

# 支持碳中和实现的 能源转型之路

基于能源政策模型 (EPS CHINA 2024)

2024年11月

# 前言

坚定不移地推动“双碳”目标的实现，不仅是我国的长期战略目标，也是应对全球气候变化的郑重承诺。这一任务既复杂又充满挑战，它对社会经济各领域都提出了深度转型和创新的要求，即通过促进经济结构优化升级，迈向高质量发展阶段。

我国温室气体排放及能源需求的长期趋势会受到多种因素的影响，理解及评估社会经济政策及措施变化的影响需要科学的分析和多角度的研判。iGDP 模型团队采用中国能源政策模型（Energy Policy Simulator China iGDP 2024，下文简称 EPS China 2024）<sup>[1]</sup>，对我国 2020 年至 2060 年能源消费及温室气体排放趋势进行情景分析。情景设置紧扣我国碳达峰、碳中和“1+N”政策体系（简称：“1+N”政策体系）及未来发展趋势，评价主要政策组合在不同时间阶段、不同实施力度的碳减排潜力，识别支持“双碳”目标实现的政策路径，为未来低碳转型政策体系的完善提供量化分析基础。

在近三年的研究过程中，我们与国内外专家、学者、行业领袖进行了广泛深入的交流和验证，不断借鉴最新成果，更新参数，力求研究成果的科学性与时效性。同时，我们也认识到，经济社会的发展充满了不确定性，任何模型都存在其固有的局限性。iGDP 通过建模研究，试图采用不同视角和方法分析我国温室气体减排趋势及路径，促进业界的交流和讨论，并期望此项研究成果可以为进一步完善我国绿色低碳政策体系提供支持和参考。

iGDP 模型团队近期将推出的研究技术报告《中国中长期温室气体排放情景分析报告》，总结了研究的阶段性分析结果。本文的内容摘自于该报告，主要聚焦于展现支持碳中和实现所需要的全经济范围和关键部门政策路径与机遇。

分析发现，我国正在实施的“1+N”政策体系可以支持我国在 2030 年前碳排放达峰并有望推动部分指标超额完成。要实现 2060 年前“碳中和”，我国各领域“1+N”政策体系还需要持续强化。与二氧化碳相比，非二氧化碳温室气体的近零排放面临更大的技术和政策挑战。以现有的最佳技术与政策措施实践下，也较难实现非二氧化碳温室气体近零排放。

本研究识别出了未来应重点关注的政策领域，包括：终端部门的电气化和能效提高、电力低碳转型、碳定价机制以及甲烷和含氟气体的管控等。加速建筑、工业、交通部门电气化水平是实现深度减排的基础，与此同时，还需坚持不懈地提升终端用能部门的能效水平，在有效控制终端能源消费总量的前提下，推动能源结构的清洁化和低碳化。电力系统的低碳化始终是温室气体减排的最重要抓手，也是实现碳中和的先决条件。碳定价机制将在 2035 年前发挥明显的减排效益。非二氧化碳温室气体减排，尤其是甲烷和含氟气体（包括 SF<sub>6</sub> 和 PFC 等）的管控，对我国在 2060 年或更早实现碳中和目标至关重要。

# 目 录

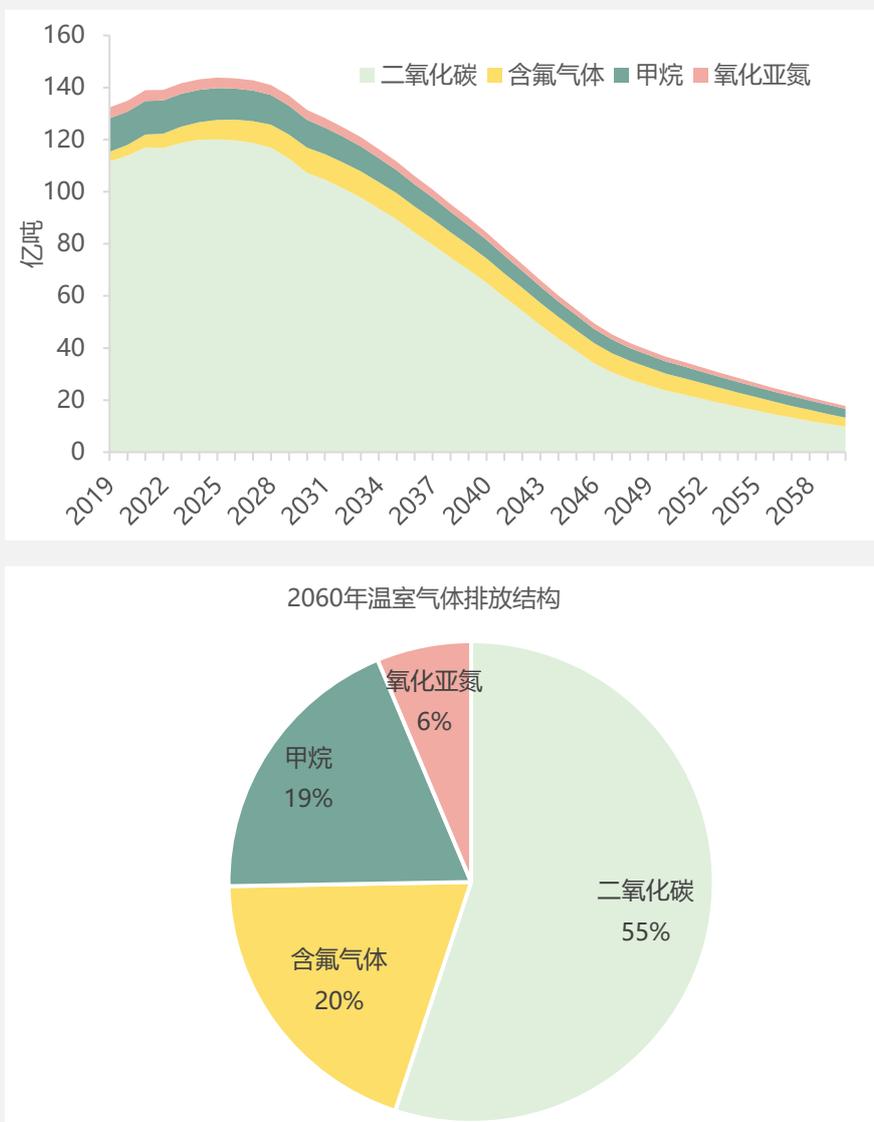
<b>碳中和情景展望 .....</b>	<b>1</b>
温室气体排放.....	1
一次能源消费结构.....	2
电力结构变化.....	2
终端部门电气化 .....	3
<b>强化低碳发展目标.....</b>	<b>4</b>
“1+N”政策可提前实现二氧化碳达峰，并降低峰值水平 .....	4
达峰后深度减排有赖于“1+N”政策体系的持续强化和落实.....	4
<b>关键重点措施与减排政策路径 .....</b>	<b>6</b>
减排政策路径.....	6
2030 前重点减排措施 .....	7
2035 重点强化减排措施.....	7
<b>关于情景 .....</b>	<b>12</b>
<b>参考文献 .....</b>	<b>13</b>
<b>机构和作者介绍 .....</b>	<b>14</b>
关于 iGDP .....	14
报告主要作者（按姓名首字母排序） .....	14
报告贡献作者及在 iGDP 模型团队中角色（按姓名首字母排序） .....	14
引用建议 .....	14
免责声明 .....	14

