化石燃料和熟料的使用，目前中国熟料在水泥中占比为0.66，低于世界平均水平（0.72）。当前中国水泥生产碳排放约占工业碳排放的1/3，并预计将从2020年的13亿吨降至2060年的3000万吨，其碳强度将从0.55吨CO₂/吨水泥降至0.03吨CO₂/吨水泥。
- ◆ 从长远来看，CCUS等创新技术部署是水泥行业减排的最大动力。到2060年，约有85%的熟料生产设备将配备CCUS。

11、得益于效率提高和低碳技术，到2060年中国交通碳排放将下降近90%

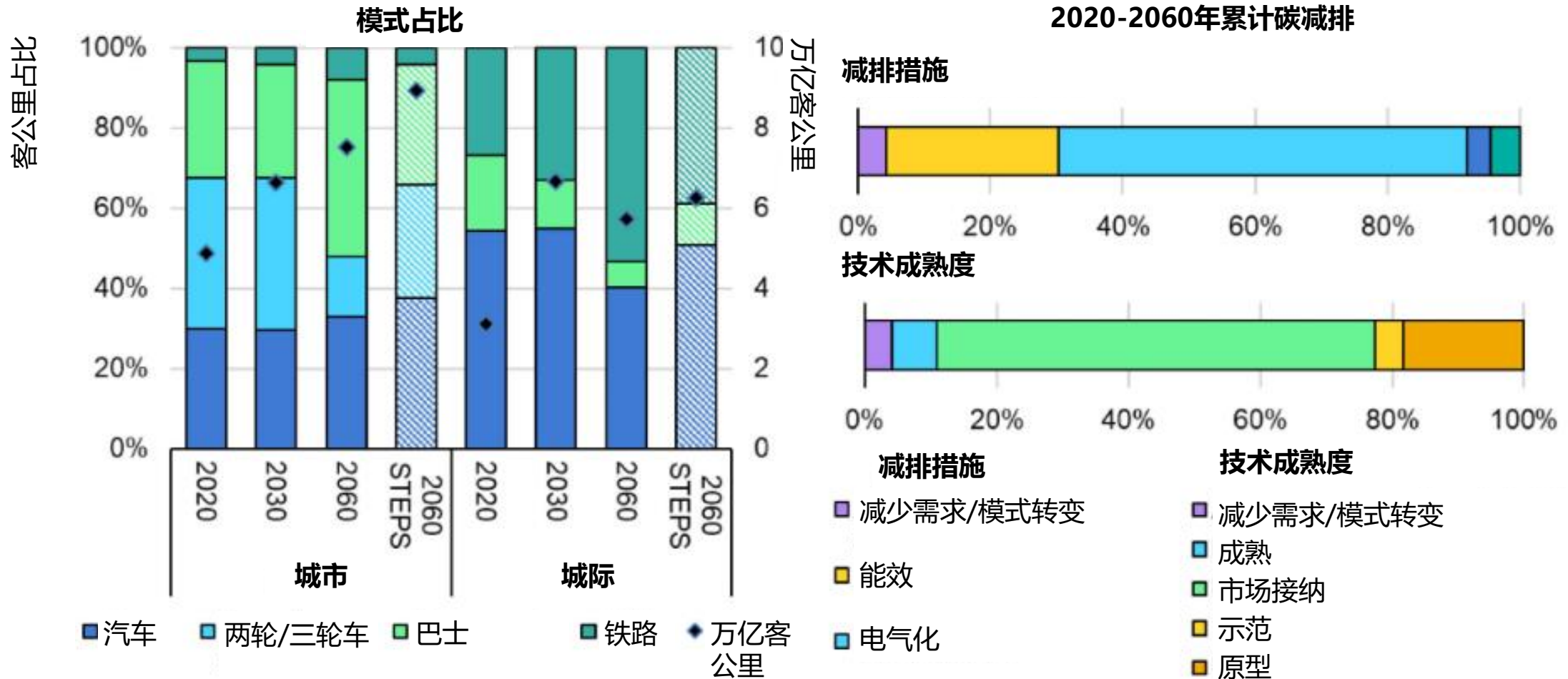
图32 APS情景下2000-2060年中国交通碳排放（单位：百万吨CO₂）



- ◆ 2020年，中国交通碳排放约为9.5亿吨。APS情景中，预计短期内交通排放将继续增长，到2030年达到略高于10亿吨的峰值，到2060年则将降至约1亿吨。剩余碳排放主要来源于航空、航运和长途公路货运。
- ◆ 通过直接电气化将实现大多数乘用车和轻型商用车的减排，氢燃料电池车可能是商用车、货运卡车等实现减排的途径。

12、到2060年转向更高效低碳交通模式和电气化几乎可消除乘用车排放

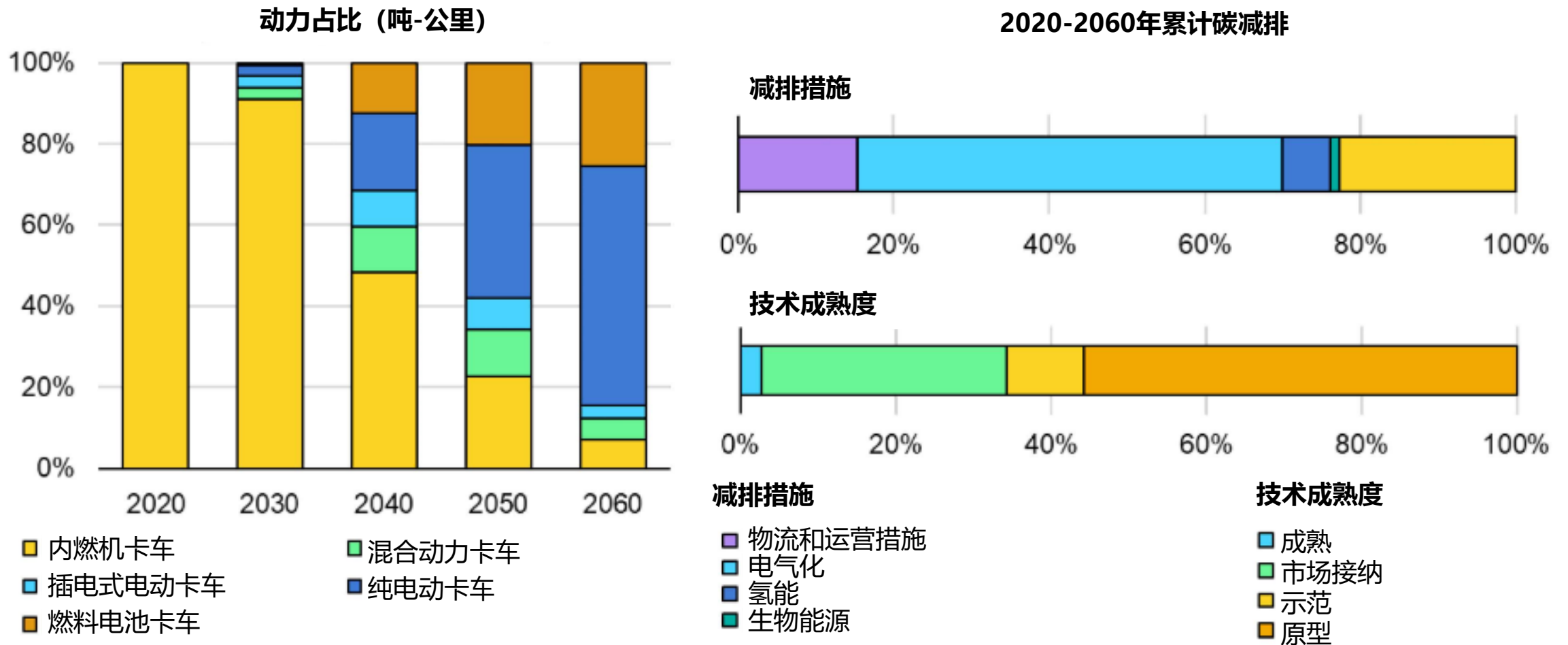
图33 APS情景下中国地面客运交通的模式变化以及按措施和技术成熟度划分的累计碳减排贡献



◆ 根据APS情景，实现道路客运交通排放达峰和净零排放需要促进从汽车向其他高效低碳交通模式转变，同时快速过渡到新能源汽车。

13、公路货运脱碳取决于零排放卡车的快速部署以及快速充电和加氢站的推广

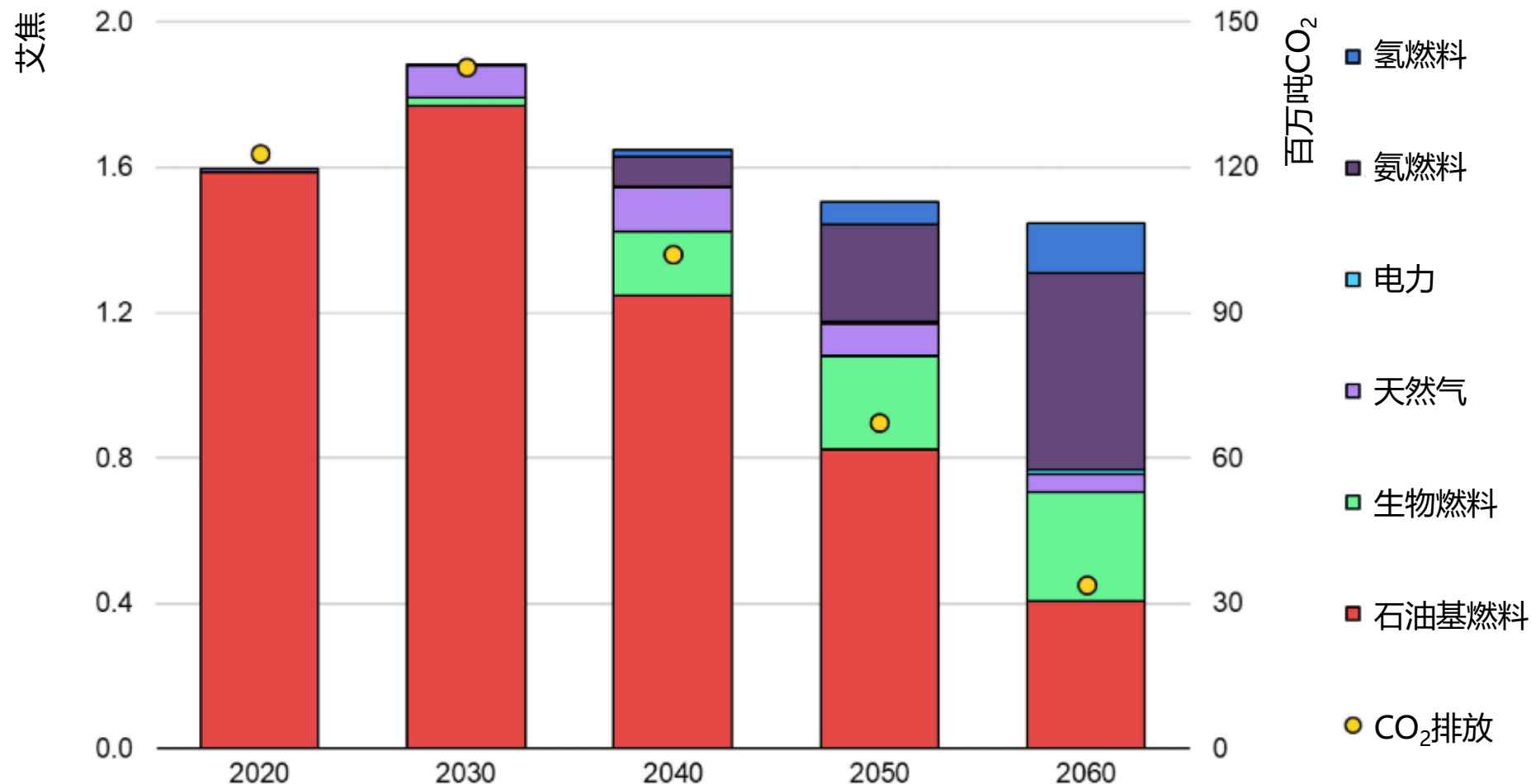
图34 APS情景下中国重型卡车动力转变以及按措施和技术成熟度划分的相关碳减排贡献



◆ 新能源卡车的快速部署是公路货运脱碳的主要驱动力，预计到2030年新能源卡车将占重型卡车的20%；改进物流将减少运输活动并提高运营效率，为货运减排做出一定贡献。

14、由于转向低碳氨燃料，到2060年中国国际航运排放将下降75%

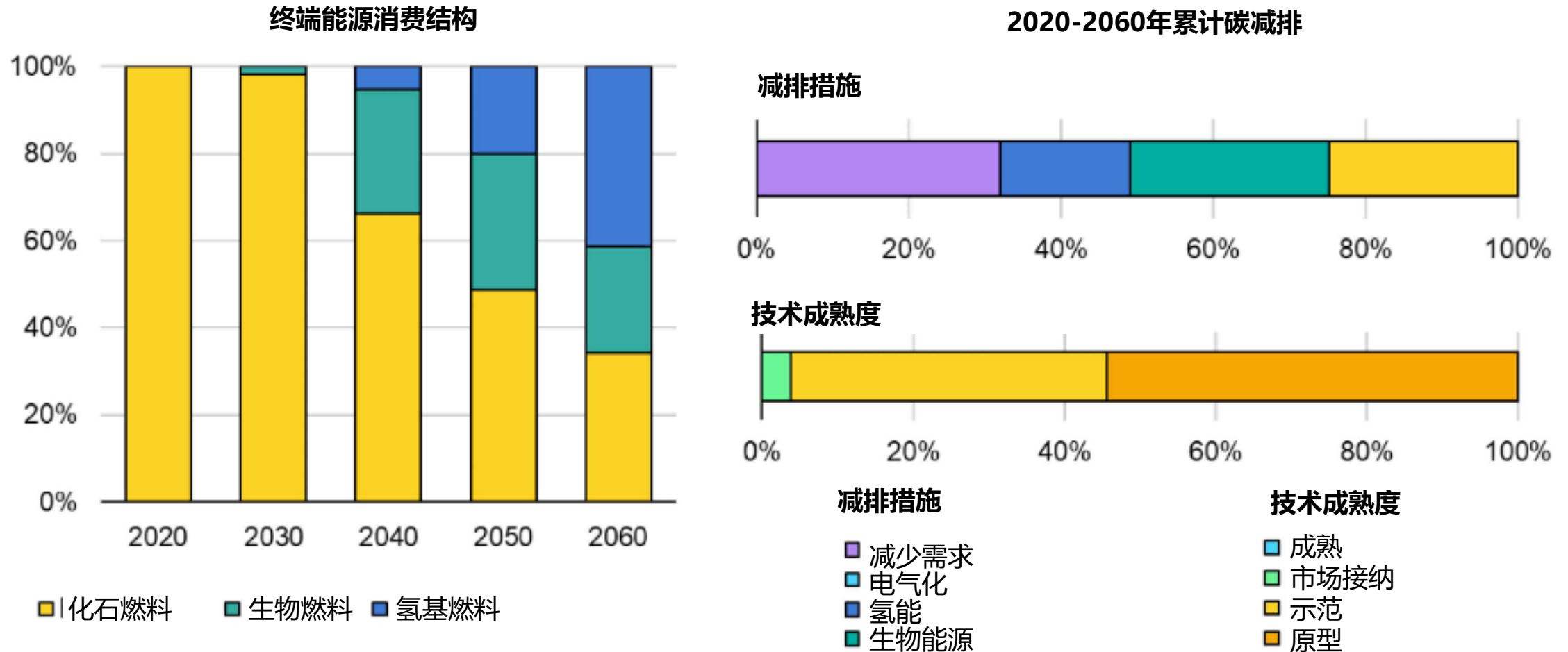
图35 APS情景下中国国际航运能源消费（单位：艾焦）及碳排放（单位：百万吨CO₂）



- ◆ 全球最繁忙的50个集装箱运输港口中有16个位于中国。APS情景中，到2030年中国国际航运碳排放将从2020年的1.2亿吨达到略低于1.45亿吨的峰值，然后稳步下降至2060年，达到3000万吨左右。
- ◆ 2050年以后，低碳氢生产的氨燃料将成为主要燃料，2060年将占航运能源消费的近40%。

15、短期减少需求将限制航空排放， 远期需提高效率和部署可持续燃料

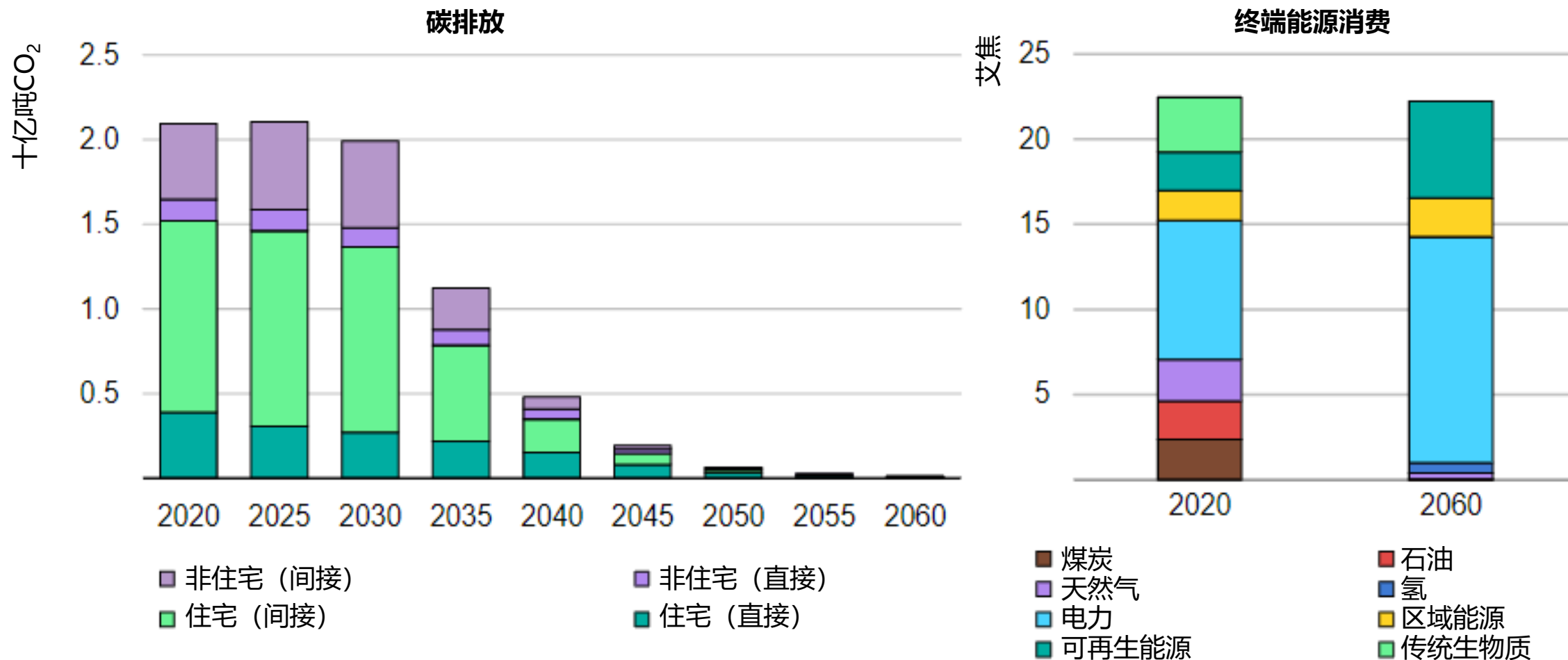
图36 APS情景下中国航空终端能源消费以及按措施和技术成熟度划分的相关碳减排贡献



