

工作论文

iGDP

中国分省碳中和路径研究： 挑战与机遇

2024年11月

关于绿色创新发展研究院 (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。

报告作者 (按姓名首字母排序):

胡敏、李鑫迪、宋曼娇、杨鹏、袁雅婷

报告设计:

包林洁

联系方式:

绿色创新发展研究院 (iGDP): igdpooffice@igdp.cn

引用建议:

绿色创新发展研究院(iGDP).(2024). 中国分省碳中和路径研究: 挑战与机遇. 北京: 绿色创新发展研究院. <http://www.igdp.cn/wp-content/uploads/2024/11/2024-11-13-IGDP-Policy-Brief-China-Provincial-Neutrality-Roadmap-Analysis-Challenges-and-Opportunities.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。

目 录

前 言.....	1
各省低碳发展状况.....	2
经济和碳排放的差异性.....	2
经济与碳排放的脱钩进展.....	3
排放前 11 名省份.....	5
情景分析与方法学.....	6
2030 展望.....	7
二氧化碳排放.....	7
碳强度和可再生能源消费.....	8
部门达峰年份.....	9
重点部门碳排放变化.....	2
2035 和 2060 展望.....	3
高耗能行业二氧化碳排放.....	3
水泥.....	4
钢铁.....	5
有色.....	6
化工.....	7
各省全经济范围温室气体排放.....	8
终端用能电气化变化.....	9
可再生电源发展.....	10
重点减排省份和政策.....	11
结 论.....	14

前言

中国各省份制定中长期碳减排目标及探索低碳转型路径的紧迫性和重要性正变得日益显著。

中国正在构建碳排放总量和碳强度双控制度体系（简称“碳双控”），并分两个阶段实施：“十五五”时期（2026-2030）将以碳强度控制为主，碳总量控制为辅；碳达峰后，以总量控制为主、强度控制为辅。现阶段，建立地方碳排放目标评价考核制度是双控制度体系建设的重要内容^[1]，这包括将碳排放双控指标合理分解至各省份；对各省份开展评价考核；推动各省建立碳排放预算管理，按年度开展碳排放情况分析和目标预测等。这些工作的开展需要针对省级层面的碳中和路径研究，特别是目标设定分解，追踪进展和评估效果等领域。

针对省级层面的碳中和路径研究对于支持和加强国际地区间在应对气候变化合作和交流方面也发挥着重要的作用，其不仅帮助各省份提供支持《巴黎协定》目标实现的具有前瞻性的长期地方行动计划，还能识别地区间经验交流和借鉴的主要领域。

中国各省份在碳排放方面存在显著的区域差异，其低碳转型的步伐、目标设定和关键减排措施也呈现多样性。为深入识别和理解不同省份实现碳中和路径的差异性，在能源创新（EI）和绿色创新发展研究院（iGDP）共同创建的中国能源政策模型（EPS China iGDP, 2024）的基础上，我们进一步构建了涵盖中国 30 个省份¹的 EPS 基础模型（简称：EPS 分省基础模型），并开发了两个政策情景用于分析能源和低碳政策的减排效果。

通过 EPS 分省基础建模工作，我们希望帮助读者更深入地理解各省碳排放路径的差异性，以及基于国家“双控”政策要求和各省实际情况，为各省制定面向 2035 年和 2060 年提出更有力的碳排放控制目标和政策措施提供研究支持。

本报告展现了我们目前开展 30 省基础建模研究的部分结果。文中内容重点关注 30 个省级地区在经济发展、能源消费、碳排放历史趋势方面的差异性；基于反映“1+N”政策实施的政策情景的模型量化结果，分析和比较了各省 2030 年前碳排放趋势和关键气候目标的实现情况；基于支持 2060 年前全国碳中和目标实现的双碳情景的模型量化结果，分析了各省重点高耗能行业的碳排放和全经济范围温室气体（GHG）排放趋势。此外，报告还展现了双碳情景下关键时间节点需要关注的重点减排政策，以及碳排放规模排名前 10 位的省份在未来减排中可能面临的政策机遇与挑战。

¹ 根据数据可获得性，本研究省级地区不包括西藏、香港特别行政区、澳门特别行政区和台湾地区。

各省低碳发展状况

本节分析并展示了各省在经济发展、能源消耗、历史碳排放趋势、以及脱钩趋势方面的差异，并呈现了 2005 年至 2022 年间全国碳排放总量中占比超过 55% 的前 11 个省份的部门历史排放数据。

经济和碳排放的差异性

中国各省在社会经济发展和排放水平方面存在显著差异。在 30 个省级地区中，有 11 个省份的碳排放量占全国碳排放总量的 55% 以上。高收入地区主要分布在东部沿海地带，而高排放地区则通常集中在依赖碳密集型产业和煤炭工业的省份。

表 1 分省 GDP 和 CO₂ 排放情况 (2022 年)