# 碳中和情景展望

## 温室气体排放<sup>1</sup>

不考虑碳汇的影响，在中和情景下，二氧化碳和全部温室气体排放在 2030 年前达峰；到 2060 年，温室气体排放约为 18 亿吨，相对峰值下降 88%。2060 年温室气体排放中包括二氧化碳排放约为 10 亿吨，非二氧化碳温室气体（后文简称“非二气体”）约 8 亿吨，相对峰值下降率分别达到 92%和 67%，二氧化碳基本实现近零排放，而在现有的技术与政策措施最佳实践下，非二气体近零排放还有较大差距（图 1）。

图 1 中和情景温室气体排放趋势及 2060 年排放结构

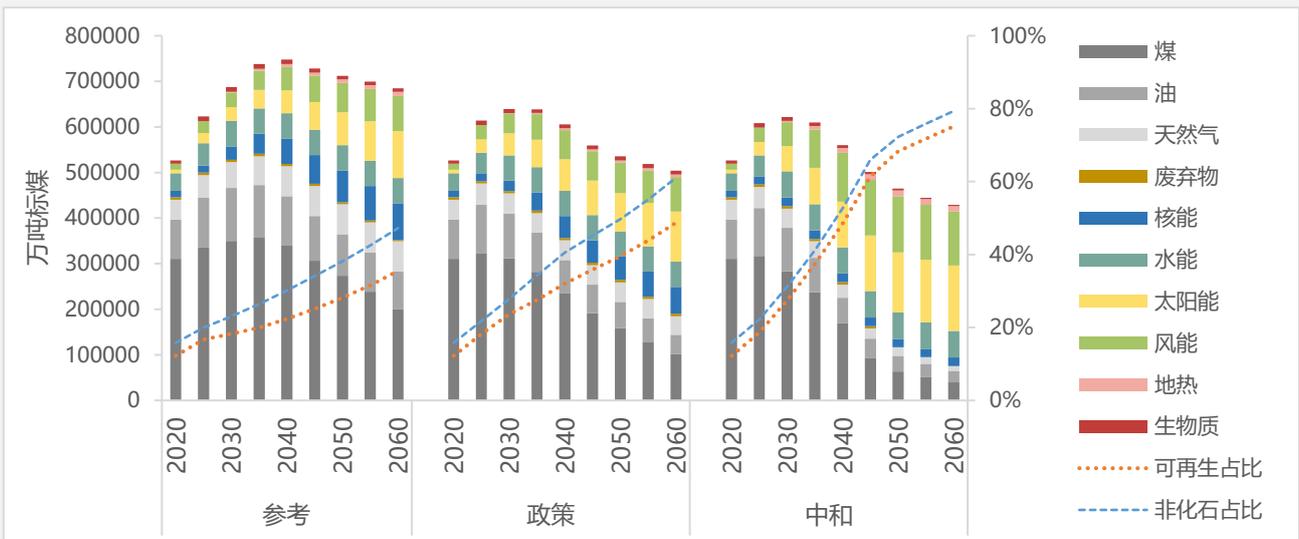


<sup>1</sup> 除非特殊说明，本报告中温室气体排放不包括碳汇

## 一次能源消费结构

如图 2 所示，在中和情景下，在可再生发展和电气化率等共同作用下，非化石能源占比在 2040 年左右超过 50%，2060 年达到 80%左右。可再生能源在一次能源占比在 2030 年达到 27%，2060 年分别达到 75%。更有力度的政策组合将推动煤炭消费占比加速下降，并更有效地降低煤炭消费总量。2021 年一次能源消费中煤炭占比约 56%，中和情景 2060 年下降至 9%左右。