- ◆ 迄今为止，中国限制航空排放增长的主要措施是大规模投资高铁基础设施。
- ◆ 国内航空排放增长将持续到2030年，之后通过提高效率、继续推行高铁和使用可持续航空燃料实现长期减排。

16、到2050年代后期将消除建筑碳排放

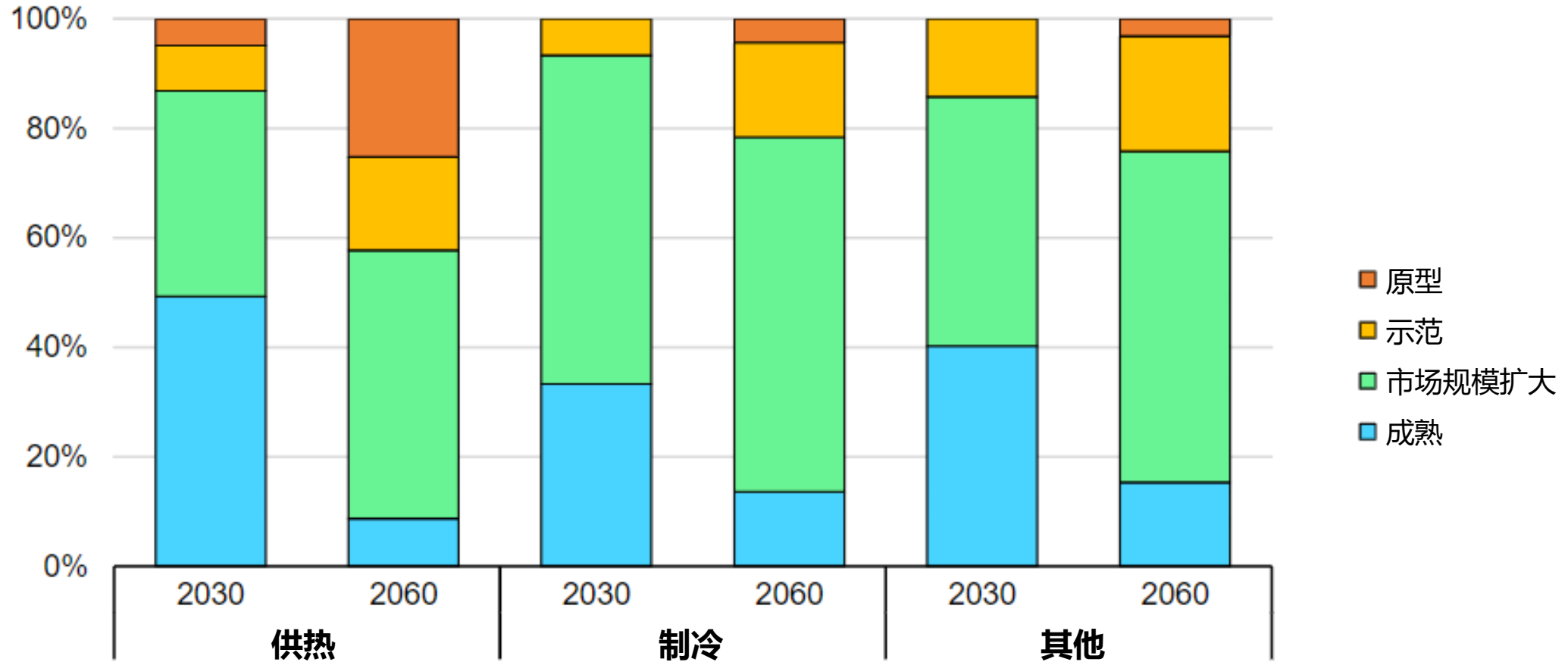
图37 APS情景下中国建筑直接和间接碳排放（单位：十亿吨CO₂）及建筑能源消费（单位：艾焦）



- ◆ 到2060年，中国建筑总面积将增加约40%。尽管如此，由于能效提高，建筑能源强度将下降30%。
- ◆ 由于逐步淘汰化石燃料以及实现供热和供电的完全脱碳，到2050年代后期中国将消除建筑碳排放。

17、到2030年近90%的建筑减排来自现有技术，但完全脱碳需要新技术

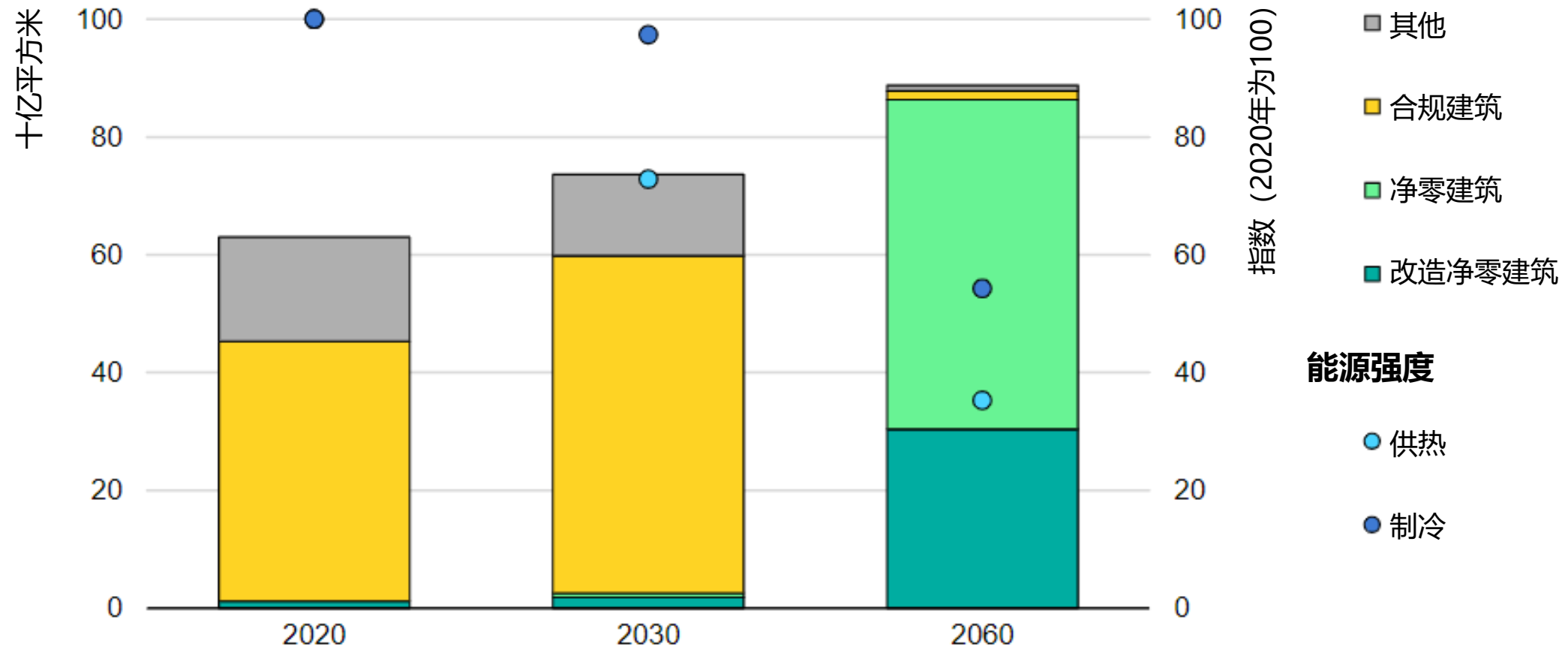
图38 APS情景下按技术成熟度和终端应用划分的减排措施贡献度（单位：%）



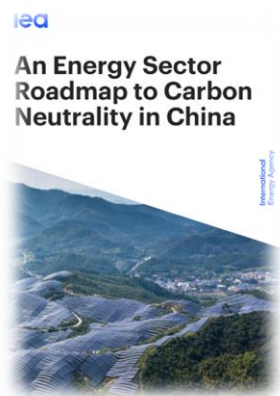
◆ 通过使用现有技术（如热泵、高效建筑设计和材料、可再生能源）可在近期内降低建筑排放，到2060年近2/3的建筑减排来自目前已经成熟或处于早期采用阶段的技术，处于示范和原型阶段的技术将在2040年以后发挥作用。

18、到2060年改造和新建零碳建筑可大幅降低供热及制冷能源强度

图39 APS情景下中国供热和制冷建筑面积（单位：十亿平方米）及终端能源强度（单位：%）



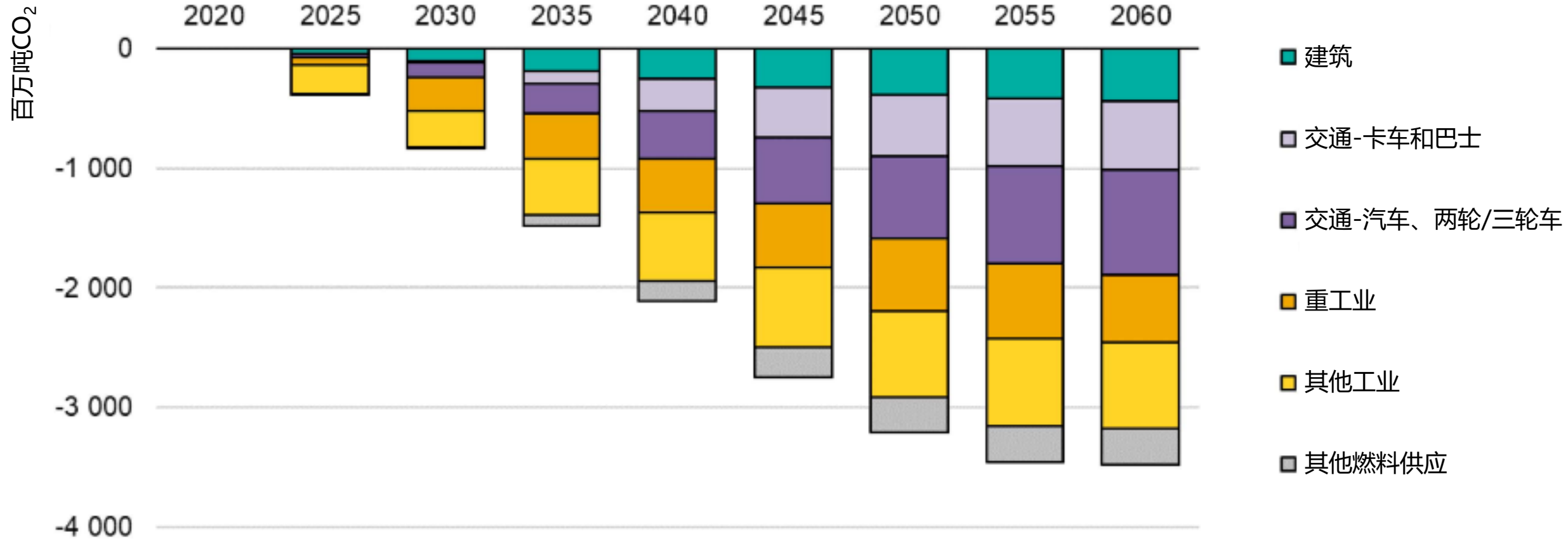
◆ APS情景下，到2060年几乎所有建筑面积都实现零碳排放，使得供热和制冷的终端能源强度（每平方米能源消费）比2020年分别降低65%和45%。



◆ 能源转型的技术创新需求

1、到2060年终端用能和低碳燃料生产的电气化将贡献13%的减排量

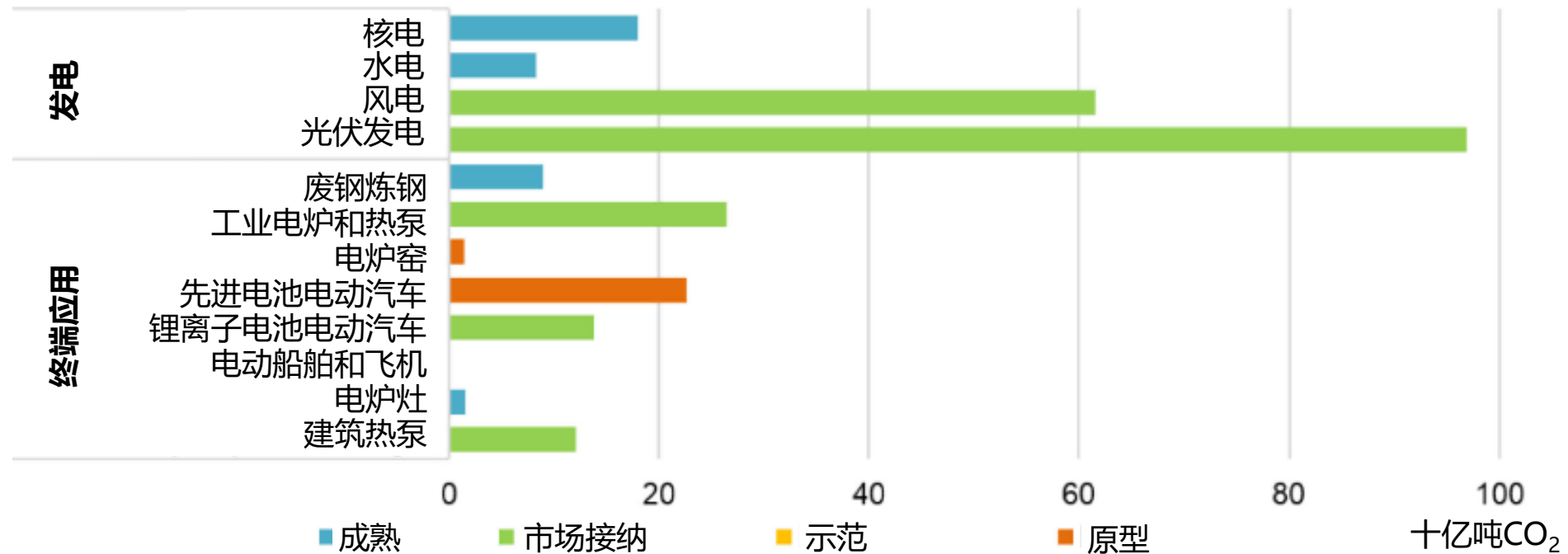
图40 APS情景下中国按部门划分的电气化减排贡献（单位：百万吨CO₂）



◆ 到2060年，电气化贡献的累计碳减排量中，45%来自工业部门，主要由化石燃料供热转向工业热泵和电锅炉、轻工业中低温供热电气化、电弧炉废钢冶炼等驱动；35%来自交通部门，主要通过短期内轻型车辆的直接电气化，以及长期内重型汽车的电气化（包括使用电解生产的氢和氢基燃料）；12%来自建筑部门，主要通过烹饪和供热电气化；燃料供应电气化的贡献占比不到10%，主要通过电解制氢及其衍生燃料。

2、大多数重要的减排电气化技术已进入市场，但需进一步创新才能广泛应用

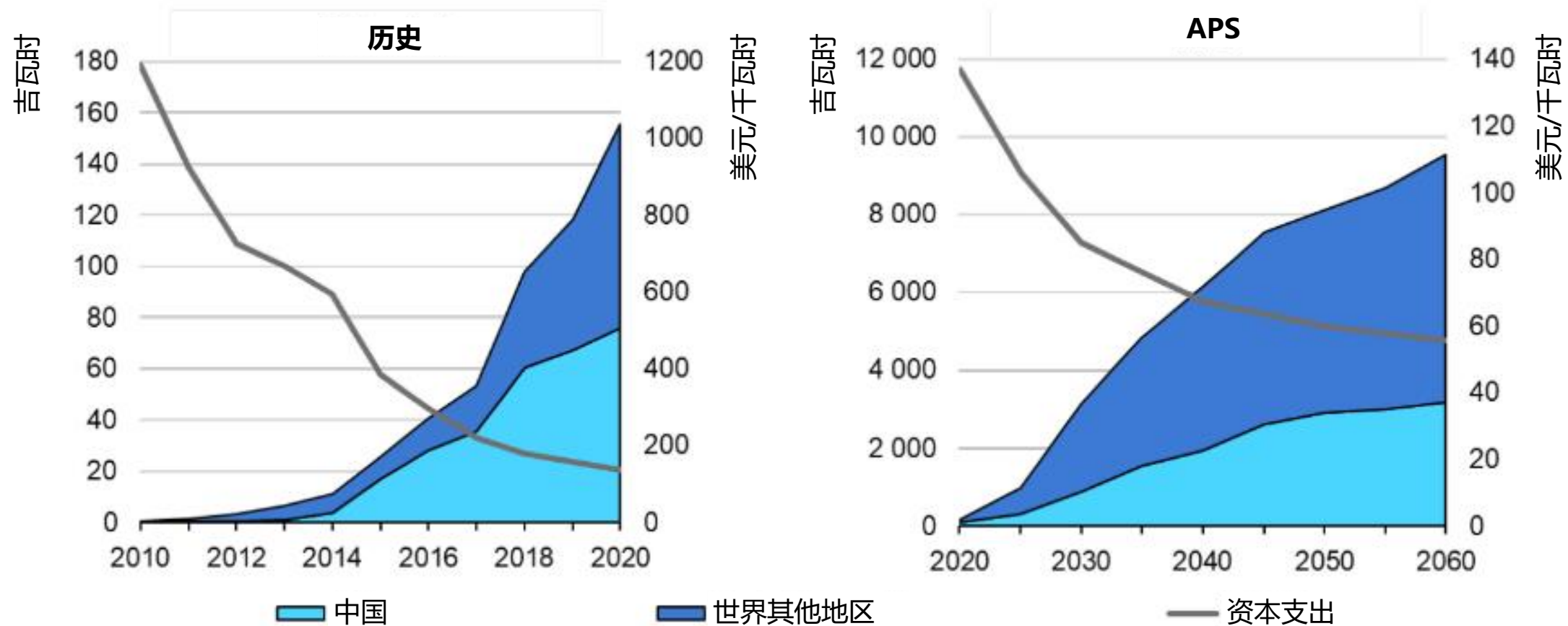
图41 APS情景中2020-2060年间不同成熟度的电气化技术为中国贡献的累计碳减排量
(单位：十亿吨CO₂)