省级地区	CO ₂ 排放占比	GDP占比	人均CO ₂ 排放	人均GDP (2005 不变价)
山东省	9%	8%	9.2	61211
江苏省	8%	10%	10.0	95777
河北省	8%	4%	11.4	39803
内蒙古自治区	7%	2%	28.8	68483
广东省	6%	11%	5.2	69757
辽宁省	5%	3%	12.6	52655
浙江省	5%	7%	7.7	79249
河南省	5%	6%	5.0	44529
新疆维吾尔自治区	4%	1%	17.2	39760
山西省	4%	2%	12.8	38743
安徽省	4%	4%	6.2	45435
湖北省	3%	4%	5.5	53017
湖南省	3%	4%	4.4	48316
陕西省	3%	2%	7.0	45341
福建省	3%	4%	6.3	77105
黑龙江省	2%	2%	8.4	47995
广西壮族自治区	2%	2%	4.8	29999
江西省	2%	3%	5.1	43577
上海市	2%	4%	9.0	129550
四川省	2%	4%	2.5	42174
贵州省	2%	1%	4.9	26916
宁夏回族自治区	2%	0%	25.1	33209
吉林省	2%	1%	7.3	37771
重庆市	2%	3%	5.1	62237
天津市	2%	2%	12.1	89655
甘肃省	1%	1%	6.2	30828
北京市	1%	3%	5.4	114932
云南省	1%	2%	2.4	35607
青海省	0%	0%	7.6	35159
海南省	0%	0%	4.1	36956

图例

人均CO₂排放

- ▶ 大于等于全国平均排放
- ▶ 大于等于全球平均、低于全国平均排放
- ▶ 低于全球平均

人均GDP

- ▲ 大于等于全国平均水平
- ▼ 低于全国平均水平

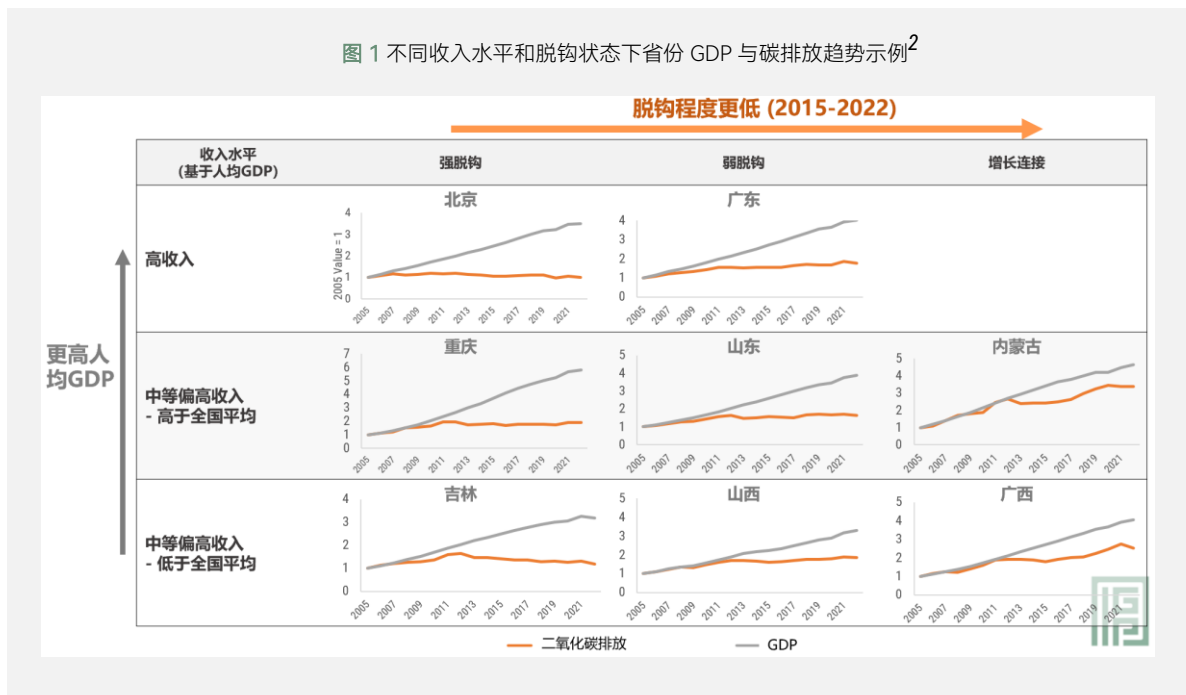
如表 1 所示，山东等省份在 GDP 和碳排放贡献方面均居领先地位，二氧化碳排放约占 9%，GDP 约占 8%。对比来看，辽宁的二氧化碳排放占全国的 5%，但 GDP 仅占 3%。北京贡献了全国 3% 的 GDP，但二氧化碳排放仅占 1%。

四川等拥有丰富可再生资源的省份，或像海南具有独特地理位置与经济结构的省份，人均碳排放量非常低。据估算，2022 年全球人均碳排放约为 4.4 吨，而中国有四个省级地区的人均碳排放低于全球平均水平。