图 2 不同情景一次能源消费结构（发电煤耗法）

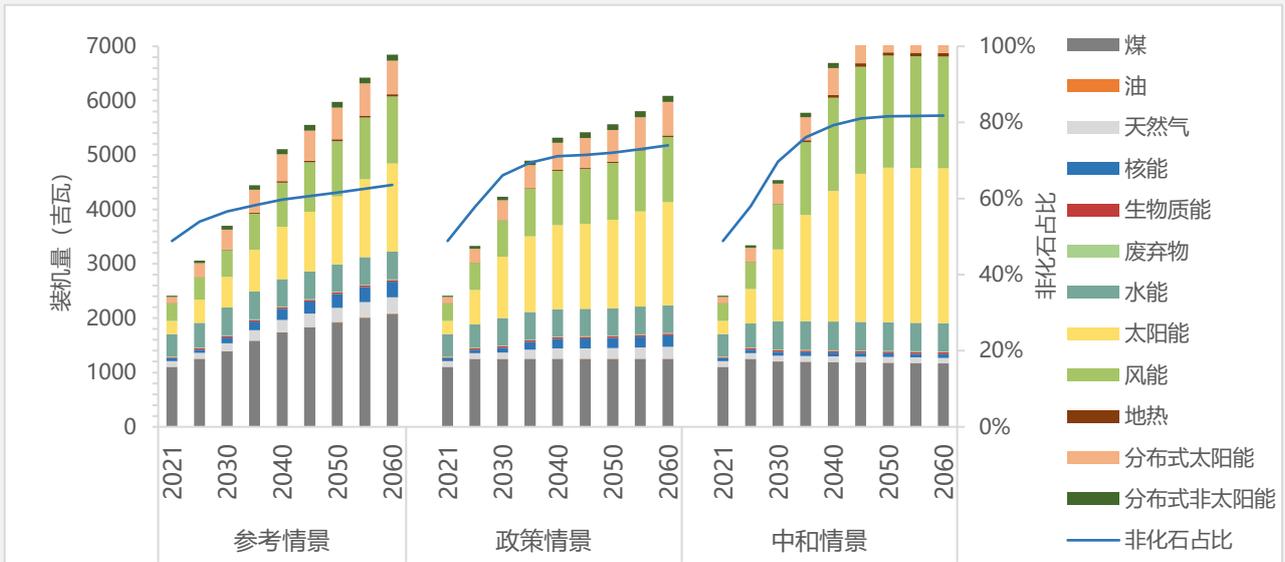


## 电力结构变化

随着生活水平的提高以及终端部门的电气化，电力需求总量将明显增长<sup>[2-5]</sup>。如图 3 所示，到 2030 年，电力需求将比 2020 年增长 50%左右，2035 年相对 2020 年增长 71%左右。

中和情景下，煤电占比在 2027 年左右下降至 50%以下，非化石能源发电量在 2028 年左右超过煤电发电量；非化石能源发电量占比在 2030 年达到 56%左右，2060 年达到约 91%；风光装机在 2030 年达到约 2516 吉瓦，2060 年超过 5500 吉瓦，核电装机约 70 吉瓦。

图 3 不同情景发电装机结构



### 终端部门电气化

在中和情景下，终端电气化率 2030 年上升到 38% 左右，2060 年上升到 77%。分部门来看，中和情景下，2060 年工业、建筑、交通部门的电气化率分别达到 71%、98%、75%；建筑基本全面电气化（表 1）。

表 1 各情景终端电气化率<sup>2</sup>

部门	参考情景				政策情景				中和情景			
	2020	2025	2030	2060	2020	2025	2030	2060	2020	2025	2030	2060
工业	27%	29%	30%	40%	27%	30%	33%	52%	27%	31%	33%	71%
建筑 <sup>3</sup>	43%	49%	52%	61%	43%	52%	64%	97%	43%	53%	66%	98%
交通	3%	5%	10%	43%	3%	6%	13%	62%	3%	6%	14%	75%
终端部门	27%	30%	32%	47%	27%	31%	37%	63%	27%	31%	38%	77%

<sup>2</sup> 计算采用电热当量法进行电力消费的折标，工业电气化率不包括原料消费。

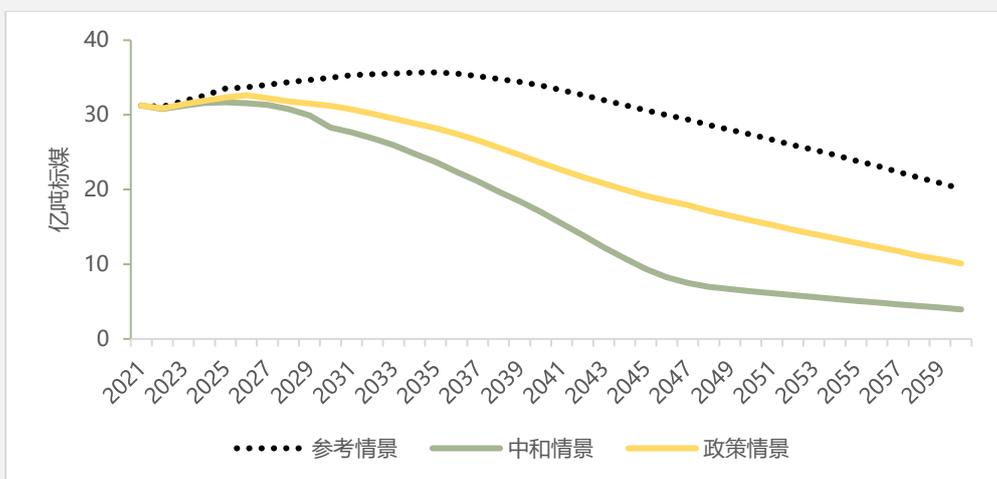
<sup>3</sup> 若无特别说明，本报告中建筑均指建筑运营阶段的能耗和排放。

## 强化低碳发展目标

### “1+N”政策可提前实现二氧化碳达峰，并降低峰值水平

随着“1+N”政策的完善和落实，二氧化碳排放峰值将在2028年前后，之后稳定下降。“1+N”政策加速了煤炭消费尽快达峰和快速下降（图4），有效地控制了二氧化碳的排放。在终端电气化和电力清洁化为主的政策措施推动，煤炭消费已经处于平台波动期，在“十五五”期间开始缓慢下降，“十六五”期间出现加速下降态势（图4）。