- ◆ 低碳技术在终端用能部门的应用没有发电领域成熟，电动汽车和热泵等技术已经商用，但还无法与被替代的非电力技术完全竞争。其他终端电气化技术发展成熟度更低，特别是在重工业和长途运输方面：电炉炼钢仍处于研究和中试阶段；电动飞机正处于原型开发阶段，远未达到商业可行性。
- ◆ APS情景中，大约85%的碳减排量将来自可再生能源和核能，其中许多技术已经成熟或在市场中稳步增长。许多依赖电力的终端用能技术，例如建筑和工业中的热泵、废钢生产、电动汽车锂离子电池和电炉灶，已经投入市场。目前还处于原型阶段的先进高能量密度电池将为2060年的道路运输碳减排做出近一半贡献。重工业的直接电气化还充满重要的技术挑战，特别是对于那些具有高温热需求的工艺，该领域的大多数技术还处于原型阶段。

3、到2060年中国所有类型车辆的电池总需求量将增加40倍

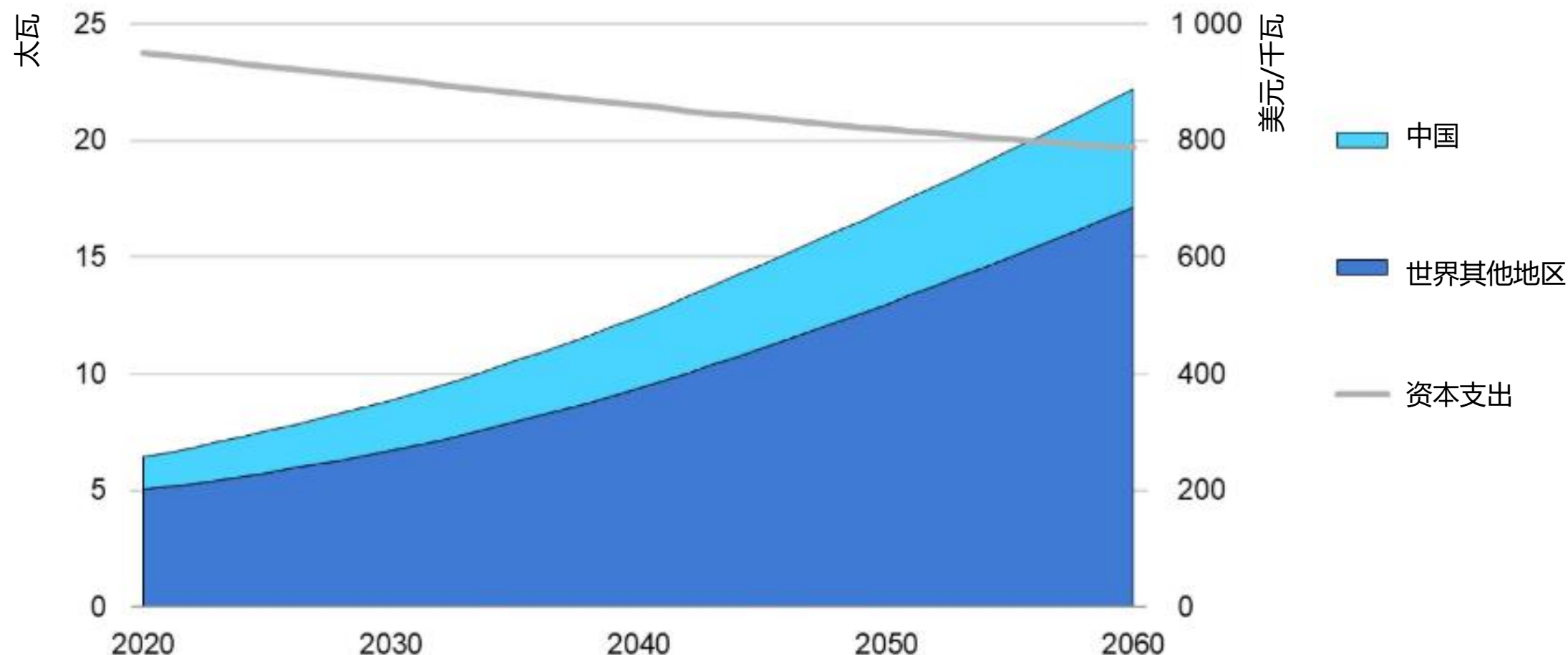
图42 APS情景下中国及其他地区动力电池需求（单位：吉瓦时）和平均资本支出（单位：美元/千瓦时）



- ◆ 由于固态电池技术的发展，2020年代动力电池的能量密度将提升50%至350瓦时/千克，到2060年将超过540瓦时/千克。
- ◆ 到2060年，中国所有类型车辆（尤其是道路运输）的电池需求将增加40倍至3太瓦时，满足上述需求将需建设超过85个超级工厂（工厂产能达到35吉瓦时）。

4、到2060年中国将占全球热泵产能增量的1/5以上

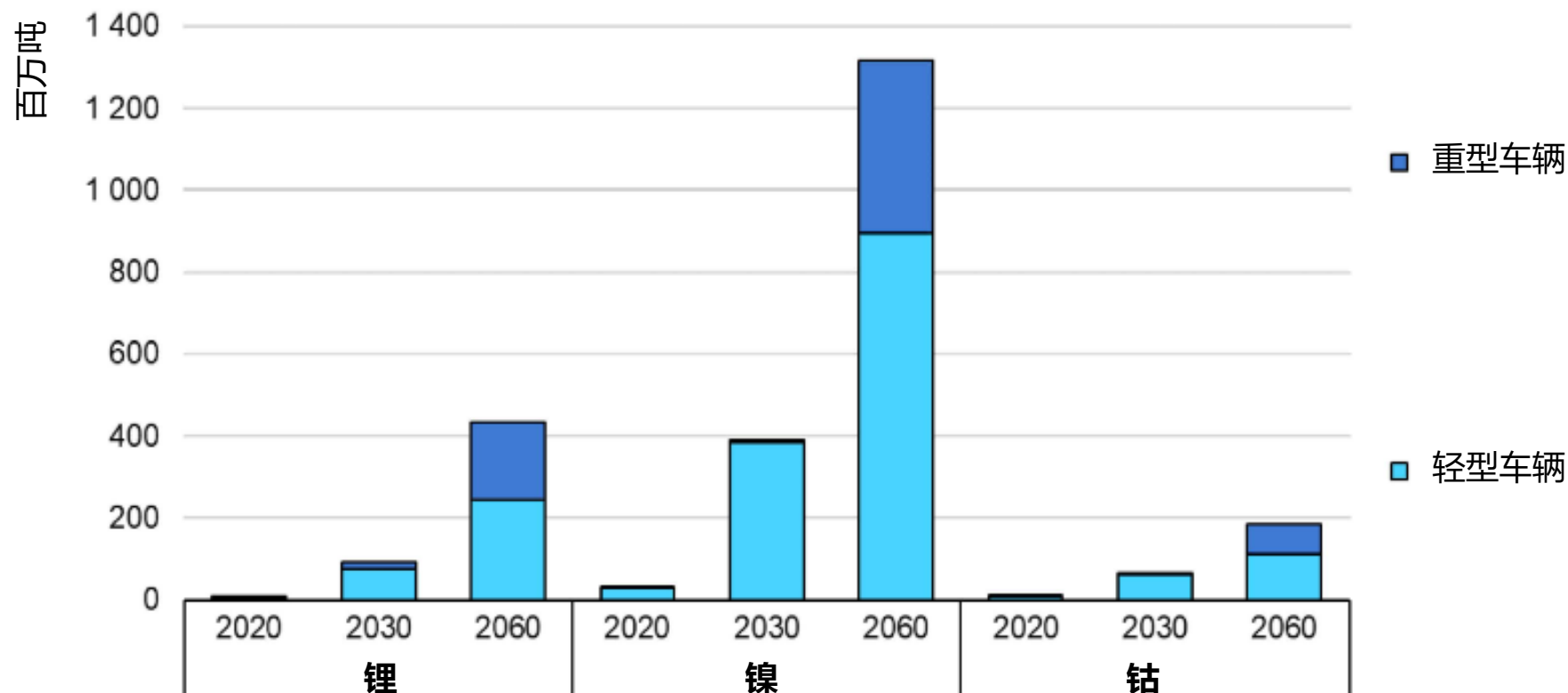
图43 APS情景下中国及其他地区热泵装机容量（单位：太瓦）和平均资本支出（单位：美元/千瓦）



- ◆ 热泵容量在2020年至2060年间几乎翻两番达到约5太瓦，约占世界总量的30%。
- ◆ 到2060年，用于供热和制冷的热泵能源消费将达到800太瓦时，约占全球建筑能源消费总量的13%。
- ◆ 热泵需求的增加使中国制造商能够利用规模经济，推动其平均成本到2030年降低5%，到2060年则降低近15%。

5、发展锂、钴、镍等关键材料供应链以应对未来电气化需求

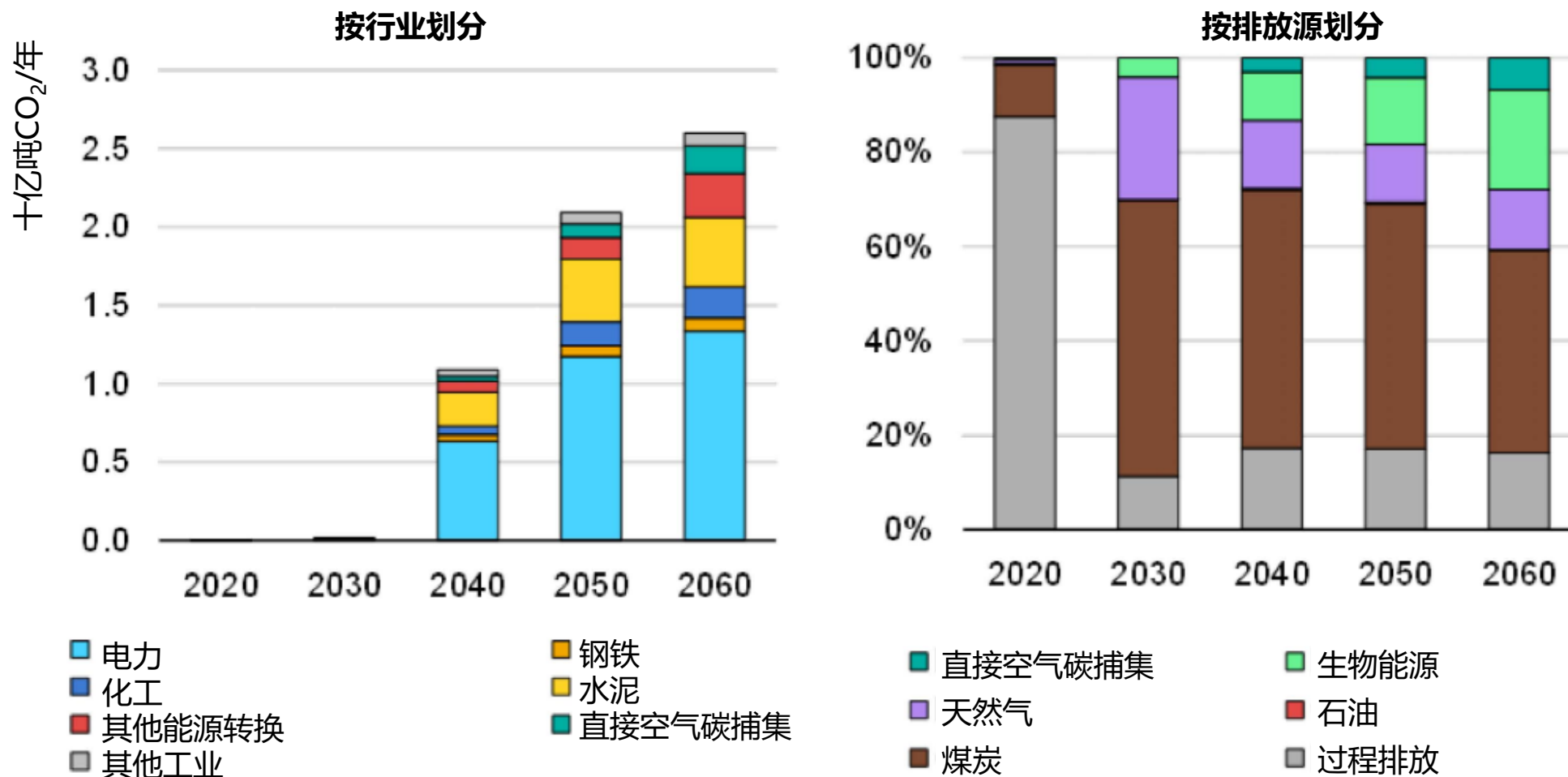
图44 APS情景下中国电动汽车部分关键材料需求（单位：百万吨）



- ◆ 电网扩建和改造以及终端用能电气化将增加对关键材料的需求。铜、锂、钴和铂是能源转型的核心，供应链最脆弱的材料是钴，中国的纯钴需求主要依赖进口。锂可能保持其作为关键材料的地位，物理特性使其难以在高能量密度电池中被替代。铜被用于建筑、车辆制造和电力系统，预计中国的需求将在2020年至2060年间显著增长。到2060年锂离子电池原材料如锂、镍和钴的需求将分别增长50倍、44倍和22倍。
- ◆ 中国拥有一些关键材料的大量储备以及较强的稀土金属开采和钴、锂、镍加工冶炼能力。根据已计划的项目，中国很可能在中期保持其在关键材料供应方面的全球领先地位，使其成为能源转型所需全球供应链的中心。

6、CCUS将贡献中国到2060年累计碳减排量的8%

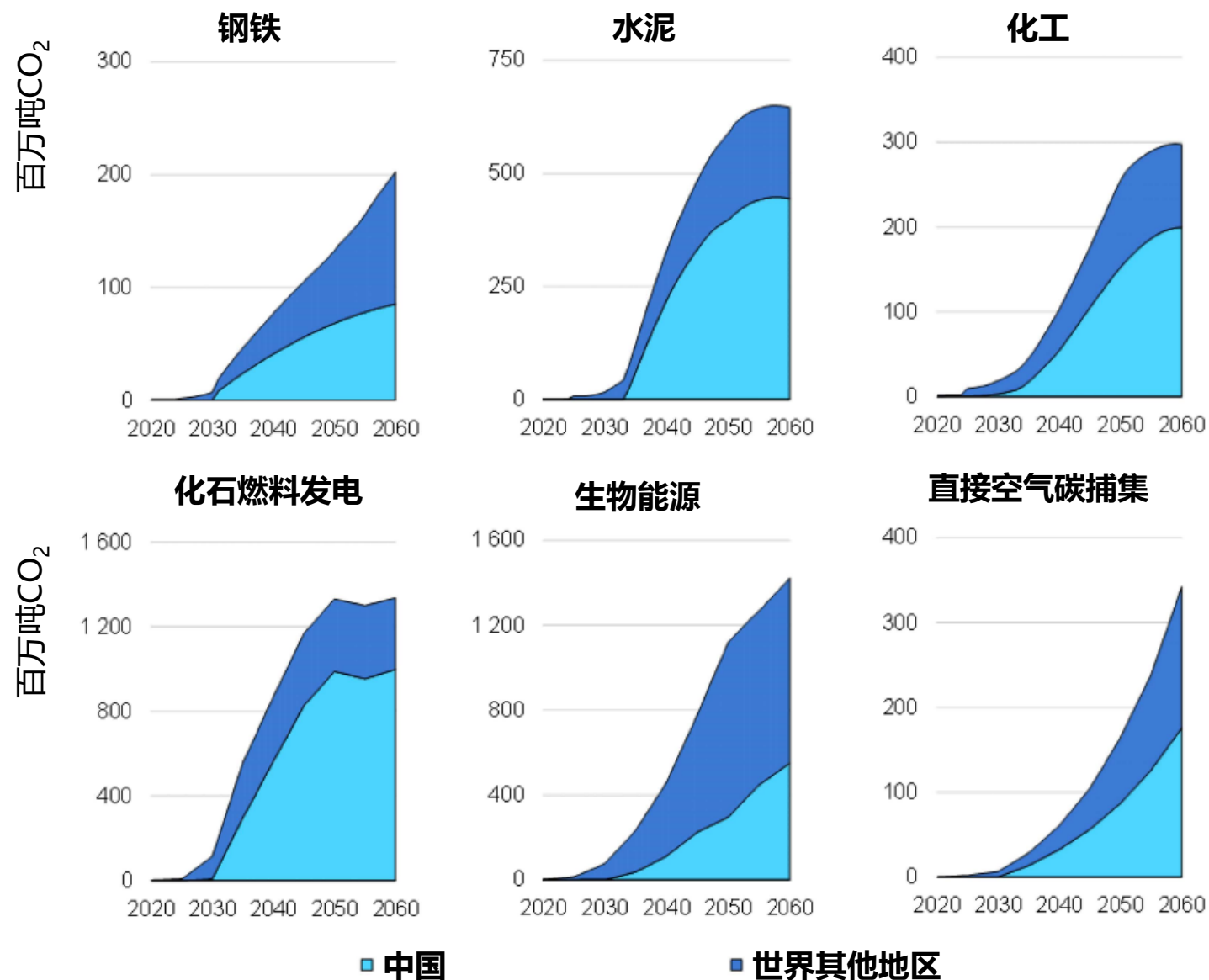
图45 APS情景下按行业和排放源划分的中国CCUS部署情况 (单位: 十亿吨CO₂/年)