经济与碳排放的脱钩进展

低碳转型目标是推动本地区经济增长与碳排放的完全脱钩。回顾各省 2005 年至 2022 年的二氧化碳排放情况，全国目前有 23 个省的碳排放量处于平台期（见表 2）。多数省份已经实现了经济增长与碳排放的脱钩，其中约三分之一达到了强脱钩状态，即 GDP 持续增长的同时，碳排放量呈下降趋势。

在高收入省份中，北京、上海和天津实现了强脱钩，而广东、浙江、江苏和福建则处于弱脱钩状态（见图 1）。



² 二氧化碳排放基于该地区能源消费，调出电力的排放不计入该省排放，调入电力的排放计入该省排放。

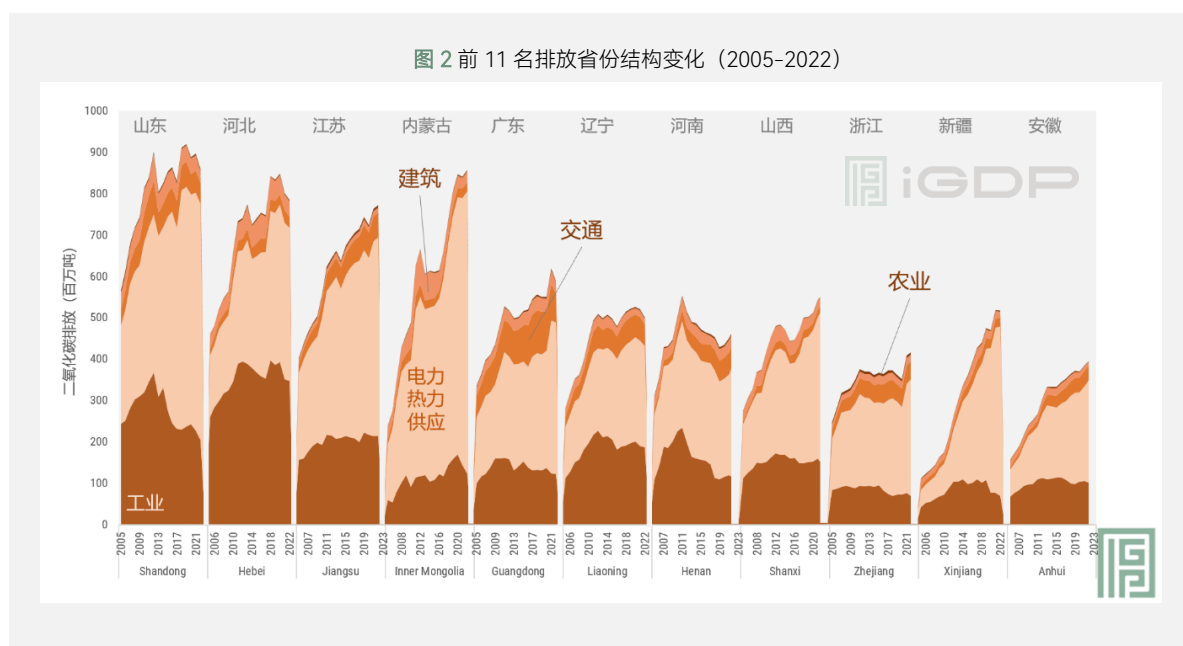
表 2 各省收入水平和脱钩情况 (2015-2022 年)

省份	收入水平	Tapio 弹性系数 (2015-2022)
安徽省	中等偏高收入	▲ 41% 弱脱钩
北京市	高收入 \$\$	● -18% 强脱钩
福建省	高收入 \$\$	▲ 26% 弱脱钩
甘肃省	中等偏高收入	▲ 22% 弱脱钩
广东省	高收入 \$\$	▲ 29% 弱脱钩
广西壮族自治区	中等偏高收入	◆ 86% 增长连接
贵州省	中等偏高收入	▲ 9% 弱脱钩
海南省	中等偏高收入	▲ 19% 弱脱钩
河北省	中等偏高收入	▲ 12% 弱脱钩
河南省	中等偏高收入	● -1% 强脱钩
黑龙江省	中等偏高收入	● -6% 强脱钩
湖北省	中等偏高收入	▲ 23% 弱脱钩
湖南省	中等偏高收入	● -1% 强脱钩
吉林省	中等偏高收入	● -55% 强脱钩
江苏省	高收入 \$\$	▲ 36% 弱脱钩
江西省	中等偏高收入	▲ 35% 弱脱钩
辽宁省	中等偏高收入	● -1% 强脱钩
内蒙古自治区	中等偏高收入	◆ 107% 增长连接
宁夏回族自治区	中等偏高收入	◆ 90% 增长连接
青海省	中等偏高收入	● -30% 强脱钩
山东省	中等偏高收入	▲ 11% 弱脱钩
山西省	中等偏高收入	▲ 34% 弱脱钩
陕西省	中等偏高收入	▲ 53% 弱脱钩
上海市	高收入 \$\$	● -16% 强脱钩
四川省	中等偏高收入	● -28% 强脱钩
天津市	高收入 \$\$	● -29% 强脱钩
西藏自治区	中等偏高收入	数据不可得
新疆维吾尔自治区	中等偏高收入	▲ 62% 弱脱钩
云南省	中等偏高收入	▲ 9% 弱脱钩
浙江省	高收入 \$\$\$	▲ 47% 弱脱钩
重庆市	中等偏高收入	▲ 10% 弱脱钩