图4 煤炭消费量变化趋势

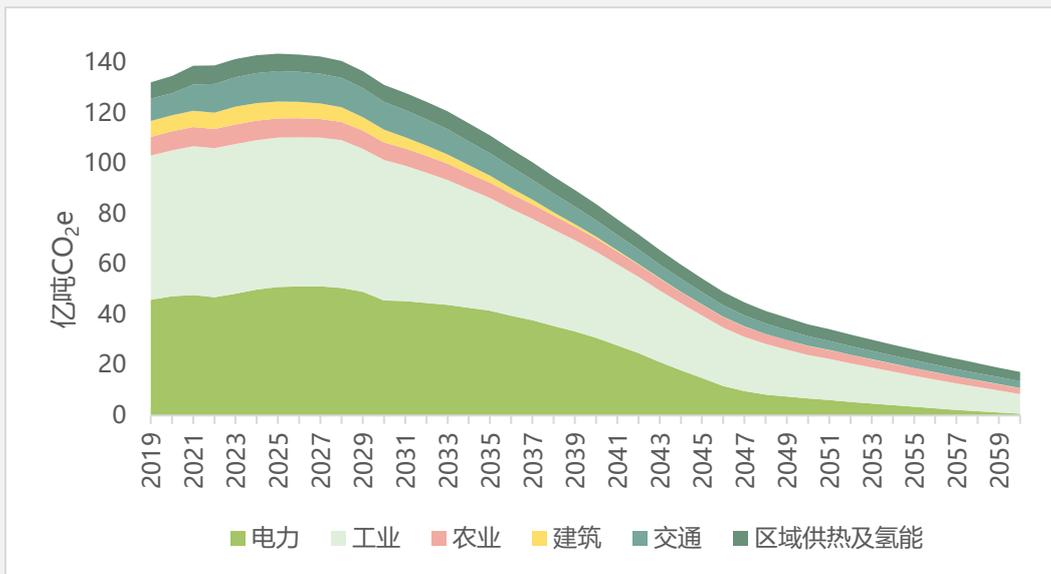


### 达峰后深度减排有赖于“1+N”政策体系的持续强化和落实

研究认为，在“1+N”政策下，2035年二氧化碳排放比2030年排放减少8%，全部温室气体排放减少7%，基本实现“碳排放达峰后稳中有降”的目标，但距离实现碳中和仍有差距。

在中和情景下，政策措施的加强将导致温室气体排放从2028年起显著下降。到2060年，全部温室气体排放相对峰值下降88%左右，其中二氧化碳相对峰值下降92%，可基本实现深度减排目标。相对于二氧化碳，非二氧化碳的近零排放仍将面临较大挑战（图5）。

图 5 中和情景分部门 GHG 排放对比 (亿吨, 包含过程排放)



实现深度减排需强化 2035 年目标。以 2060 年实现碳中和为目标, 中和情景下, 2035 年 GHG 排放相对于 2030 年累计下降率为 15%左右。2035 年二氧化碳排放相对于 2030 年下降 17%左右。具体关键指标情况见表 2。

表 2 2035 年关键指标情况<sup>4</sup>

指标	政策情景	中和情景
2035 年二氧化碳排放相对 2030 年下降率	8%左右	17%左右
2035 年温室气体排放相对 2030 年下降率	7%左右	15%左右
非化石能源占一次能源消费的比重	34%左右	41%左右
非化石发电量比重	56%左右	64%左右
煤炭消费比重	44%左右	39%左右
可再生发电量比重	48%左右	60%左右
风光总装机	26.92 亿千瓦 (2692 吉瓦)	37.2 亿千瓦 (3720 吉瓦)

为加速能源转型, 非化石能源占一次能源比重需在 2035 年达到 40%以上; 煤炭在一次能源消费中占比下降到 39%左右 (表 2)。到 2060 年, 非化石能源占一次能源消费比重需达到 79%左右, 煤炭消费量剩余约 4 亿吨标煤, 占比 9%左右, 剩余煤炭消费主要用于工业原料而非发电。

中和情景结果显示, 2035 年非化石能源发电量占比需要达到 64%, 可再生发电量占比达到 60%; 风电和光伏总装机达到约 3721 吉瓦, 为 2023 年的 3 倍多。到 2060 年, 非化石燃料电源占发电量比重需达到约 91%, 可再生发电量占

<sup>4</sup>GDP 预测采用 OECD 预测, 历史值来自国家统计局; 电力消费的折标采用电热当量法。

比达到 87%左右；风电和光伏装机达到 5521 吉瓦左右，非化石电源装机量占比达到约 82%，相比政策情景需显著提升。

## 关键重点措施与减排政策路径

### 减排政策路径

根据模型结果分析，值得关注的重点政策包括终端部门电气化和提高能效、电力低碳转型、碳定价以及甲烷和含氟气体的管控等。这些政策措施的实施时间及力度如表 3 所示。

表 3 关键减排政策及时间表

时间段	排放目标	重点政策及行动 (按时间段累计减排贡献排序) <sup>5</sup>
2024 到 2030 年	二氧化碳尽早达峰	<b>2030 年</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>建筑电气率达到 60%以上</li> <li>可再生能源占发电量大于 40%</li> <li>工业各行业相对 BAU 节能量提升约 2%~4.5%</li> <li>工业电气化率达到 33%左右</li> <li>大力推广高星级建筑和超低能耗/近零能耗建筑</li> <li>碳价达到 130 元/吨，碳市场 2025 年起覆盖工业部门</li> <li>交通电气化率达到 13%，新能源汽车销售量渗透率中客运达到 65%，货运约 25%</li> </ul>
2030 到 2035 年	二氧化碳排放大幅下降	<b>2035 年</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>可再生能源占发电量达到 60%</li> <li>工业各行业相对 BAU 节能量提升约 7%~14%</li> <li>在 2025 年水平上，城镇公共和居民建筑节能水平提高 20%~30%，大力推广高星级和超低能耗/近零能耗建筑</li> <li>建筑电气化率达到 75%左右</li> <li>工业电气化率达到 40%左右</li> <li>交通电气化率达到 28%，新能源汽车销售量渗透率中客运达到 65%，货运约 25%</li> <li>碳价达到约 157 元/吨，碳市场进一步扩围至建筑和交通部门</li> <li>通过延寿等提高材料使用效率，减少工业产品需求</li> </ul>
2035 到 2045 年	GHG 排放稳定大幅下降	<b>2045 年</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>可再生能源占发电量达到 82%</li> <li>工业电气化超过 50%</li> <li>在 2035 年水平上，城镇公共和居民建筑节能水平提高 20%~30%，全面推广超低能耗/近零能耗建筑</li> <li>建筑电气化率约为 95%</li> <li>工业各行业相对 BAU 节能量提升约 18%~35%</li> <li>化工、水泥、钢铁过程排放开始配备工业 CCS</li> <li>交通电气化率达到 58%左右</li> <li>强化含氟气体减排措施，特别是 HFCs 外含氟气体管控</li> </ul>
2045 到 2060 年	逐步实现 GHG 净零排放	<b>2060 年</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>可再生能源占发电量大于 85%</li> <li>工业电气化率达到 70%，高温热源氢能替代</li> <li>化工、水泥及钢铁行业过程 CO<sub>2</sub> 在 2060 年通过 CCS 分别减排 95%、90%、60%</li> <li>剩余化石燃料发电厂全面配备电力 CCS</li> <li>建筑电气化达到近 100%</li> <li>强化含氟气体减排措施，特别是 HFCs 外含氟气体管控</li> <li>交通电气化率达到 75%左右</li> <li>工业各行业相对于 2020 年节能政策力度提升约 29%~55%</li> </ul>