- ◆ APS情景中，CCUS将贡献中国到2060年累计碳减排量的8%，占全球CO₂累计捕集量的近50%。
- ◆ 2020-2030年的碳捕集量只需小幅增加，就可以实现中国国家自主贡献相关的近期目标。

7、到2060年中国将占全球化石能源、化工和水泥碳捕集量的2/3以上

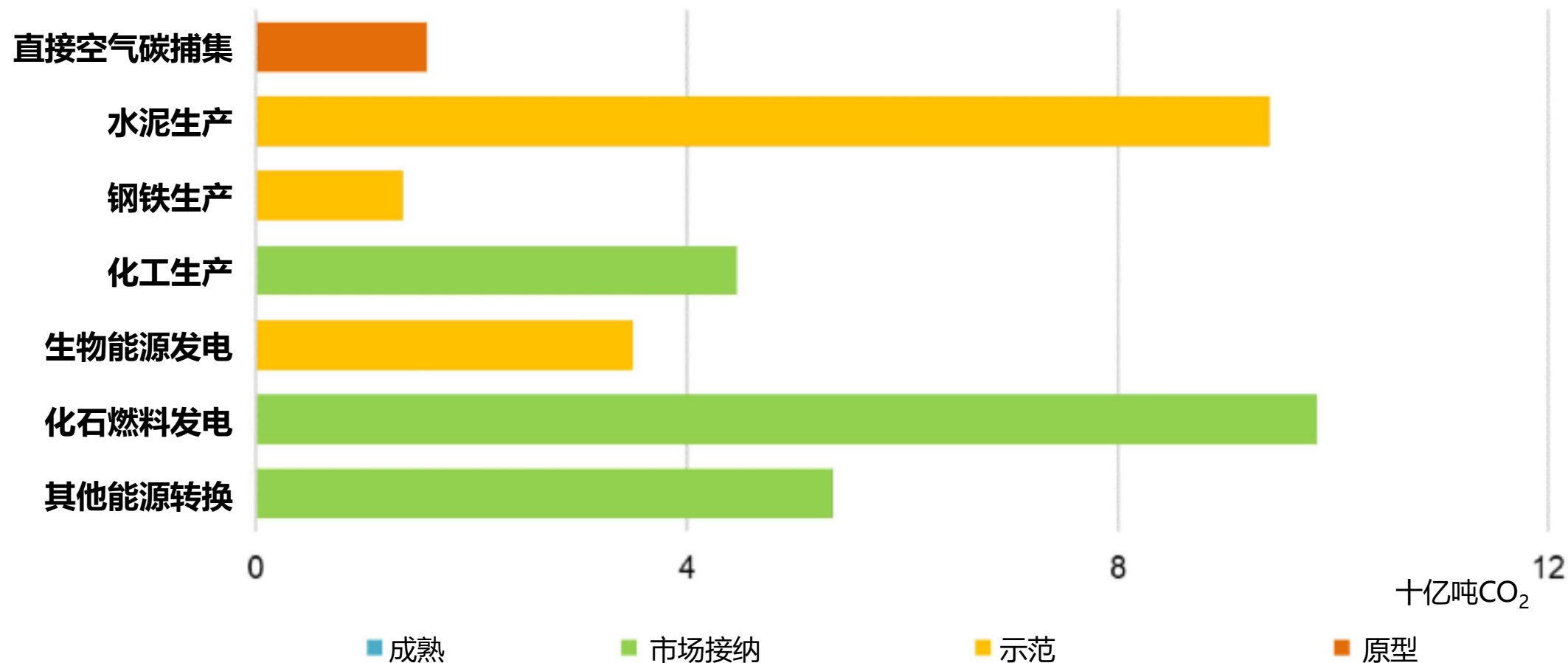
图46 APS情景下按行业划分的全球CCUS部署情况（单位：百万吨CO₂）



- ◆ 到2060年，燃煤电厂和天然气电厂的平均捕集率将达到98%左右。电力将成为CCUS部署的主要驱动力，到2060年将捕集约13亿吨，占中国总捕集量的一半。
- ◆ 重工业碳捕集量将达8.2亿吨，占总捕集量的32%。
- ◆ 约有5.05亿吨碳捕集由生物能源+碳捕集与封存（BECCS）贡献，带封存的直接空气碳捕集（DAC）则将捕集1.15亿吨。
- ◆ 中国在化石燃料发电、化工、水泥以及DAC领域部署的CCUS占全球相应领域CCUS容量的50%-75%左右，而在钢铁行业的部署占全球40%左右。

8、当前中国CCUS的成熟度因技术类型和应用而异1/3

图47 APS情景中2020-2060年间不同成熟度的CCUS技术为中国贡献的累计碳减排量
(单位：十亿吨CO₂)



◆ 虽然大多数CCUS技术已在全球范围内得到验证，但缺乏政策和监管支持阻碍了CCUS在中国的部署。APS情景中，2020-2060年间有约45%的累计碳减排量来自于目前还处于原型或示范阶段的技术。因此，需要加快示范和商业规模的项目开发，使这条途径成为可能。

8、当前中国CCUS的成熟度因技术类型和应用而异2/3

■ CO₂捕集方面：

- 当前先进且广泛应用的碳捕集技术是化学吸收和物理分离，其他技术如膜分离、化学链循环尚处于原型阶段。
- 在中国，燃烧前碳捕集成本在36-62美元/吨，燃烧后碳捕集为43-65美元/吨，富氧燃烧为43-58美元/吨。

■ CO₂运输方面：

- 中国目前超过2/3的CCUS项目采用卡车运输，成本在0.13-0.2美元/吨/公里，驳船运输的内陆运输成本约为0.04美元/吨/公里。
- 管道运输适用于长距离、大规模运输，吉林油田的中石油CO₂-EOR项目是中国为数不多的管道运输CCUS项目之一，运输距离超过53公里，成本为0.04美元/吨/公里。

■ CO₂利用方面：

- 目前捕集的CO₂多用于强化驱油（EOR）和化学品制造，少量用于电子和食品饮料行业。目前正在运营的大型CCUS项目中，超过3/4的项目用于EOR。
- 使用CO₂制造化学原料和交通燃料将发挥重要作用，但尚处于原型阶段，需要加强创新和政策支持以确保在未来十年内实现商业化。
- CO₂用于固化混凝土和制造矿化建筑材料正在大规模应用或示范。

8、当前中国CCUS的成熟度因技术类型和应用而异3/3

■ CO₂封存方面：

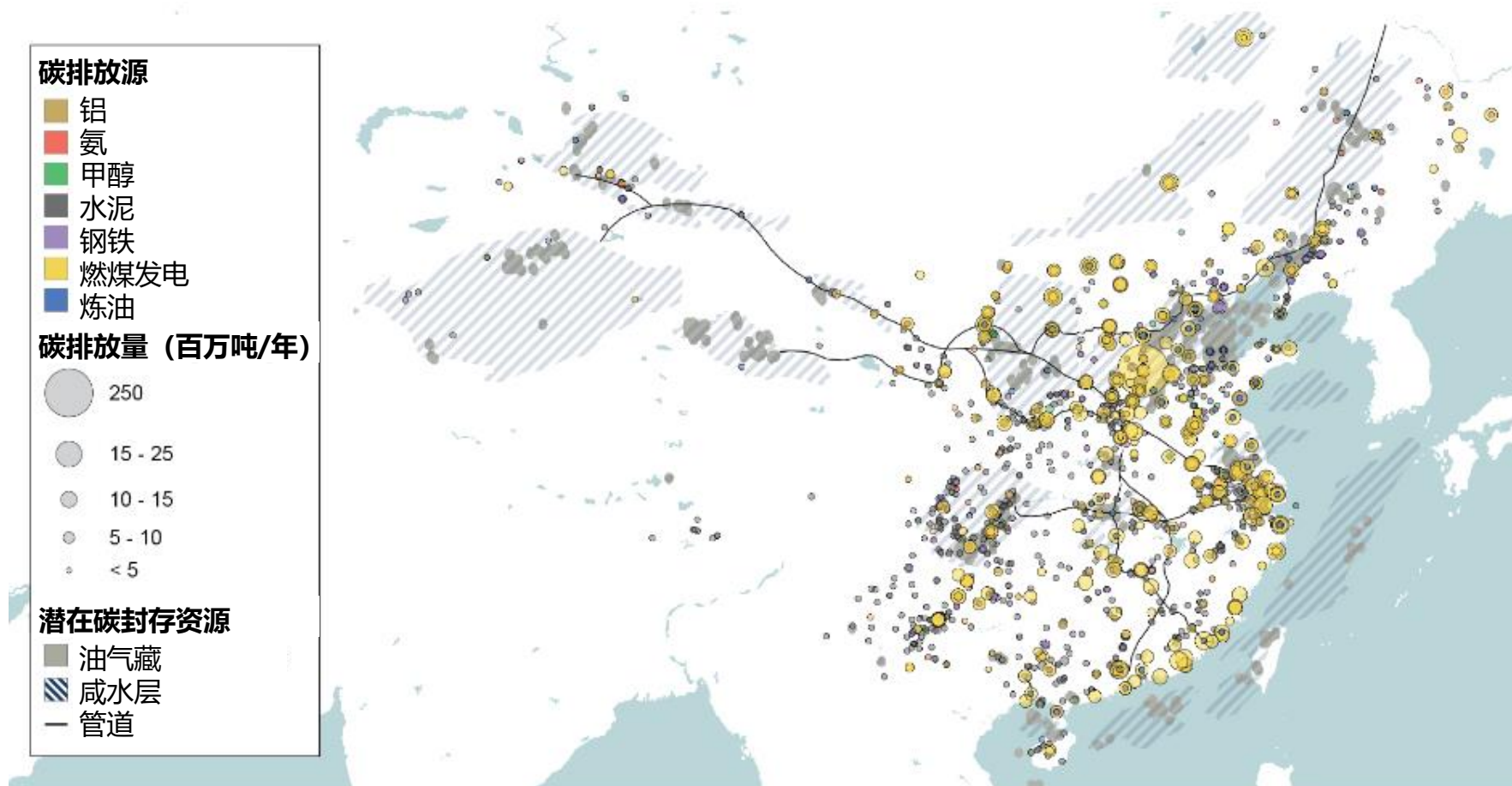
- ❑ CO₂可以永久封存在陆地和海上的咸水层或枯竭油气藏中，中国还没有专门的商业封存设施。世界其他地区目前有5座大型设施正在运行，枯竭油气藏的CO₂封存仅限于试点示范。
- ❑ 中国具有极大的碳封存潜力，陆上盆地理论容量超过3250亿吨，海上盆地超过770亿吨。对现有适合EOR地区的咸水层进行表征可能会促进发展专用封存设施，共享CO₂运输基础设施，并鼓励从EOR应用过渡到专用封存。使用海上油气勘探和生产过程中收集的数据来表征封存资源有助于加速开发海上封存。
- ❑ 中国的碳封存成本，包括场地关闭后20年的监测在内，陆上咸水层封存成本为8.7美元/吨，海上咸水层为43.48美元/吨，枯竭油气田封存成本为人民币50元/吨。

■ CO₂运输方面：

- ❑ BECCS比DAC更接近大规模商业化，对中国的减排贡献更大，主要是在2040年之后。世界上唯一运营的大型BECCS工厂位于美国的伊利诺伊州。
- ❑ 鉴于中国广泛使用废物发电和供热，这些工厂可以首先部署BECCS。目前，世界各地有几家小型DAC中试工厂正在运营，DAC的最佳选址是在可以获得低成本可再生能源/核能以及碳封存资源的地区，中国的四川省和东北松辽盆地具有良好的发展潜力。

9、实现碳中和目标需建立广泛的碳运输和封存基础设施网络

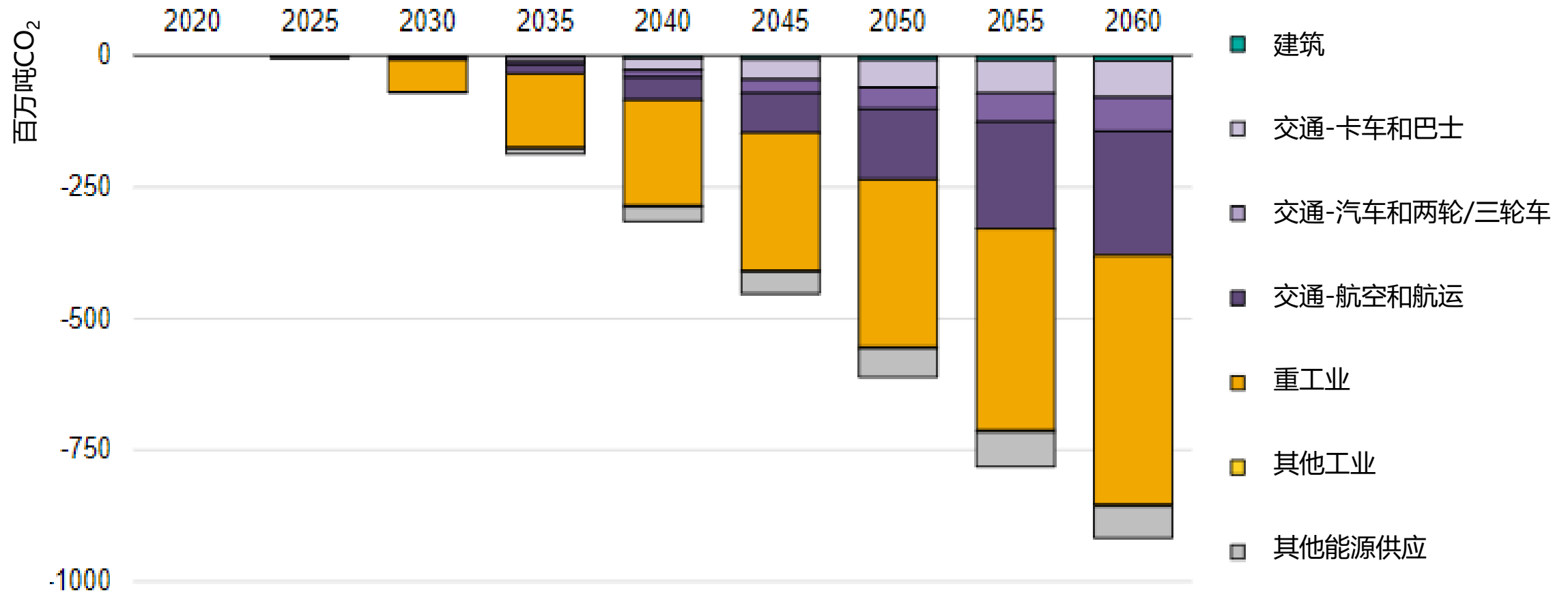
图48 中国CO₂排放源及地质封存潜力



◆ 短期内，CCUS活动预计将集中开发靠近大型工业港口和主要产业集群的碳封存资源，当前拥有许多煤化工装置、天然气加工设施和EOR项目的地区可作为陆地封存中心。陆上和海上碳封存场地可以从一个或多个来源接收CO₂。开发现有工业港口（排放量高）附近的海上封存资源可能是长距离运输CO₂进行陆上封存的首选替代方案。跨区域的高容量CO₂运输干线可能比同区域的多条小容量管道更具经济效率。APS情景中，到2060年可能需要超过15000公里的CO₂运输网络。

10、到2060年低碳氢和氢基燃料的使用将累计减排近160亿吨CO₂

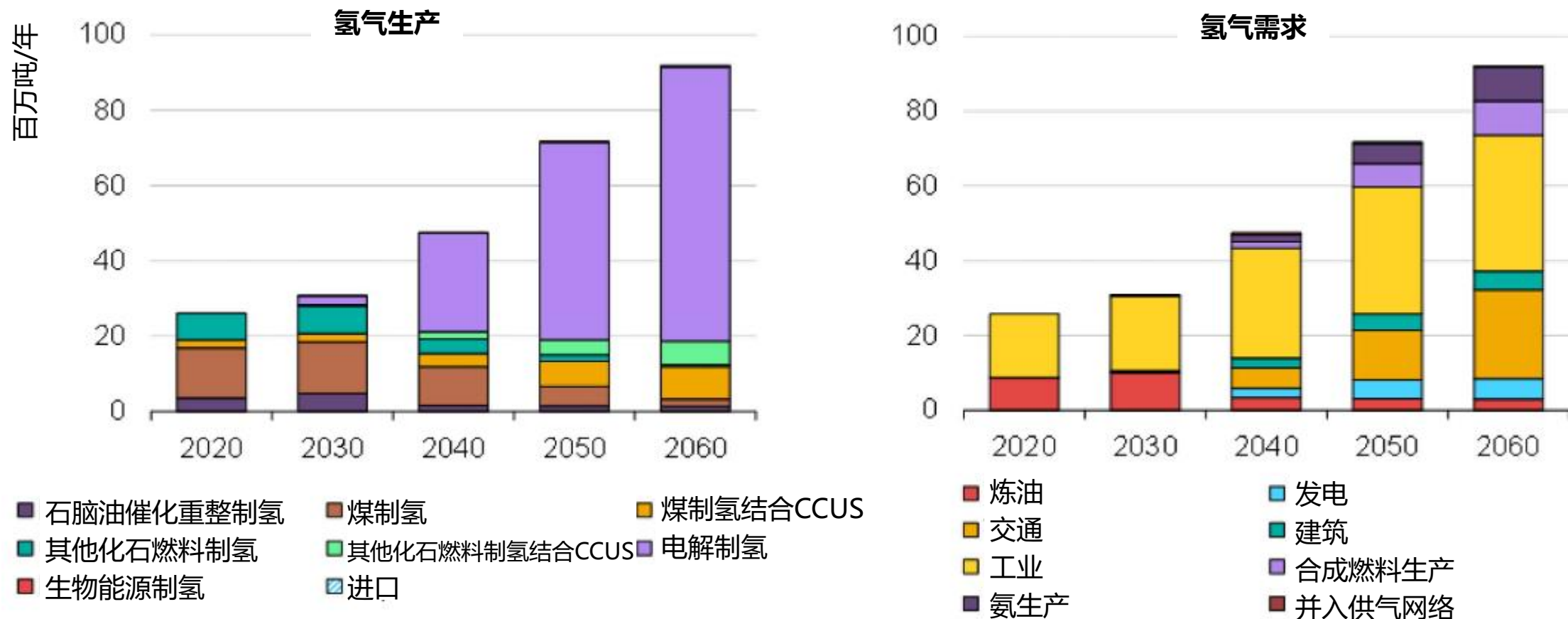
图49 APS情景中按部门划分的氢能对中国碳减排的贡献（单位：百万吨CO₂）



◆ 2021-2060年低碳氢和氢基燃料的使用将累计减排近160亿吨CO₂，占总减排量的3%以上，主要来源于工业部门，尤其是化工和钢铁（占氢能贡献碳减排量的50%以上），其余是航运中的氢和氨以及航空中的合成喷气燃料（共占20%），以及公路运输（13%）。