排放前 11 名省份

2022 年，全国碳排放量排名前 11 的省份包括山东、河北、江苏、内蒙古、广东、辽宁、河南、山西、浙江、新疆和安徽，这些省份的碳排放总量占全国的 55% 以上。

工业部门和电力部门是主要的排放来源。从 2005 年到 2022 年，前 11 名省份的工业部门排放增速明显放缓。但由于电力需求的快速增长，电力部门成为这些省份排放增长的主要推动因素。此外，作为中国 GDP 和人口排名第一的大省，广东的交通部门排放也呈显著增长趋势（见图 2）。



情景分析与方法学

在能源创新（EI）和绿色创新发展研究院（iGDP）共同创建的中国能源政策模型（EPS China iGDP, 2024）的基础上，iGDP 构建了 30 个省级 EPS 基础模型。模型输入数据来自官方统计和公开的权威研究。省级 EPS 基础模型的基准年是 2020 年。各部门排放和活动数据均根据《中国能源统计年鉴 2021》提供的地区能源平衡表进行了校准。在模型中，我们设定了三个情景，分别为 2020 政策冻结情景、政策情景和双碳情景。如下表所示：

表 3 情景设置

情景	定义	作用
2020 政策冻结情景	反映 2020 年以前的自然发展趋势、2015 年 NDC 和“十三五”政策	作为基线，用于评估政策情景和双碳情景的减排效果
政策情景	参考各省“1+N”政策和“十四五”政策的影响	反映并评估现行政策减排效果
双碳情景	2030 年前设置同政策情景一致，2030 年到 2060 年间参考支持 2060 年前实现碳中和可采取的最佳政策	识别 2060 年净零有待加强的政策和领域，以及相关政策的减排贡献



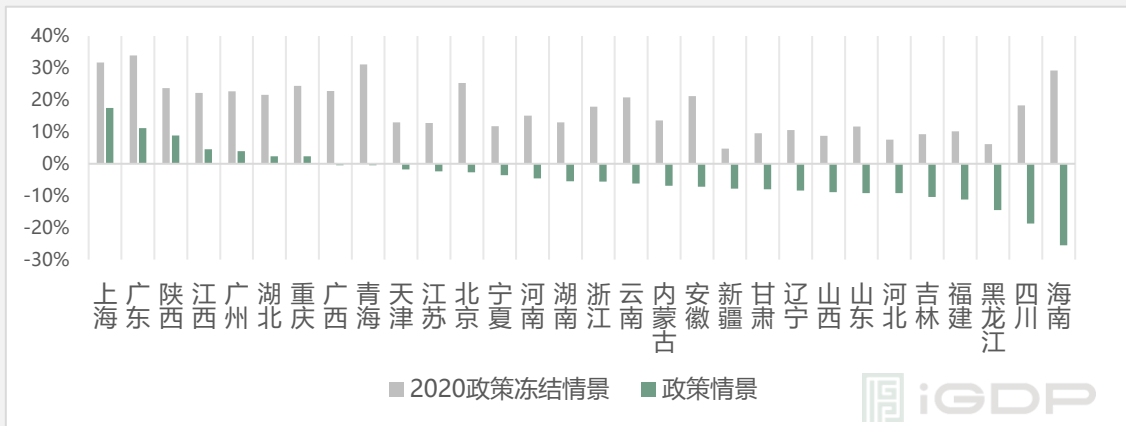
2030 展望

本节内容分析和比较了在“1+N”政策实施的政策情景下，各省 2030 年前碳排放趋势和关键气候目标的实现情况。

二氧化碳排放

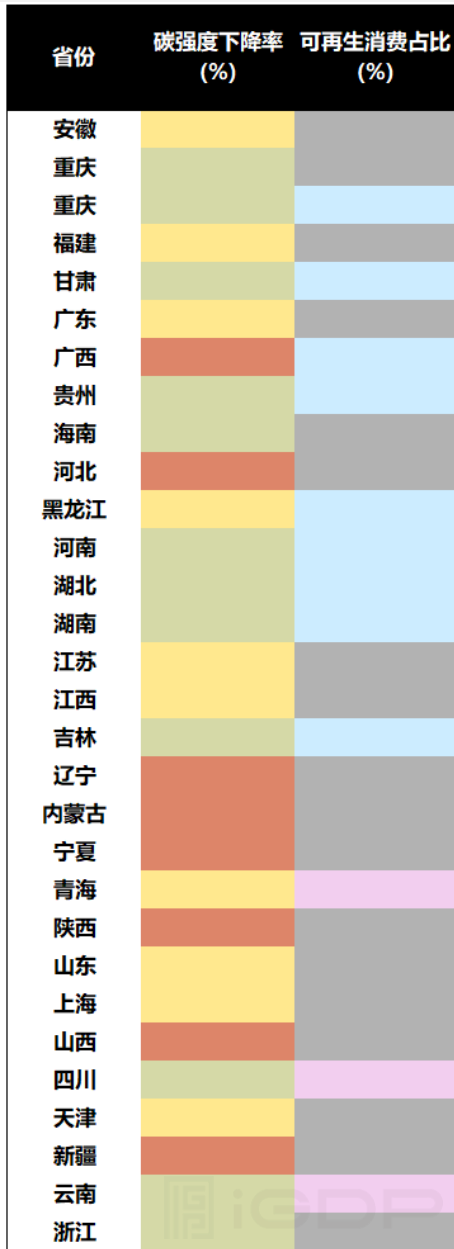
在政策情景下，大多数省份的二氧化碳排放量在 2030 年相较于 2020 年水平呈下降趋势，尤其是海南（-26%）、四川（-19%）和黑龙江（-15%）。与 2020 年政策冻结情景相比，所有省份的减排幅度均有所增加，表明当前“1+N”政策框架和“十四五”规划政策在减排方面发挥了重要作用（图 3）。