<sup>5</sup>表中电气化率计算中，电力折标采用电热当量法计算，工业电气化率计算不包括非能源利用。

## 2030 前重点减排措施

模型结果显示，“十五五”期间，按照现有政策重点持续推进清洁电力发展、终端电气化和节能政策将带来较好的减排效益。如图 6 所示，从 2025 至 2030 年，发展清洁电力与建筑电气化的减排潜力最大，减排的贡献率均在 20%左右；工业节能和电气化的减排贡献率分别为 18%和 12%左右；建筑节能减排的潜力为 12%左右；交通电气化减排占比约 5%。此外，碳价（7%）和“公转水、公转铁”等交通结构优化措施（2%）也有较为显著的减排效果。

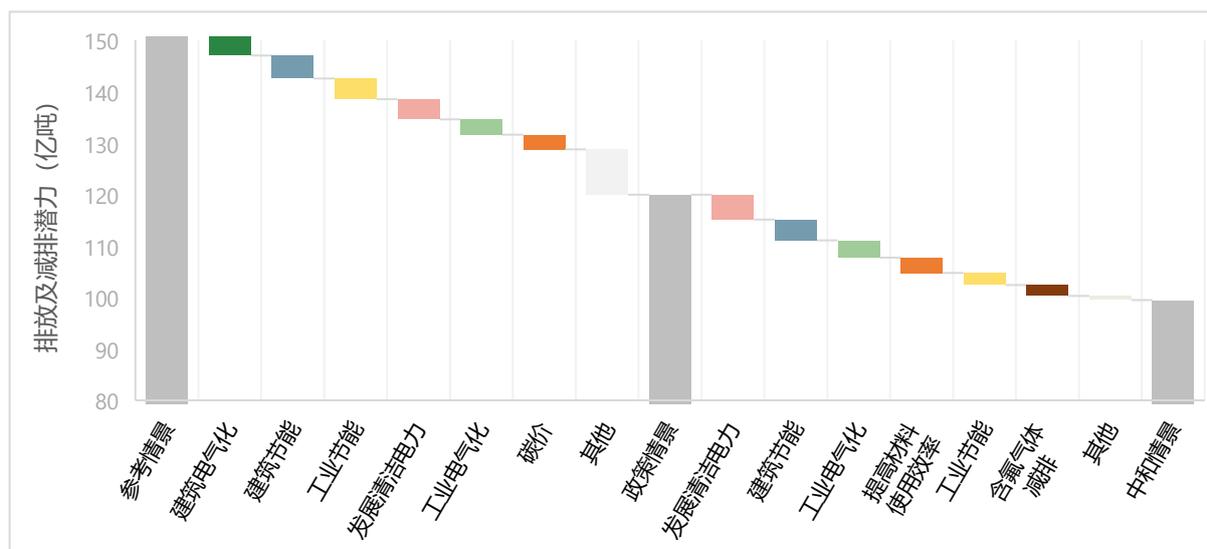
图 6 达峰前 CO<sub>2</sub> 重点减排政策（2025-2030，政策情景与参考情景相比）



## 2035 重点强化减排措施

在政策情景下，2030 年至 2035 年 GHG 排放下降幅度约为 7%，仅达到中和情景的减排量（15%）的一半左右，距离 2060 年碳中和目标仍有较大距离。根据模型中和情景和政策情景间的比较，未来可重点关注非化石发电量比重的进一步提升，加快高星级和超低能耗、近零能耗建筑发展，提升工业电气化率等措施，为进一步增大减排量为碳中和夯实良好基础（如图 7 所示）。

图 7 2035 年 GHG 排放及关键政策减排潜力



比较中和情景和政策情景可以发现，为实现碳中和目标，发展以可再生为主的清洁电力仍是 2031 年至 2060 年最关键的减排措施。2045 年后，电力行业的 CCS 应仅作为补充，为剩余少量支撑性化石燃料发电厂全部配备，以实现电力领域的净零排放。新型电力系统的加速建设将有效减少弃风弃光、增加电力系统的安全和稳定性，抽水蓄能、新型储能和需求侧管理等措施将发挥巨大的减排作用。按照我国现有政策规划，2030 年全国统一电力市场体系基本建成，电力现货、容量和辅助服务市场，以及跨省跨区电力交易机制的逐渐建设与完善，也将进一步优化资源配置，对成本分摊提供有效的疏导途径，推动可再生电力持续发展。

如图 8 所示，终端部门的电气化将至关重要，中和情景与参考情景相比，从 2031 至 2060 年间，工业、建筑、交通电气化及氢能替代总减排贡献率高达约 30%，其中工业电气化及氢能替代占比高达 15%。工业低温热源供应应于 2060 年前全部电气化，由于目前高温热源电气化技术应用仍处于较早阶段，按照目前的可行技术路径，高温热源目前仍将有一部分由氢能替代<sup>6</sup>。我国于 2024 年 4 月出台的《推动大规模设备更新和消费品以旧换新行动方案》<sup>[6]</sup>可作为抓手，推进电气化和高效设备在重点工业行业、建筑和市政基础设施、交通领域的大力推广，提升终端部门的电气化率。

2030 年后，针对非二温室气体，尤其是含氟气体制定减排政策将愈显重要，应尽快强化对 HFCs 之外含氟气体管控的政策要求。含氟气体排放将不断上升，例如，随着空调保有量不断上升，空调使用过程中含氟气体的延迟排放也将增加，