11、到2060年中国氢需求将增加2倍以上，几乎全部由低碳氢满足

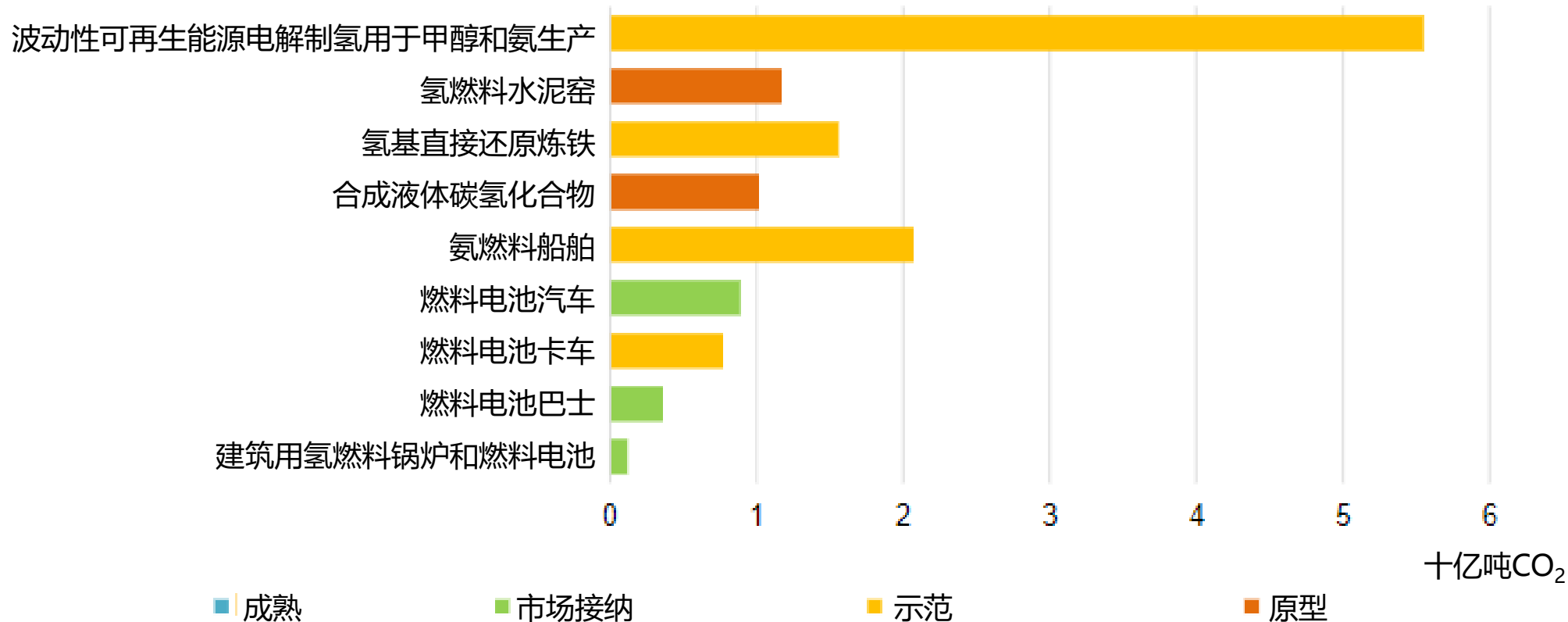
图50 APS情景中2020-2060年中国氢需求及产能（单位：百万吨/年）



- ◆ 到2030年，中国氢需求量将增加20%至3100万吨，到2060年将增加三倍以上至9000万吨。
- ◆ 到2060年，氢及氢基燃料将满足交通能源需求总量近1/4，工业能源消费总量的10%，建筑需求的3%。
- ◆ 短期内，低碳氢生产的大部分增量来自电解制氢，预计到2030年电解制氢将满足中国约7%的氢需求，到2060年几乎所有的氢需求都可以通过低碳技术来满足，其中近80%是电解制氢。

12、氢能90%的碳减排贡献将来自目前还处于原型和示范阶段的技术

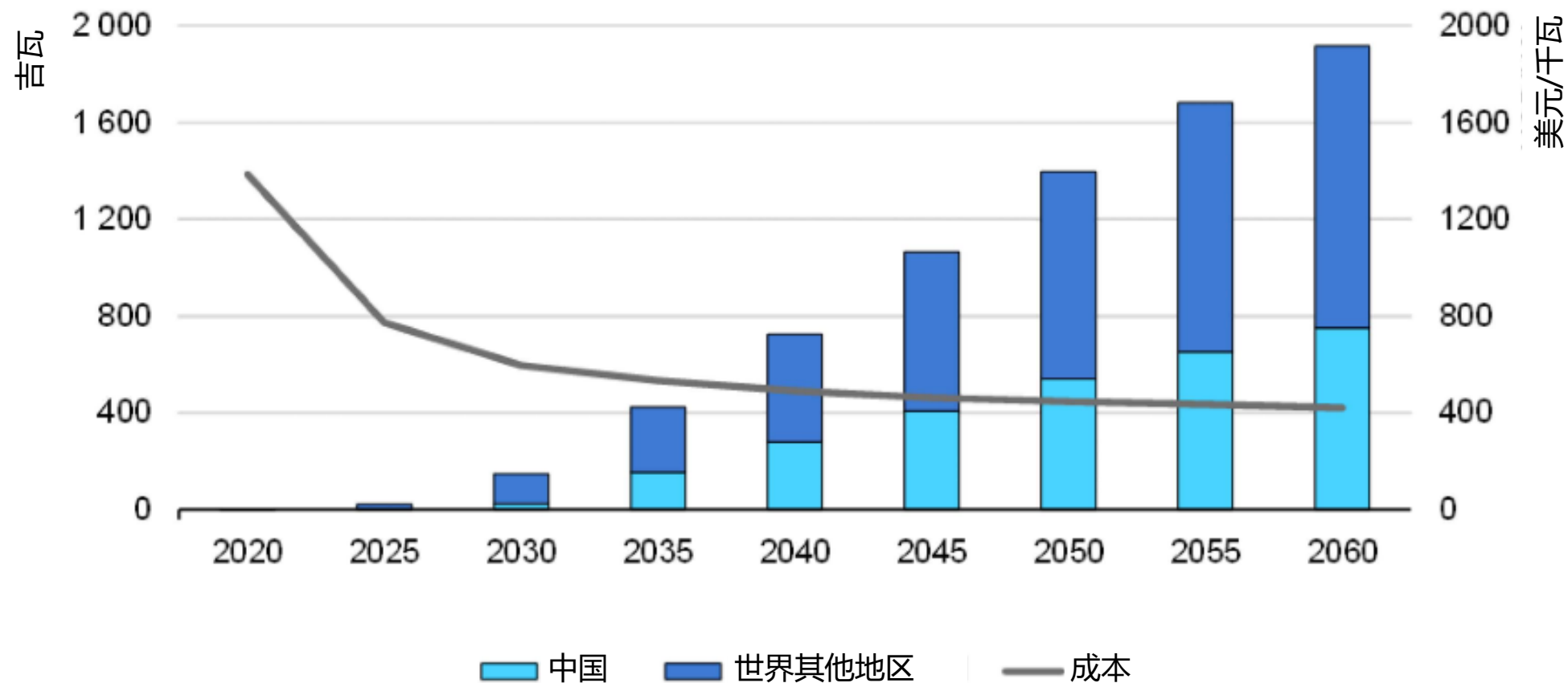
图51 APS情景中2020-2060年间不同成熟度的氢能技术为中国贡献的累计碳减排量
(单位：十亿吨CO₂)



- ◆ 低碳电力电解制氢是一项商业技术，但需要大规模部署才能具备成本竞争力。结合CCUS进行天然气重整或煤气化制氢是经过验证的技术，但由于成本原因尚未广泛部署。
- ◆ 交通领域燃料电池汽车已可用于乘用车、轻型车和公共汽车，燃料电池卡车还需要进一步发展。用于建筑供暖和发电的氢燃料锅炉和燃料电池已经商用。在电力生产中，燃料电池可用于分布式发电应用，燃气轮机也已具有使用富氢气体的能力。氢基燃料的其他用途也发挥着重要作用，氨作为航运燃料和合成航空燃料仍处于预示范阶段。

13、到2060年中国将占全球电解槽装机容量的40%

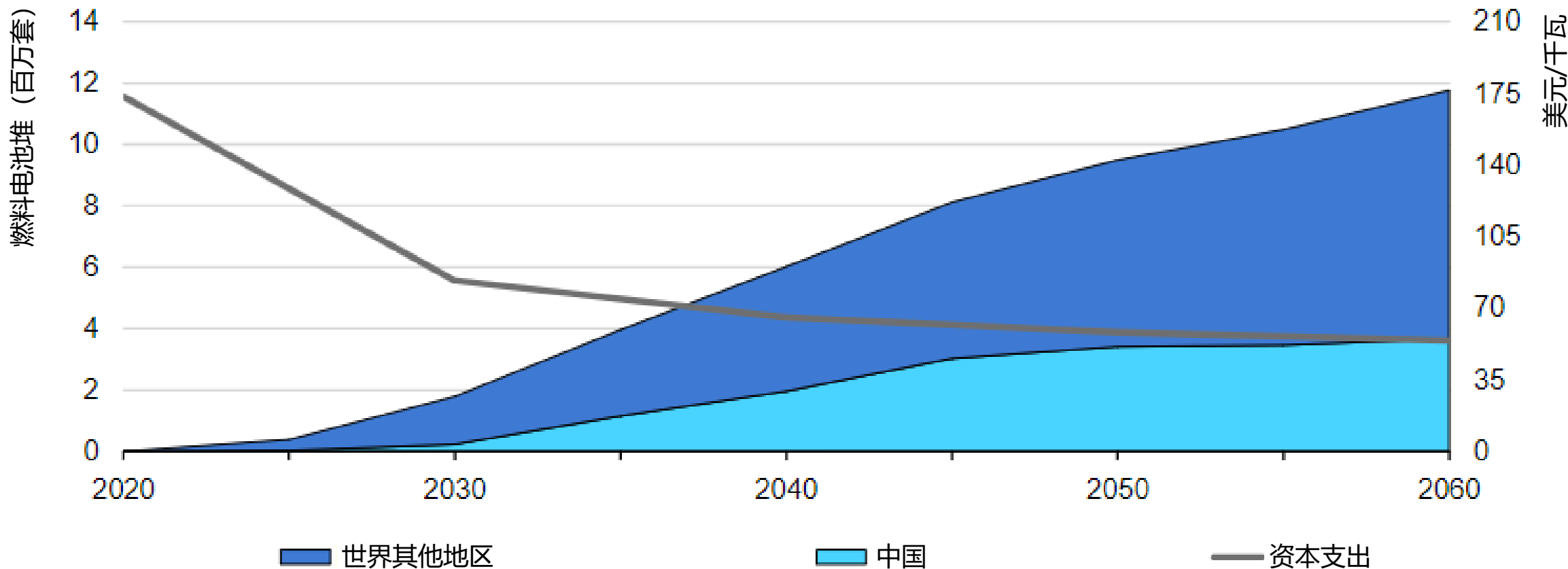
图52 APS情景中全球及中国电解槽容量（单位：吉瓦）和平均资本支出（单位：美元/千瓦）



- ◆ APS情景中，中国电解槽产能将迅速扩大，到2030年达到接近25吉瓦，约占全球产能的15%，到2060年将占全球40%。
- ◆ 电解槽成本将大幅下降，到2030年全球电解槽平均资本成本将低于600美元/千瓦，而目前约为1400美元/千瓦，到2060年将比当前下降70%。

14、需要迅速扩大道路运输用动力燃料电池的需求和生产

图53 APS情景中全球及中国交通燃料电池需求（单位：百万套）和平均成本（单位：美元/千瓦）



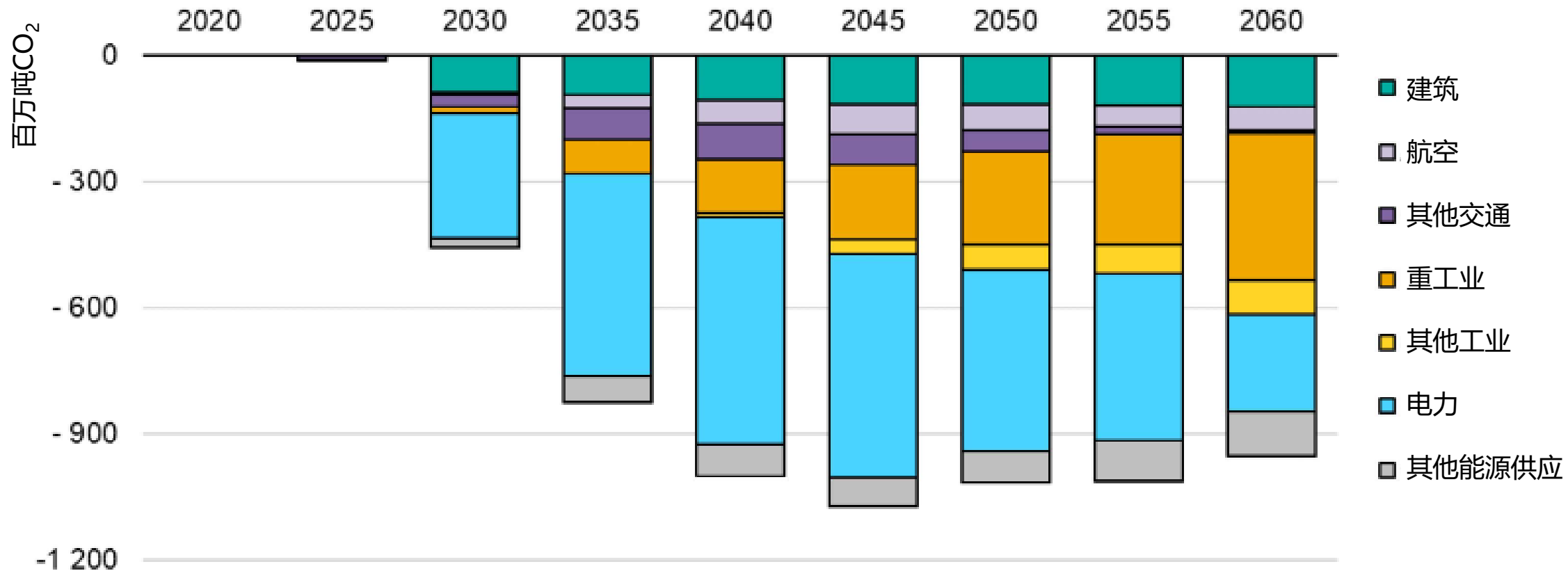
- ◆ 到2030年，中国将占全球燃料电池汽车需求的10%以上，有助于促进燃料电池成本下降。预计到2030年，中国燃料电池的平均成本将从目前约175美元/千瓦下降到约80美元/千瓦，到2060年将降至50美元/千瓦。
- ◆ 通过创新继续减少载铂量，将使2060年中国燃料电池汽车部署的铂族金属需求减少80%以上，反之则将增加约140%的铂族金属需求。

15、广泛采用氢和氢基燃料需要改造和新建基础设施

- 目前，中国只有大约100公里的专用氢气管道，都是产业集群私有。
- 确定和发展各地区最合适的基础设施需要仔细规划，但存在一些短期机会，例如使用槽罐车短距离运输液氢。
- **将氢气掺混到现有天然气网**中可以作为在发展氢气专用基础设施的同时建立低碳供应的一种方式，但需要制定天然气网络混氢的国际统一安全标准和国家法规。
- 在技术可行的情况下，**改造现有的高压输气管道**来输送纯氢是中国的另一种选择，这将有助于创建一个国家氢网络来连接供应与需求中心。
- 还需要**开发新的专用氢气管道**应用于产业集群，以确保管道的高利用率。
- **加氢站**是氢基础设施的另一个重要组成部分。中国拥有世界第二大加氢站网络，已有100多座加氢站在运营。**APS情景中，到2030年和2060年将分别达到2700座和27000座。**

16、到2060年生物能源将成为中国第三大一次能源

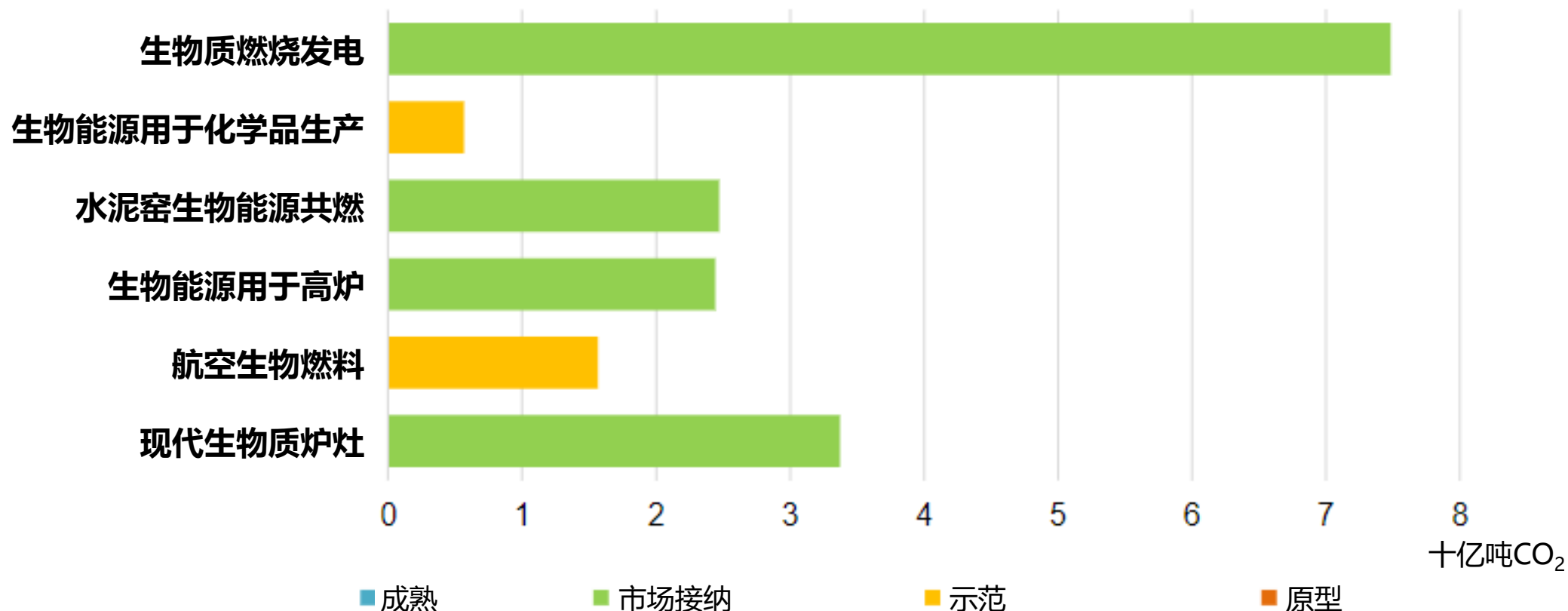
图54 APS情景中现代生物能源对中国碳减排的贡献 (单位: 百万吨CO₂)