图 3 各省 2030 二氧化碳排放相对 2020 年下降率（2020 政策冻结情景和政策情景）



碳强度和可再生能源消费

图 3 各省碳强度下降率和可再生能源消费

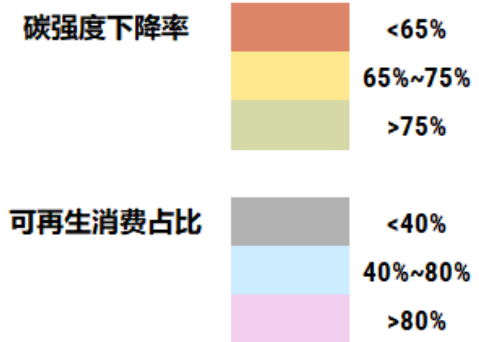


- 碳强度

在政策情景下，一些省份 2005 年至 2030 年的碳强度下降幅度低于 65% 的全国平均目标。这些省份包括广西、河北、辽宁、内蒙古、宁夏、陕西、山西和新疆。这些地区目前仅实现了弱脱钩，或其经济增长仍与排放存在较高相关性。

- 可再生能源消费

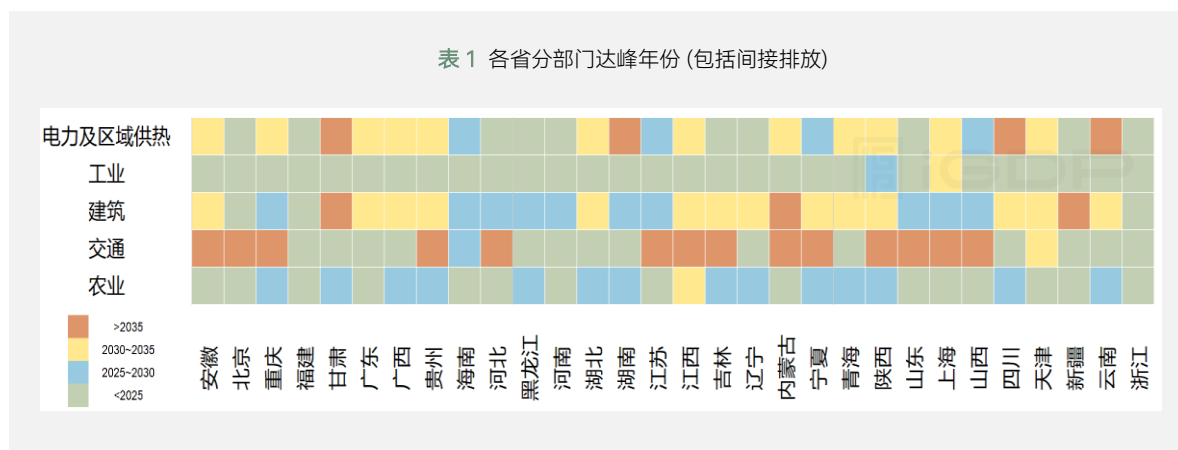
国家能源局设定了到 2030 年全国可再生能源发电占比达到 40% 的目标。从发电侧来看（不包括电力进出口），大多数省份在政策情景下难以实现这一目标。然而，像四川、青海和云南等可再生能源资源丰富的省份，其可再生能源消费占比已超过 80%。