<sup>6</sup>假设到 2060 年中国工业部门燃料完全来自于电力和氢能。假设低温热源 100%实现电气化技术改造，农业和建筑业例外，考虑某些用能需求很难完全电气化，采用 90%的比例。每个行业热源需求实现电气化比例采用 Madeddu et al (2020) 文献分析的欧盟工业部门提供不同温度热源需求可实现电气化比例，无法实现电气化的热源由氢能替代。中和情景下到 2060 年水泥行业氢能替代率 73%，化工、石化和炼焦约 19%，钢铁 81%，橡胶和塑料制造业 53%左右。

此外，电气设备六氟化硫泄露，电解铝行业 PFC 排放等都是含氟气体排放增加的原因。从 2031 年到 2060 年，在 GHG 累计潜力减排量中，含氟气体减排措施减排贡献占 10%左右，膳食结构调整、畜牧业减排和其他甲烷减排政策约占 6%，氧化亚氮约占 1%。

图 8a GHG 重点减排政策 (2031-2060, 中和情景与参考情景相比)

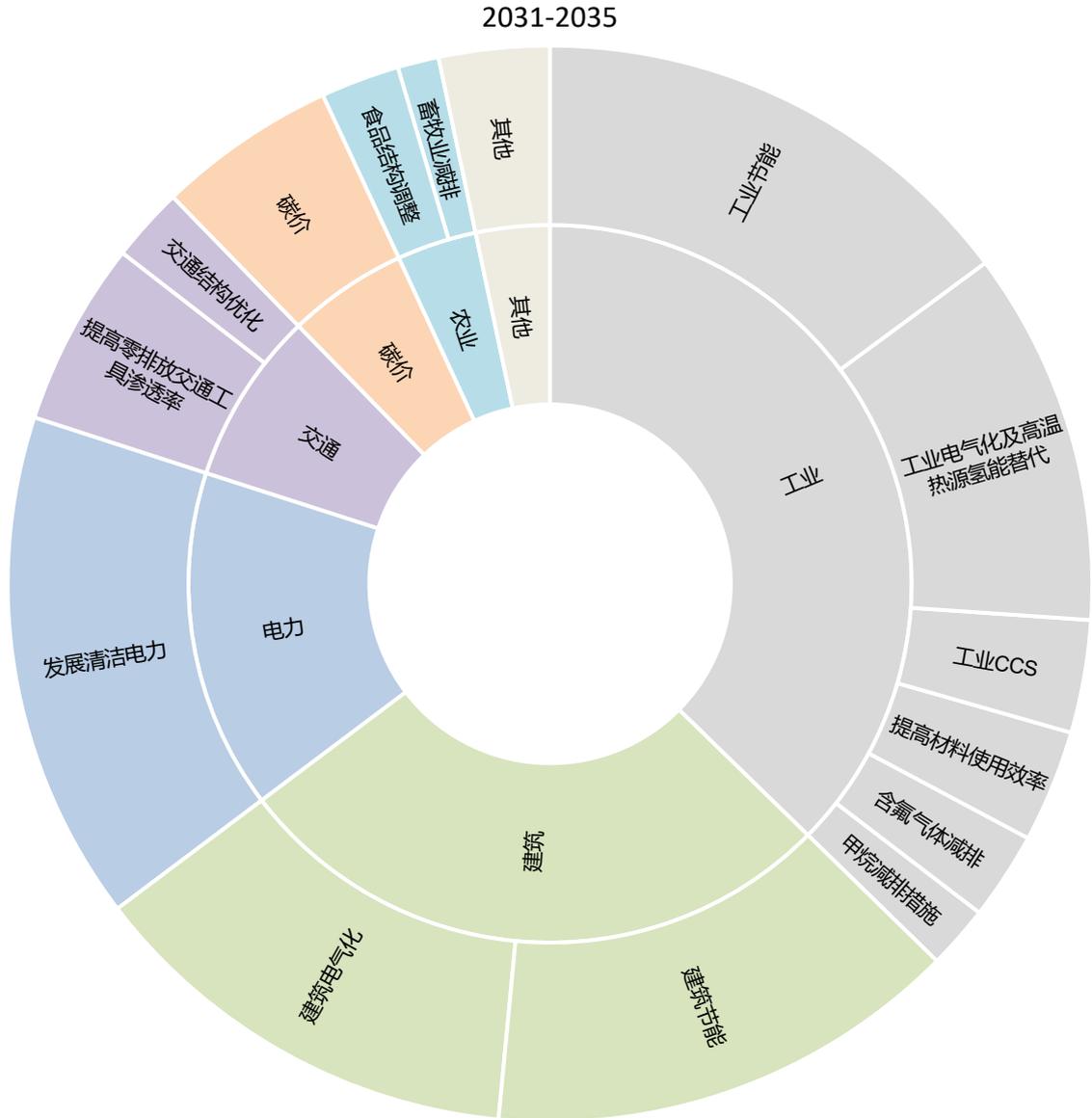


图 8b GHG 重点减排政策 (2031-2060, 中和情景与参考情景相比)