- ◆ 到2060年，生物能源在能源需求总量中的占比将增加一倍多，达到13%以上，成为中国第三大一次能源。
- ◆ 可持续生物能源的使用将贡献碳减排量的近7%。大部分生物能源将用于发电和供热，包括在工业中，其中相当大的一部分结合CCUS成为负排放技术。液体生物燃料在交通中的应用也显著增长。

17、到2060年生物能源贡献的累计碳减排量中近90%来自市场化技术

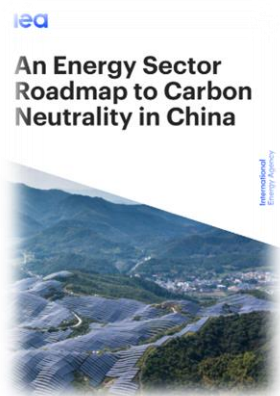
图55 APS情景中2020-2060年间不同成熟度的生物能源技术为中国贡献的累计碳减排量
(单位：十亿吨CO₂)



- ◆ 许多生物能源供热和发电技术，例如小型供热和烹饪以及垃圾焚烧发电厂，已经处于市场接纳或商业化阶段，将为2021-2060年生物能源累计碳减排量贡献90%。
- ◆ 一些与道路运输和工业供热相关的技术处于市场接纳阶段或早期商业化阶段，其他生物能源技术仍处于示范阶段甚至原型阶段。

18、各种形式扩大生物能源将需要大量额外的基础设施

- 就生物燃料而言，将需要许多**生物质原料储存设施**，尤其是广泛分布、低密度的作物和林业残留物。生物质原料的储存至关重要，中国的示范纤维素乙醇原料工厂的供应链可靠性存在问题。
- 此外，还需要用于**分类清洁废物和残渣原料的大型设施**。例如，用于沼气的城市固体废弃物必须与非生物材料分离，而农作物和林业残留物在送往生物燃料工厂之前需要清除污垢、石头和其他污染物。
- 对于生物甲烷，需要建造新的**分配管线和注入点**以掺混到天然气中。由于粪便和作物残留物等原料分布广泛且运输成本高昂，因此生物甲烷工厂很可能位于原料来源附近，从而增加了对管网连接的需求。此外，可以收集有机肥（作为厌氧消化中沼气的副产品生产）并输送给当地农场。
- 需要建立基础设施来支持BECCS在生物燃料生产和生物质发电中的部署。



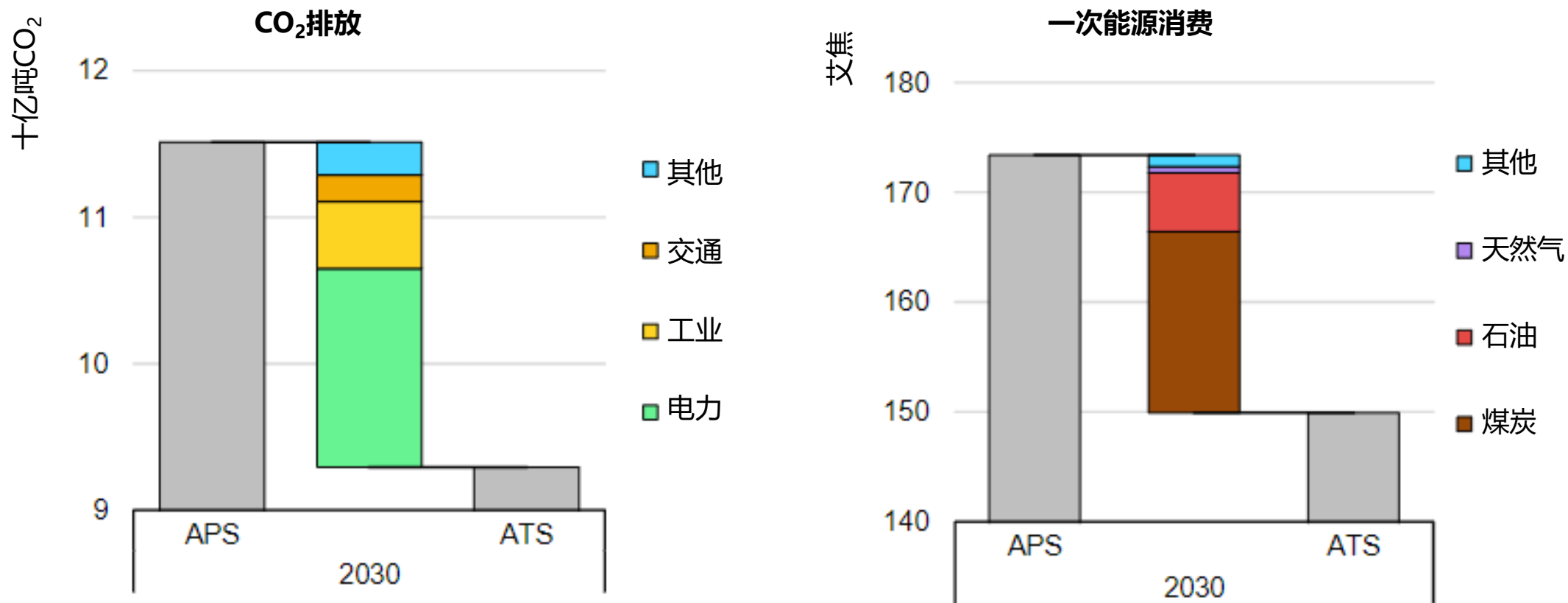
更快速能源转型的近期机遇

1、加快实现2030年碳减排目标可以减少2030年以后的减排负担

- 碳达峰的时机和水平，以及达峰后的减排速度，对于中国实现碳中和的长期目标至关重要。
- 中国拥有的技术能力、经济手段和政策经验，**可以比APS情景更快实现2030年的清洁能源转型目标**。中国最近推出的碳排放交易市场和电力市场改革就是两个明显的例子。
- 在“加速转型情景”（ATS）中，政策进程加快将推动电力和工业中的煤炭消费量更快下降，现有低碳技术得到更有力的部署和更快的能效提升。到2030年，ATS情景中能源体系的CO₂排放量将比现有水平降低20多亿吨，减少近20%。
- 投资需求不是一个主要障碍，**ATS情景所需的累计投资与APS情景相当**。

2、ATS情景中到2030年中国经济碳强度将年均下降67%

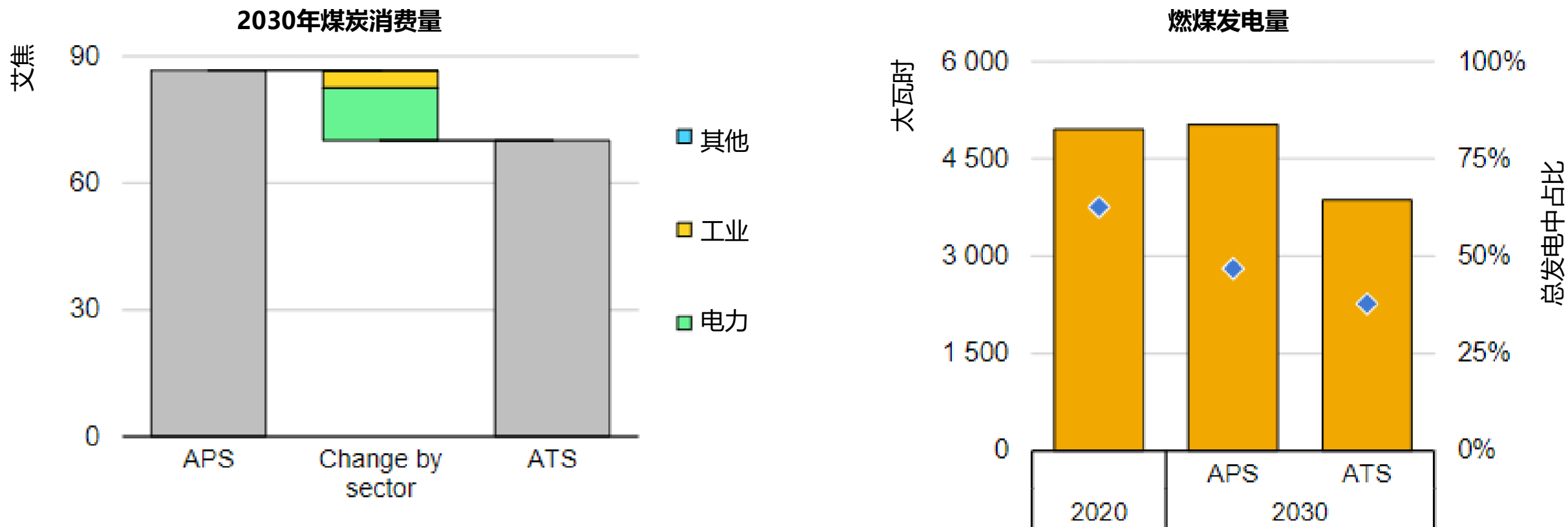
图56 APS和ATS情景下2030年中国能源体系碳排放（单位：十亿吨CO₂）和一次能源消费（单位：艾焦）



- ◆ 2020-2030年，ATS情景下中国经济碳强度（单位GDP碳排放）以平均每年67%的速度下降，而APS情景下仅为4%；ATS情景下的能源强度（单位GDP能源消费）年均下降4%，APS情景为3%。
- ◆ ATS情景下，到2030年非化石燃料在一次能源中占比将从2020年的15%增至26%（APS情景为23%）。

3、ATS和APS情景中的排放差异主要源于煤炭消费不同

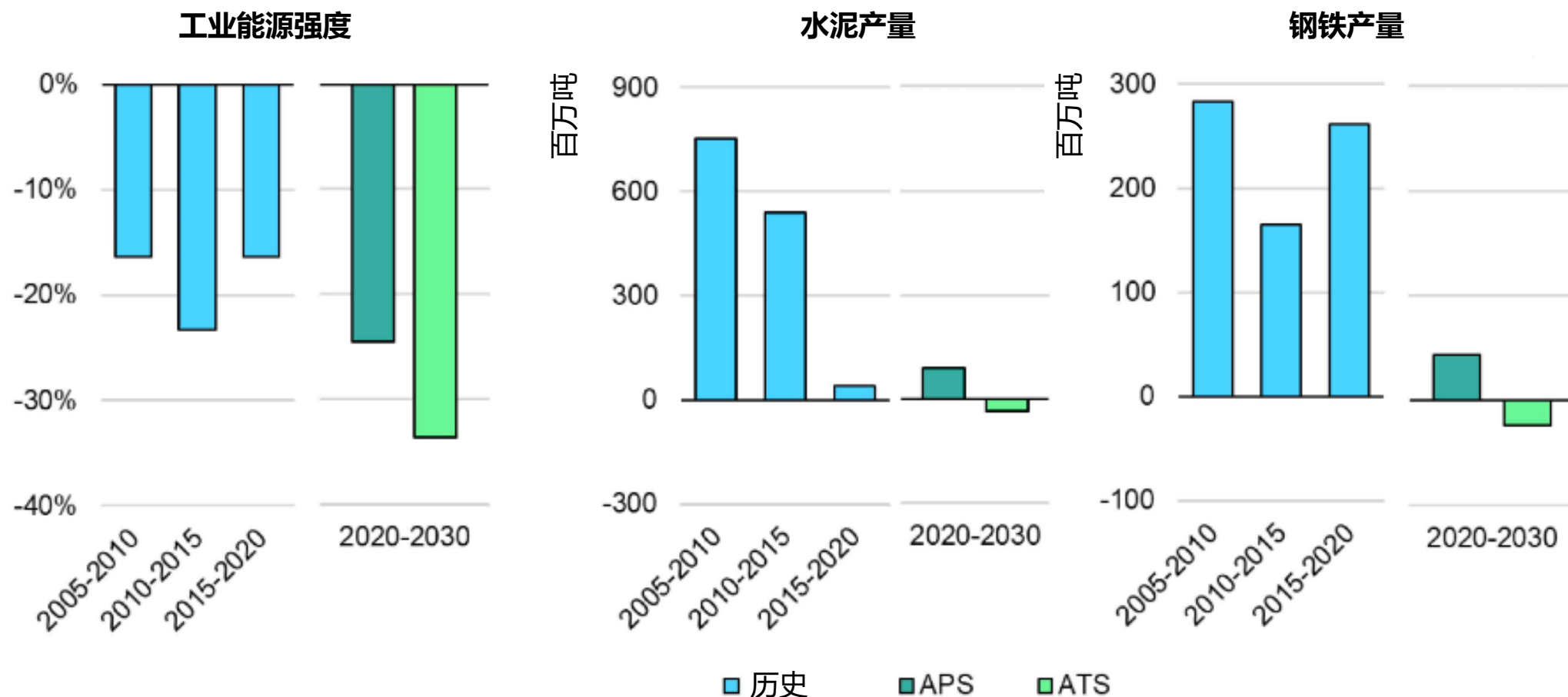
图57 APS和ATS情景下到2030年中国煤炭消费（单位：艾焦）和燃煤发电量（单位：太瓦时）



- ◆ ATS情景下，中国煤炭消费将在短期内增加，然后到2030年降至70艾焦，比APS情景低近20%，其中近7成源于电力部门煤炭消费量的减少。
- ◆ 2020-2030年，ATS情景下中国燃煤发电量下降超过20%，而APS情景下则增加1%。

4、材料和能源效率提升将促进工业能源强度的进一步下降

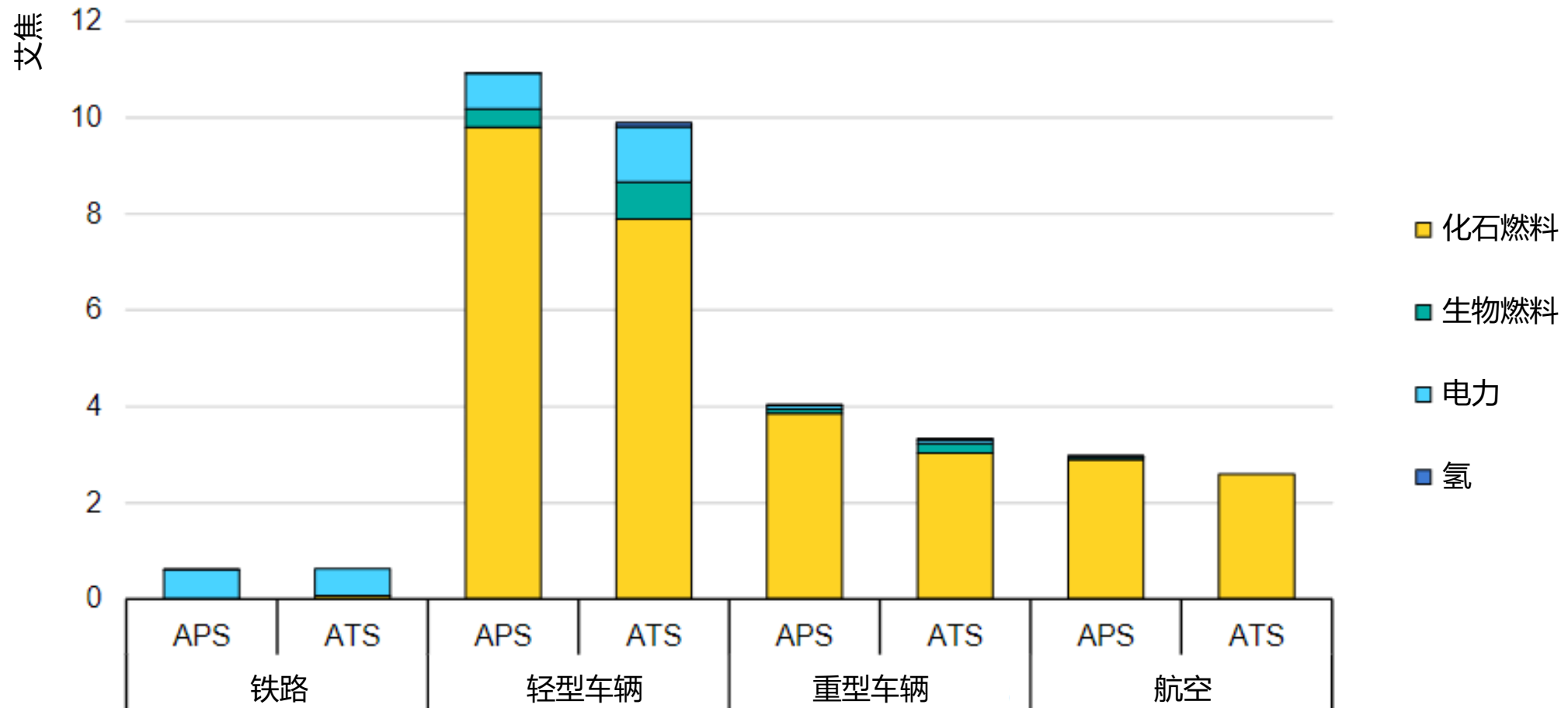
图58 APS和ATS情景下到2030年中国工业能源强度的年均变化（单位：%）及大宗材料产量（单位：百万吨）



- ◆ 与APS情景相比，ATS情景中工业能源强度降速较快，主要源于技术改进导致的材料和能源效率的提高。
- ◆ ATS情景下，到2030年中国水泥和钢铁产量将比2020年减少约2%（APS情景中为增加4%）。