部门达峰年份

在“全国一盘棋”战略下，中国不同地区在实现碳达峰的路径、重点和进度上存在差异。

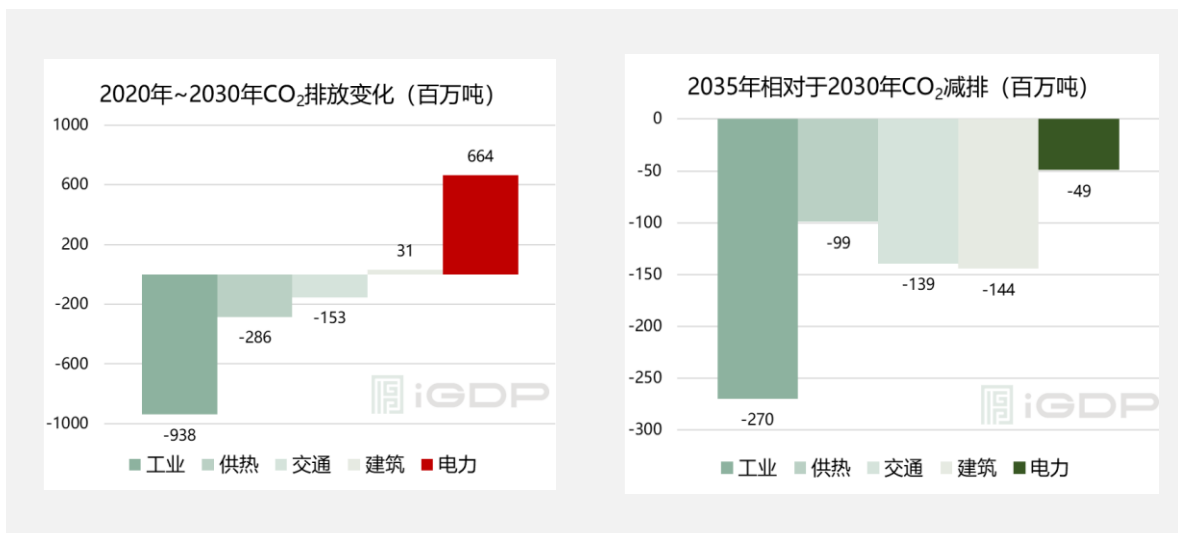
若考虑间接排放，大多数省份的工业部门预计于 2025 年前达峰。交通部门预计在 2035 年后达峰，建筑部门则预计在 2030 年后达峰。这两个部门的达峰时间与可再生能源的渗透率密切相关。



重点部门碳排放变化

如果保持现有政策力度，预计未来十年二氧化碳排放量的增加主要来自电力部门。同时，工业部门将贡献显著的减排量。从2030年到2035年，所有部门的排放量都将大幅减少，这一转变很大程度上依赖于终端部门加速电气化及电网的清洁化。

图1 分部门碳排放变化



2035 和 2060 展望

本节主要聚焦于支持 2060 年前全国碳中和目标实现的双碳情景，分析各省部分重点高耗能行业的碳排放及全经济范围内 GHG 排放趋势，并识别关键时间节点的重点减排政策以及排放前 10 大省未来面临的政策机遇和挑战。

高耗能行业二氧化碳排放

以钢铁、水泥、化工和有色四大高耗能行业为例，我们分析了这些行业在各省的二氧化碳排放情况，并识别出排放量合计超过全国总量 60% 的重点排放省份。以 2035 年为时间节点，分析在政策情景和双碳情景下不同省份碳排放相对于基年（2020 年）的变化率，比较同一省份在两个情景下的减排效果，以及同一情景下不同省份的减排效果，从中识别出减排效果更为明显的省份。