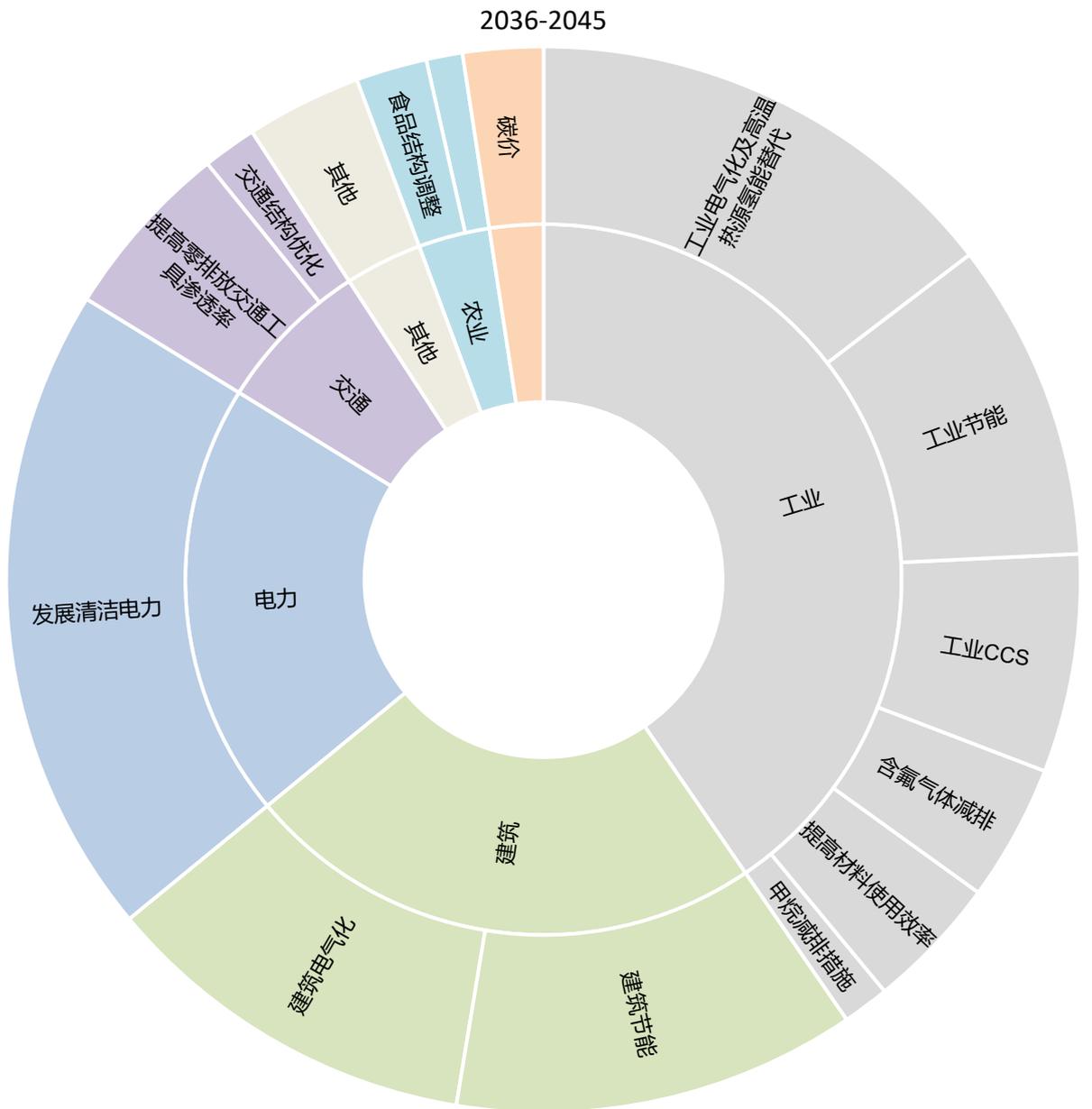
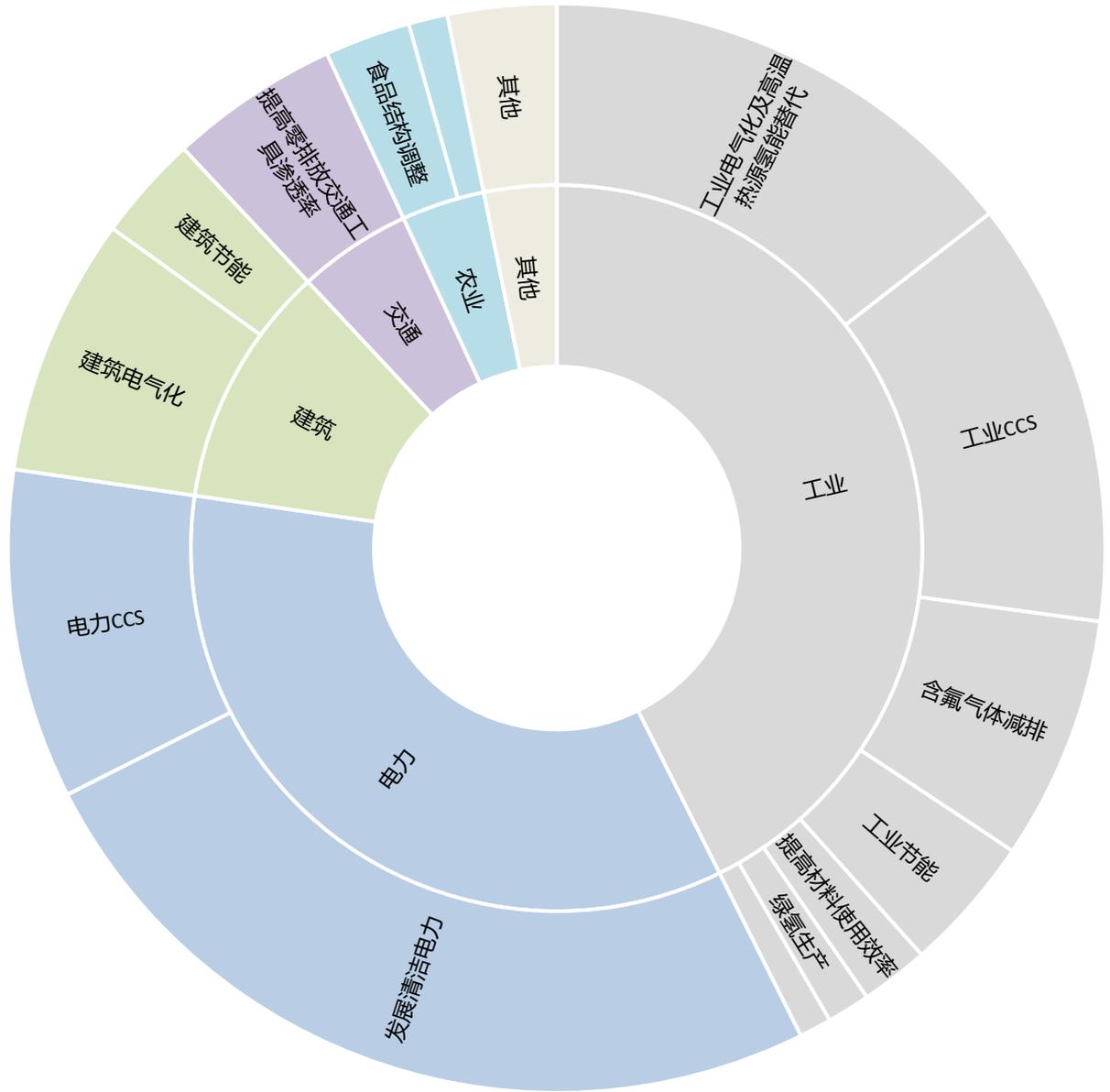