5、减少车辆出行和推广低碳模式将使到2030年交通化石燃料消费再下降20%

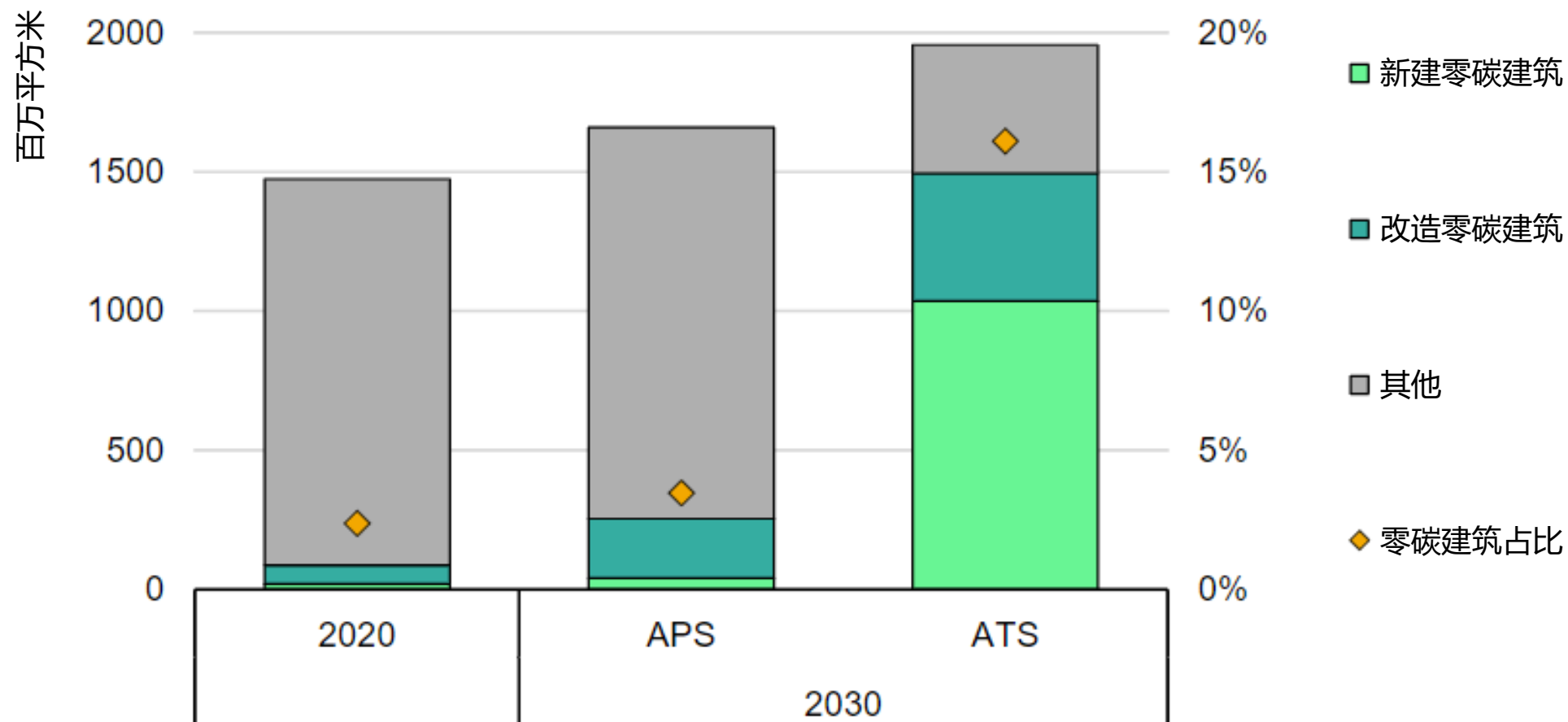
图59 APS和ATS情景下到2030年中国交通燃料需求 (单位: 艾焦)



◆ ATS情景中，通过设计城市和交通系统以减少车辆出行，以及鼓励使用更低碳的出行方式，到2030年交通部门化石燃料使用量将比APS情景低近20%。

6、ATS情景中到2030年中国零碳建筑占比将达16%

图60 到2030年中国新建和改造零碳建筑情况

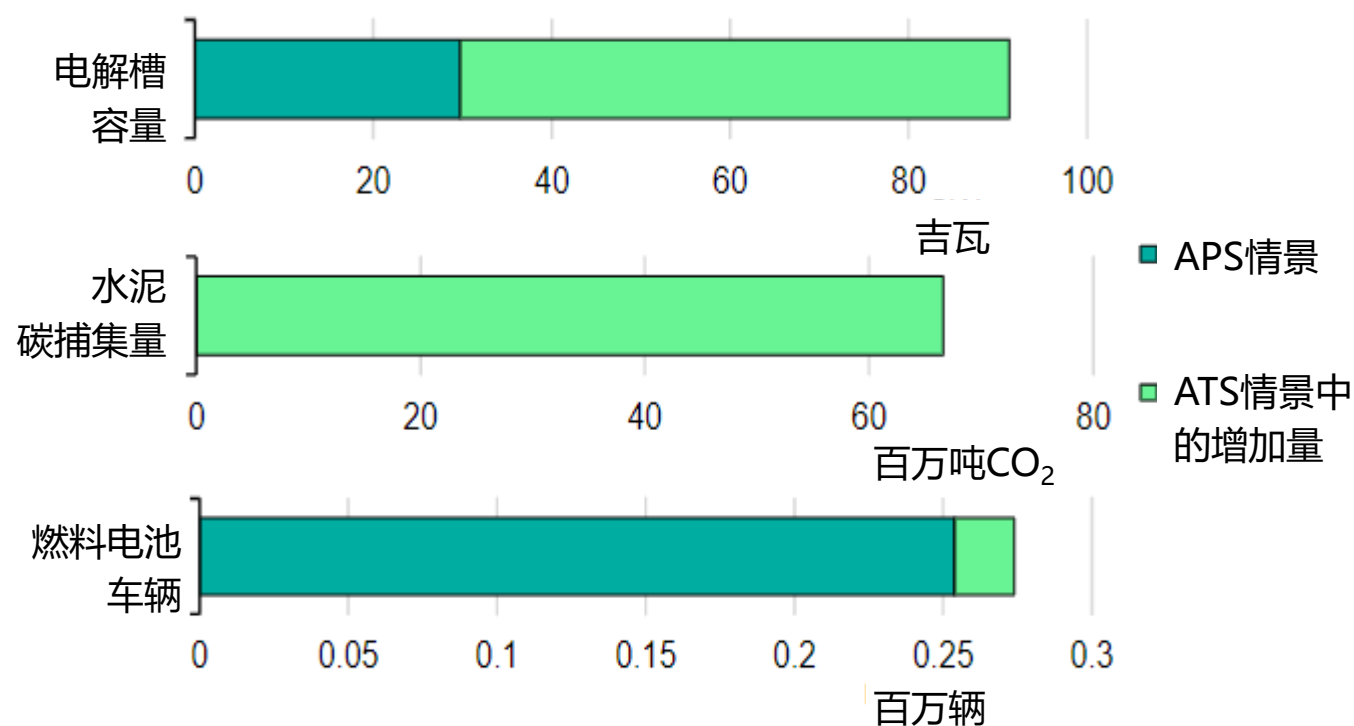


- ◆ ATS情景中，到2030年更严厉的政策措施将使建筑能源需求比APS情景低5%，直接排放低16%。
- ◆ 到2030年，ATS情景下中国零碳建筑将占总建筑面积的16%，是APS情景的4倍多。

7、加快实现2030目标所带来的社会经济效益不仅限于应对气候变化

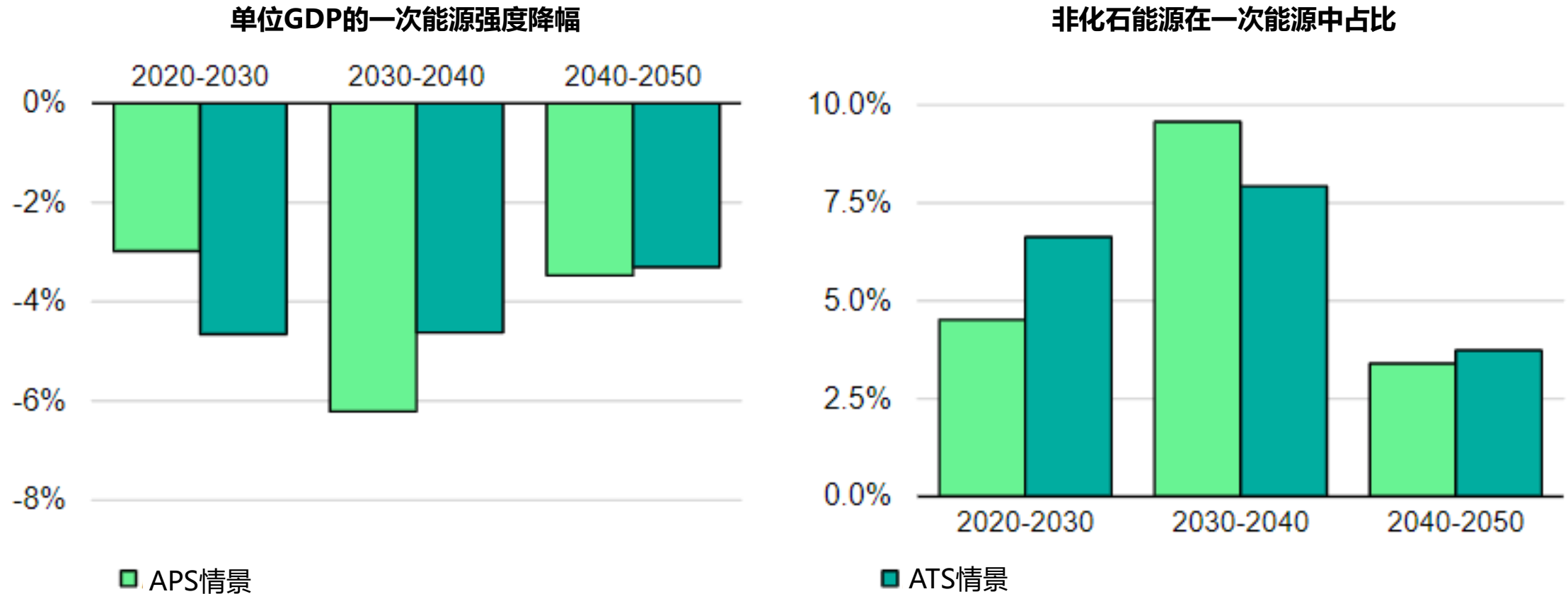
- 加快实现2030目标能够为尚未充分受益于中国经济发展的地区带来更大的繁荣，**中国在全球清洁能源技术价值链中将发挥核心作用，并逐渐成为清洁能源创新的领袖。**
- 到2030年，加快国内行动将使中国清洁能源供应领域的就业岗位增加360万，而在化石燃料供应和化石燃料电厂减少的就业岗位为230万。在ATS情景中，净增长就业岗位比APS情景多出近100万。如果其他国家清洁能源技术需求更多，而中国能抓住这种机会，还会增加更多就业岗位。

图61 APS和ATS情景下到2030年部分清洁能源创新技术在中国的部署情况



8、加快清洁能源转型将使中国更容易实现2060年碳中和目标

图62 到2050年中国能源体系达到净零排放的一次能源强度年均降幅和非化石能源在一次能源中占比



- ◆ 中国能源体系可能需要在2050年就达到净零碳排放，以弥补更难消除的非能源部门排放，并实现到2060年温室气体的净零排放。因此，在2030年之前加快碳减排进度变得至关重要。
- ◆ 转型带来的长期挑战是巨大的。例如，如果要在2050年就实现净零碳排放，新增光伏和风能装机容量将达到约1.4万亿瓦，比APS情景下2050年水平高约20%。

iea

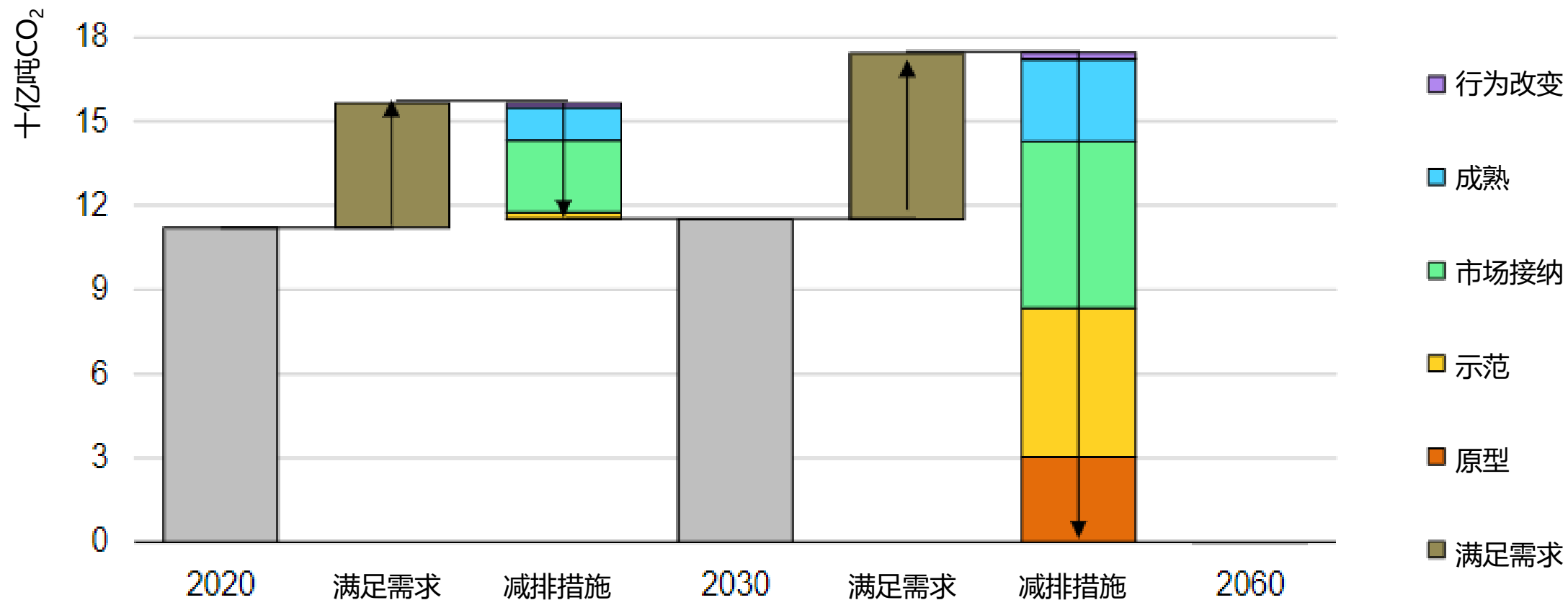
An Energy Sector
Roadmap to Carbon
Neutrality in China



中国碳中和技术创新体系

1、实现净零排放将需要在2030年后广泛使用目前处于原型或示范阶段的技术

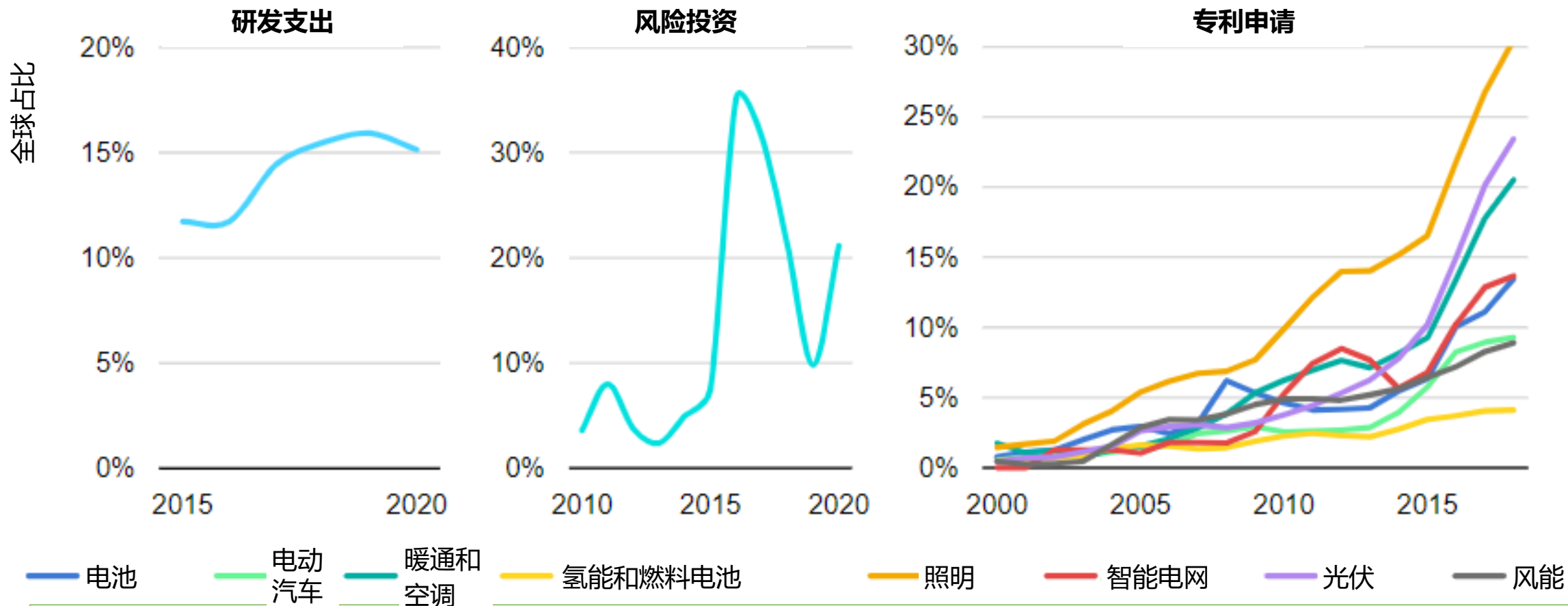
图63 APS情景中按当前技术成熟度划分的中国碳减排量（单位：十亿吨CO₂）



- ◆ APS情景中，与2020年相比，到2030年当今市场上可用的技术将提供所需的大部分碳减排量，到2060年40%的减排量将来自目前正在开发的技术。
- ◆ 目前处于示范或原型阶段的技术对2060年的减排贡献在重工业和长途运输中最高，主要是电气化、氢能、CCUS和先进生物燃料相关技术。