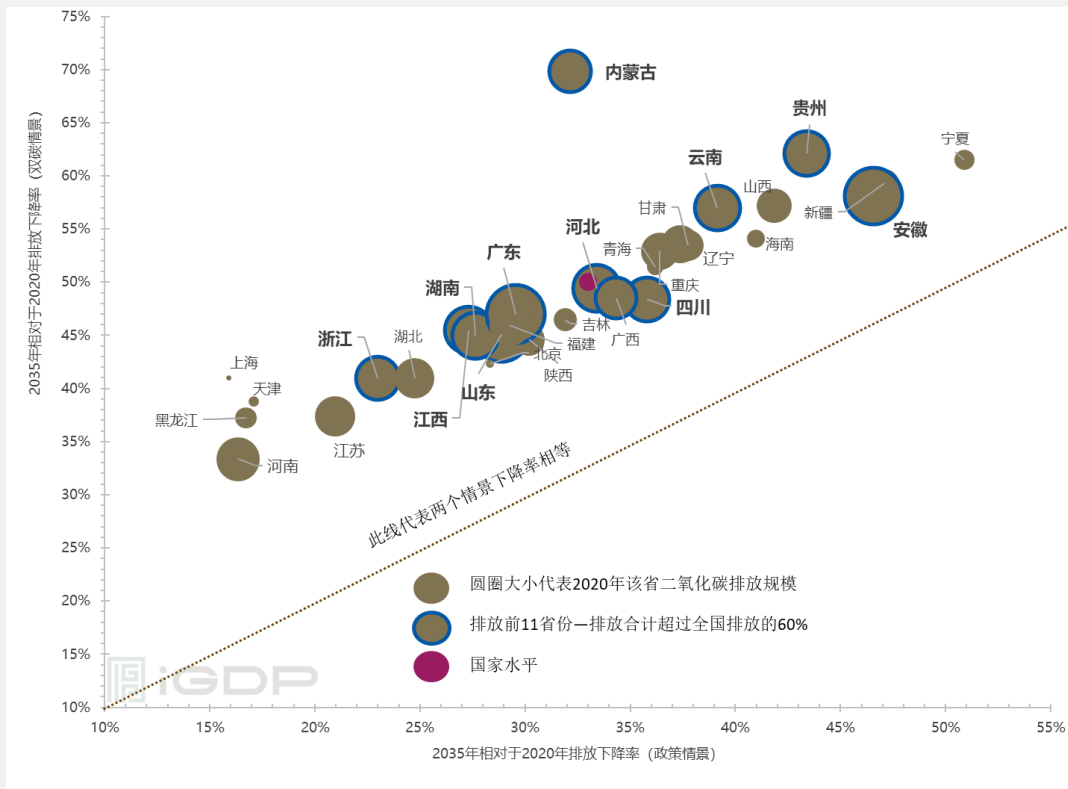
水泥

各省水泥行业排放量的空间分布较为均匀。广东、安徽、山东、江西、河北、湖南、贵州、云南、四川、浙江和内蒙古等 11 个省份的碳排放总量合计约占全国的 60%左右。上海、北京和天津三个直辖市的排放量最低。模型结果显示，各省水泥行业排放量在 2025 年前都已经达到峰值，未来呈持续下降趋势。

在政策情景下，各省碳排放到 2035 年相对于 2020 年下降率在 15%至 50%之间，其中，宁夏、安徽、新疆、贵州、山西等省份的下降幅度较大。在双碳情景下，各省碳排放到 2035 年相对于 2020 年下降率在 30%至 70%之间，其中内蒙古的下降率远高于其他省份。

对于排放量较高的省份，安徽、贵州、内蒙古、云南、内蒙古、山西和辽宁的减排程度总体高于全国平均水平；而河南、江苏、浙江、江西、山东、湖南、广东等省份则低于全国水平。

图 4 分省水泥行业 2035 年相对于 2020 年二氧化碳排放下降率（政策情景和双碳情景）



注：CO₂ 排放包括直接排放以及电力消费相关的间接排放

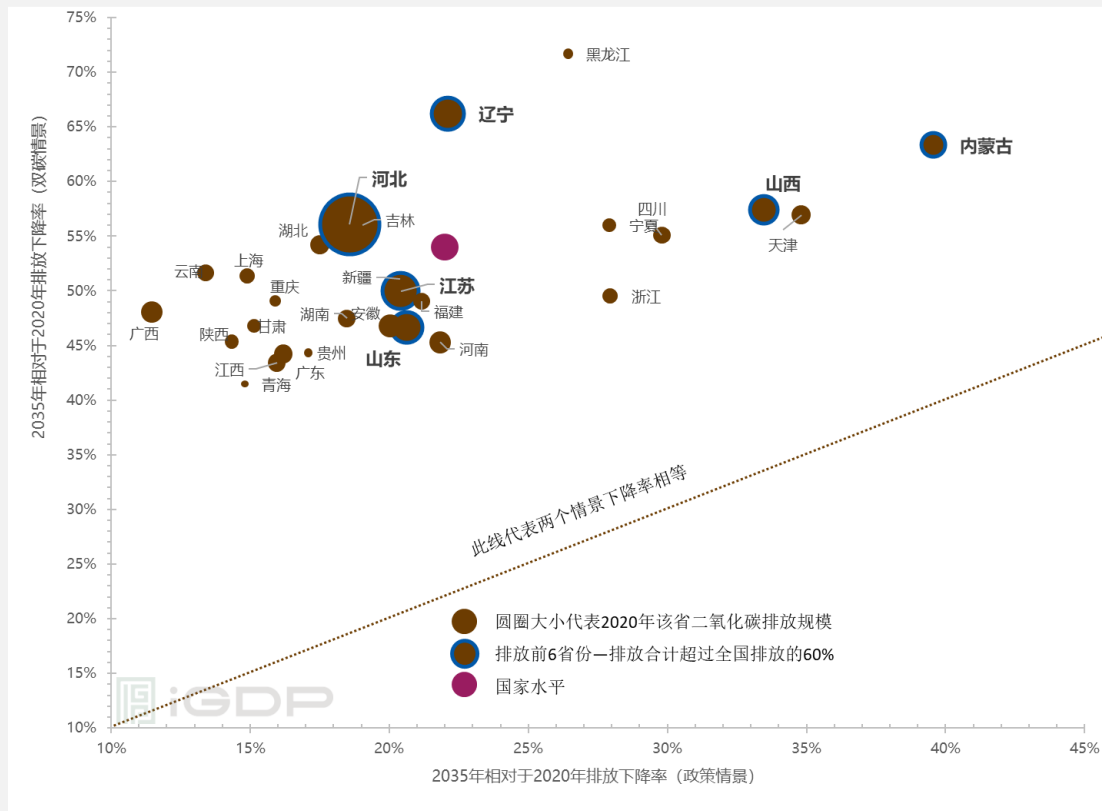
钢铁

钢铁行业的主要排放省份包括河北、江苏、辽宁、山东、山西和内蒙古，这6个省份的排放量约占行业排放总量的60%。其中，河北省的排放量尤为突出，占全国比重超过25%。海南和北京没有钢铁企业，排放量基本为零。模型结果显示，各省钢铁行业在2025年前都达到排放峰值，并随后呈现稳步下降趋势。