图 8c GHG 重点减排政策 (2031-2060, 中和情景与参考情景相比)

2046-2060



## 关于情景

本研究基年为 2020 年，预测年份 2021-2060 年，设置三个情景模拟能源消费和温室气体减排路径（表 4）。

参考情景反映 2020 年我国“双碳”目标提出前的政策措施和力度的自然延续，未考虑新出台的政策。这个情景用来作为其他情景的比较基线，是不可能发生情景。

“1+N”及十四五政策情景，简称为政策情景，反映了我国“双碳”目标提出后，我国陆续构建起来的“1+N”政策体系以及“十四五”行业规划目标及政策措施，未考虑 2060 年实现碳中和。本情景可以用于评估“1+N”政策体系的减排效果。

碳中和情景，是确保 2060 年我国实现碳中和目标的最佳政策措施组合。本情景用于识别实现碳中和目标的现有政策差距和未来可能的政策重点。

表 4 情景设置

情景	设定
参考情景（BAU）	仅考虑 2020 年“双碳”目标提出前的能源和低碳政策
“1+N”及十四五政策情景 (简称“政策情景”)	在参考情景基础上，纳入自提出“碳达峰、碳中和”目标以来实施的能源和低碳政策，涵盖“1+N”政策体系、“十四五”规划以及其它相关的中长期发展规划。
碳中和情景 (简称“中和情景”)	以 2060 年实现碳中和为目标，综合中国本土最佳实践与国际先进经验，根据技术经济可行性筛选的政策组合。

## 参考文献

- [1] EI, IGDP. 中国 EPS (2024, iGDP) [EB/OL]. <https://energypolicy.solutions/home/china-igdp/en>.
- [2] 国网能源研究院有限公司. 中国能源电力发展展望 2022[R]. 中国电力出版社, 2023.
- [3] 清华大学气候变化与可持续发展研究院等. 中国长期低碳发展战略与转型路径研究[M]. 北京: 中国环境出版集团, 2021.
- [4] 黄震, 谢晓敏, 张庭婷. “双碳”背景下我国中长期能源需求预测与转型路径研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(6).
- [5] 全球能源互联网发展合作组织. 中国 2030 年能源电力发展规划研究及 2060 年展望[EB/OL]. (2021)[2024-01-24]. <https://www.gei-journal.com/cn/wonderfulReportCn/20211209/1468969880752623616.html>.
- [6] 国务院. 国务院关于印发《推动大规模设备更新和消费品以旧换新行动方案》的通知[EB/OL]. [2024-07-22]. [https://www.gov.cn/zhengce/content/202403/content\\_6939232.htm](https://www.gov.cn/zhengce/content/202403/content_6939232.htm).

# 机构和作者介绍

## 关于 iGDP

绿色创新发展研究院(Institute for Global Decarbonization Progress, iGDP), 2014 年成立于北京, 是专注绿色低碳发展的公益性国际化智库。

iGDP 自成立以来, 根植我国绿色低碳实践, 面向全球应对气候变化进程, 服务决策者、实践者、投资者, 通过跨学科、系统性、实证性的研究, 推动能源和气候变化解决方案的科学化和精细化, 与多方合作推动绿色低碳议题的多元化和国际化的沟通, 提供有国际视野和前瞻思考的解决方案及公共知识产品, 为全球可持续发展做出贡献。

iGDP 聚焦气候治理、能源转型、非二温室气体减排、绿色经济等领域, 设立地方气候行动与农食系统绿色低碳转型工作组。团队集合能源系统、气候政策、环境经济等领域专业人才, 与国内外研究机构形成长期战略合作。

团队长期跟进国内绿色外低碳发展实践、清洁能源转型与绿色经济政策, 出版发布百余份专业文章及报告, 涉及碳价格、区域低碳行动评价、城市低碳指数、农食系统可持续发展、非二温室气体减排、公正转型、碳边境调节税等议题。研究成果应用于多种实际需要, 包括: 省级和城市双碳路线图、零碳园区规划、金融机构压力测试、零废弃城市规划、社区低碳行动等。

## 报告主要作者

(按姓名首字母排序)

胡敏、李鑫迪、奚溪、杨鹂

## 报告贡献作者及在 iGDP 模型团队中角色

(按姓名首字母排序)

陈美安	高级项目总监 高级分析师, 负责 EPS 模型非二和农业模块
胡敏	主任 联合创始人, 研究项目统筹
李鑫迪	能源转型项目主任 分析师, 协调项目并负责电力和供热模块
宋曼娇	助理分析师, 负责建筑模块
杨鹂	高级项目总监 高级分析师, 主要负责工业和 IO 模块
袁雅婷	能源转型项目分析师, 负责交通模块
奚溪	模型团队顾问
朱彤昕	农食与非二项目分析师, 负责非二温室气体和农业模块

## 引用建议

绿色创新发展研究院. (2024). 报告摘要: 支持碳中和实现的能源转型之路. 北京: 绿色创新发展研究院.  
<http://www.igdp.cn/wp-content/uploads/2024/11/2024-11-13-IGDP-Report-Summary-Energy-Transition-Pathways-Supporting-China-Neutrality-Based-on-EPS.pdf>

## 免责声明

本报告编写及建模所需要数据和信息均基于公开、可得的数据源, 报告内容是对所研究领域的初步探索, 旨在加强相关领域的讨论交流, 如有不足之处, 敬请谅解并指正。报告中主要结论及观点仅代表作者迄今为止的认识, 不反映作者所属机构以及研究支持方的立场。