2、中国在低碳能源研发方面的公共支出约占全球15%

图64 中国在全球低碳能源研发公共支出、风险投资和专利申请方面的占比



- ◆ 中国的创新对清洁能源领域产生了显著影响，极大促进了太阳能光伏、动力电池和发光二极管的成本下降。随着基础科学能力的提高，中国对产品和设备改进的贡献不断增加，特别是在超超临界燃煤发电、煤炭转化、超高压输电和核电方面。中国现在处于光伏、电池、电动汽车、氢能和数字技术进一步发展的前沿。
- ◆ 2020年，中国占全球能源研发公共支出的1/4，占低碳能源研发支出的15%。

3、中国能源创新体系的特点

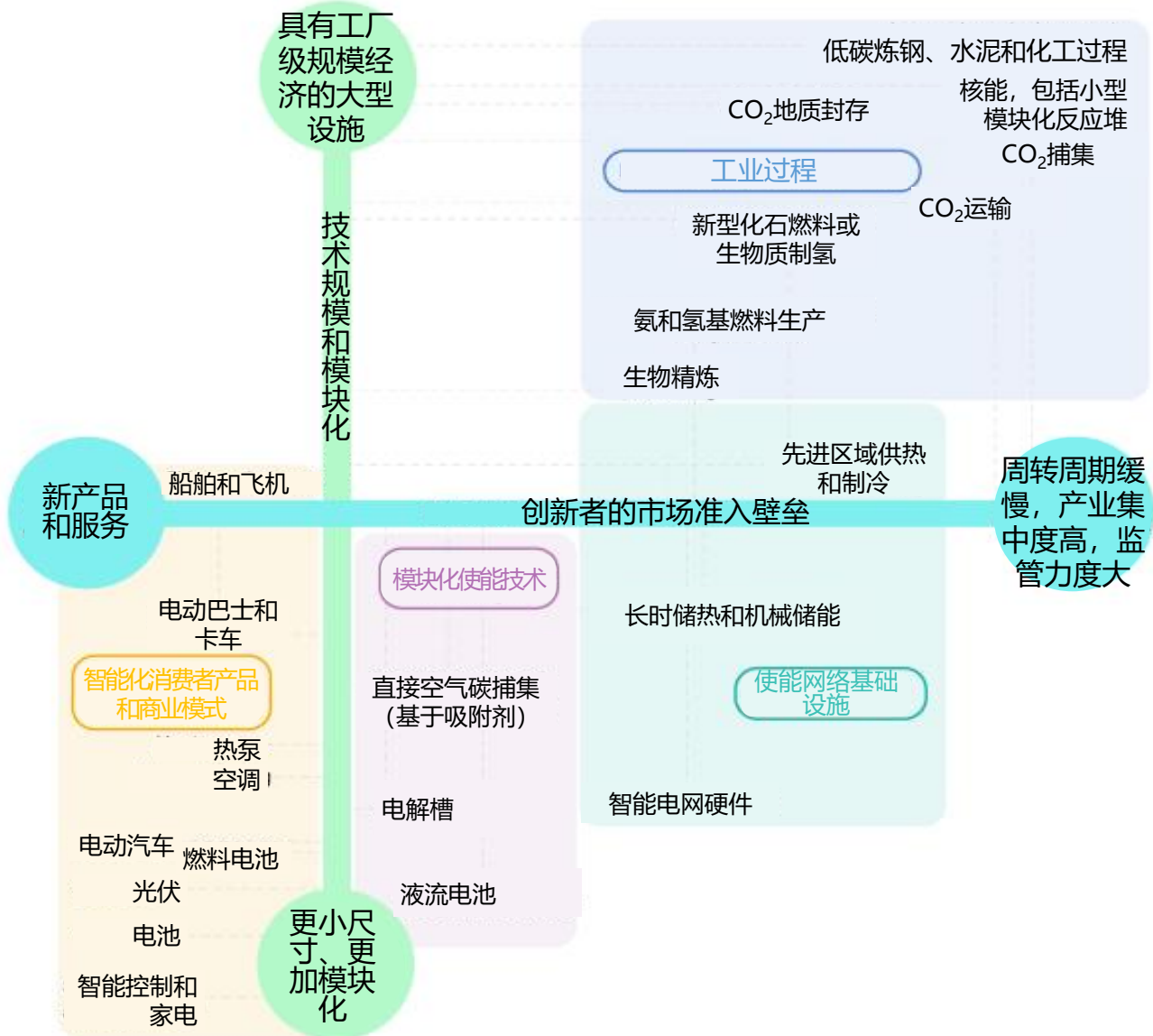
■ 中国的技术创新体系有其独特的特性，可总结为**五个特征**：

- 调动资金用于国家战略性任务。
- 将创新职责下放给国有企业。
- 赋权省市市政府进行试验和竞争。
- 从广阔的国内市场中获益，分散风险，保持竞争。
- 促进国际合作以加速学习，尤其是企业之间的合作

■ 过去十年，核电、高压输电、煤炭转化、电池、电动汽车、氢能等重点发展的能源技术都在一定程度上受益于这一体系。这些特征建立了一个**在目标设定上高度集中而在目标实现上相对分散的框架**，为政策制定者和企业提供了相当大的灵活性，可以快速、大规模进行实验。同时，国有企业、私营企业、大学和省市市政府有很大的空间来确定目标、承担风险并开展探索。国家和省级经济体的庞大规模尤其促进了这一点，对于失败的容忍度也高于世界其他地区。**特别是在数字技术方面，中国的市场规模和新产品的采用速度有潜力带来颠覆性变革。**

4、低碳能源技术的大规模部署需要不同的政策激励措施1/2

图65 根据规模和模块化等属性以及市场准入壁垒划分的低碳能源技术



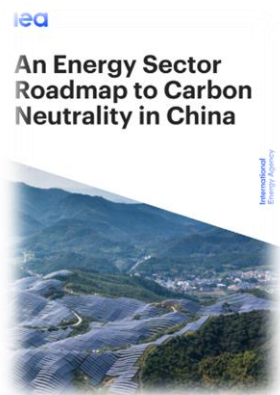
政策是推进中国能源创新的核心，针对具备不同属性的低碳能源技术，需采用不同政策工具：

- ◆ 小尺寸、短周期以及高度标准化、模块化和大规模生产的技术，包括智能控制、家电和低碳汽车等，其市场准入门槛低，可通过政策鼓励企业间的竞争。
- ◆ 低碳工业过程、模块化反应堆、低碳燃料和CCUS等技术前期投资大、工厂级规模、每年只有少数项目投产，需动员国企和大型企业调整研发计划并负责大规模示范。
- ◆ 实现最终部署所需的中上游使能技术，包括电解槽、电池和直接空气碳捕集等，通常为模块化批量生产，需要更强有力的政策激励来投资研发和制造。
- ◆ 另一类非模块化使能技术，包括储热和机械储能、区域供热和制冷以及智能电网硬件，通常由受到高度监管的垄断企业负责，通过公共研发和使用商业试验台来示范新理念对于加速技术改进至关重要。

4、低碳能源技术的大规模部署需要不同的政策激励措施2/2

表2 根据规模和模块化等属性以及市场准入壁垒划分的低碳能源技术

低碳技术类型	加速创新所需的资本投入	中国能源创新体系的相关特征	2021-2025年可能采取的政策工具
新产品和服务	<ul style="list-style-type: none"> 早期试验的拨款和税收减免 风险投资和成长股权 制造工厂贷款 推进市场测试的企业和实验室合作伙伴关系 	<ul style="list-style-type: none"> 在广阔的内部市场中分散风险和保持竞争 竞争性省市试点 	<ul style="list-style-type: none"> 区域部署目标 与性能相关的采购奖励 创业奖励 提供公共和国有企业实验室进行产品测试和验证 鼓励企业与大学建立合作伙伴关系
模块化使能技术	<ul style="list-style-type: none"> 稳定的公共研发资助 风险投资和成长股权 制造工厂的贷款或拨款 推进市场测试的企业和实验室合作伙伴关系 	<ul style="list-style-type: none"> 在广阔的内部市场中分散风险和保持竞争 竞争性省市试点 国际合作 	<ul style="list-style-type: none"> 行业路线图和绩效目标 省市试点和试验设施 公共采购以增加需求 创新奖励 基础技术国际研发项目 提供公共和国有企业实验室进行产品测试和验证
使能网络基础设施	<ul style="list-style-type: none"> 稳定的公共研发资助 企业风险投资 现场试验和商业规模项目资助 	<ul style="list-style-type: none"> 为国家战略优先事项提供资助 将职责下放给国有企业 国际合作 	<ul style="list-style-type: none"> 全行业路线图和绩效目标 具有第三方准入条件的基础设施公共投资 鼓励企业间技术合作 网络试点和试验的开放获取知识共享 与绩效目标挂钩的基础设施升级投资激励措施 互惠参与国际技术试验
工业过程	<ul style="list-style-type: none"> 长期研发和示范的公私共同资助和税收减免 企业风险投资 	<ul style="list-style-type: none"> 为国家战略优先事项提供资助 将职责下放给国有企业 国际合作 	<ul style="list-style-type: none"> 全行业路线图和绩效目标 协调和差异化的国有企业技术战略和目标 国家重大科技项目和开放获取示范点 公共采购以增加需求 通过认证促进低碳产品国际贸易



◆ 实现碳中和的政策建议

1、通过全面的政策行动促进能源体系向碳中和转型1/2

■ 首要挑战是制定全面的碳中和政策框架：

- 通过全面的政策框架，引导投资转向清洁能源技术，转变商业模式并加速创新，同时确保能源安全和可负担性。
- 向碳中和过渡为中国提升技术价值链、创造可持续的经济新增长点并增强对全球清洁能源转型的贡献提供了机会。

■ 制定明确的能源系统转型长期战略：

- 该战略涉及关键部门和技术的长期路线图，需要明确近期优先事项并跟踪实现中期目标的进展。
- 应将该战略纳入国家、省和地方各级规划。

■ 利用广泛的政策杠杆：

- 政策杠杆包括中国碳排放交易系统，以及持续的能源市场改革，包括燃料定价机制和逐步取消化石燃料补贴，以促进发展新的商业模式。
- 法规和标准等监管工具，以及加大对技术研发和示范的公共支持，对于引导投资转向低碳技术也很重要。

1、通过全面的政策行动促进能源体系向碳中和转型2/2

■ 政策行动的一个重点是减少现有化石能源资产的排放：

- 通过更有效地运营现有化石能源资产来减少排放，转向低碳燃料，使用碳捕集设备对其进行改造，并在经济可行和社会可接受的情况下尽早退役。
- 在商业化早期阶段，还需要政府干预来加速采用清洁能源技术。

■ 大量投资新建和升级基础设施：

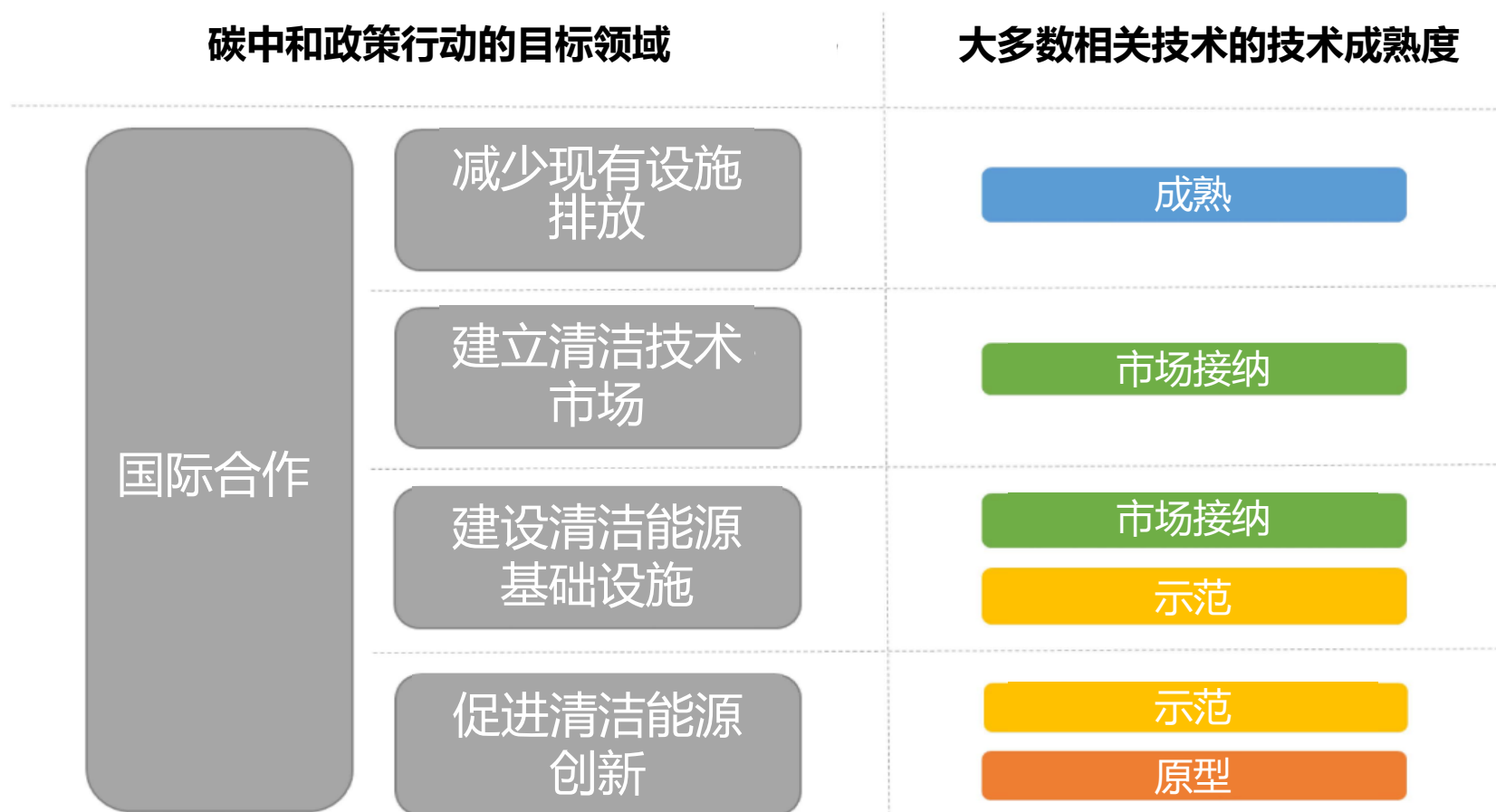
- 碳中和能源转型将需要对新建和升级网络基础设施进行大量投资。中央和省级政府需要协调规划过程，为基础设施建设提供资金，建立明确的监管框架，并确保基础设施的平等和可负担。

■ 新兴技术创新对于实现碳中和至关重要：

- 除了直接提供研发资金，还可以通过竞争性利基市场、基础设施投资和其他监管措施来激励创新者，以推动技术部署。
- 在开发和部署清洁能源技术方面开展更多国际合作对于促进中国和其他地方向碳中和过渡至关重要。

2、支持碳中和的能源政策应围绕五项核心措施并考虑技术成熟度

图66 按技术成熟度划分的中国净零排放战略政策重点



- ◆ 由于清洁能源技术处于不同的成熟阶段，政策措施需要根据所针对的技术特点量身定制，才能发挥作用。
- ◆ 能源政策的五项核心措施为：1) 减少现有能源相关基础设施排放；2) 培育新的清洁能源技术市场；3) 建设清洁能源基础设施；4) 促进清洁能源创新；5) 与其他国家在清洁能源技术方面合作。

3、促进关键领域清洁能源创新的政策举措1/2

- **CCUS技术是创新政策重点关注的领域之一。该技术非常适合通过国家重大科技项目促进创新，政府还可通过激励措施协调多个部门和实体的示范项目。此外还需要：**
 - 进一步探索潜在碳封存资源，并将详细结果广泛提供给研究和开发人员。
 - 超越示范项目，整合潜在市场，聚集跨行业企业，探索共同的挑战和政策机制来支持投资。
 - 建立CCUS创新中心，以设计和快速验证新技术，尤其是碳捕集技术，同时在研发资助和设施使用方面引入更多竞争。
- **改进氢气供应、分配和使用的技术组合是确保获得投资的核心。氢能技术将跨越多个部门，并可能与CCUS结合，政策应鼓励化工、钢铁等行业主要国企的研发创新，支持工业中心低碳制氢商业规模项目，促进氢动力重型运输技术和商业模式的开发和示范。还应考虑：**
 - 促进工业过程对低碳氢的需求，例如通过对炼油、钢铁和氨行业的强制性低碳氢配额。
 - 在国际和多边倡议和项目中发挥主导作用，以确保技术进步和并分享经验教训。
 - 优先支持基础研究领域，以提高电解槽、燃料电池和储氢等技术的性能并降低制造成本。
 - 支持为氢气生产、运输和分配制定统一标准和碳核算方法的国际行动。

3、促进关键领域清洁能源创新的政策举措2/2

- **在重工业中，通过氢能、CCUS和电气化来促进脱碳仍有很大的发展空间。可通过全国性的协调计划推动各省份、国有企业对上述技术开展实践，并为国家标准和法规提供信息。除了支持研发项目，还可以：**
 - 激励制造商及其供应商设定雄心勃勃的技术目标并进行创新。
 - 支持潜在突破性技术的基础研究，例如目前处于原型阶段的铁矿石电解和电气化水泥窑。
 - 为产业创新者打造创新孵化器，保护知识产权，将其与潜在的产业客户和投资者联系起来。如果新技术不适合现有企业，还可以帮助其建立新企业。
 - 参与重工业脱碳相关国际项目和财团，尤其在工业产能迅速扩大的国家，并进行广泛的知识共享。
- **新的能效技术（包括智能负荷管理、节能数字验证、热泵和标准化改造等）具有巨大的潜在市场。政府应确保企业家获得资本和商业技能，建立竞争性和繁荣的受监管市场，并为研发提供资金，以加速这些领域的创新。此外，还应支持建立省或市级电动汽车和氢能试验区以获得实践经验。**



《洁净能源重大信息专报》

编辑出版：中国科学院武汉文献情报中心
联系地址：武汉市武昌区小洪山西25号（430071）
联系人：陈伟 郭楷模 岳芳 汤匀
联系电话：（027）87199180
电子邮件：energy@whlib.ac.cn