政策情景下，各省2035年相对于2020年的碳排放下降率预计在10%至40%之间，其中内蒙古、天津、山西、四川等省份的下降幅度较大。在双碳情景下，各省2035年相对于2020年的碳排放下降率预计在40%至75%之间，黑龙江、辽宁、内蒙古、山西等省份的下降幅度尤为显著。

在钢铁行业排放大省中，内蒙古、山西和辽宁在两种情景下的减排效果均优于全国平均水平。在双碳情景下，河北的减排效果优于全国平均水平，而江苏和山东则低于全国平均水平。

图5 分省钢铁行业2035年相对于2020年二氧化碳排放下降率（政策情景和双碳情景）



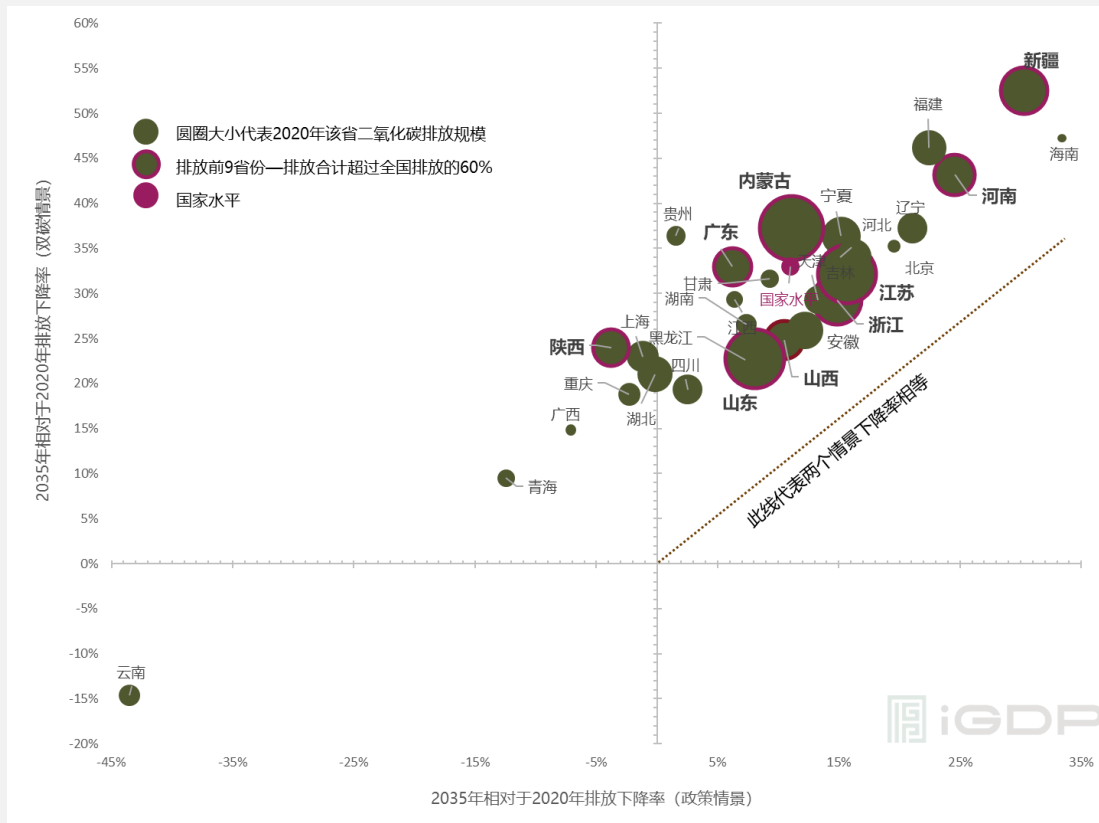
注：CO₂ 排放包括直接排放以及电力消费相关的间接排放

有色

有色行业的二氧化碳排放主要集中在内蒙古、山东、江苏、浙江、新疆、河南、山西、广东和陕西，这9个省份排放总量约占全国该行业排放总量的60%。海南和北京的排放量几乎为零，吉林、上海、天津、黑龙江、河北的排放量也较少。在政策情景下，绝大多数省份在2030年前将达到峰值，个别省份达峰年份推迟至2035年。在双碳情景下，所有省份的碳排放量将在2029年前达到峰值。

在政策情景下，各省到2035年相对于2020年碳排放变化率在-33%至44%之间。在双碳情景下，各省到2035年相对于2020年碳排放下降率在-15%至53%之间，其中新疆、河南、福建等省份下降幅度较大。值得注意的是，云南在两个情景下的排放呈快速增长趋势。

图6 分省有色行业2035年相对于2020年二氧化碳排放下降率（政策情景和双碳情景）



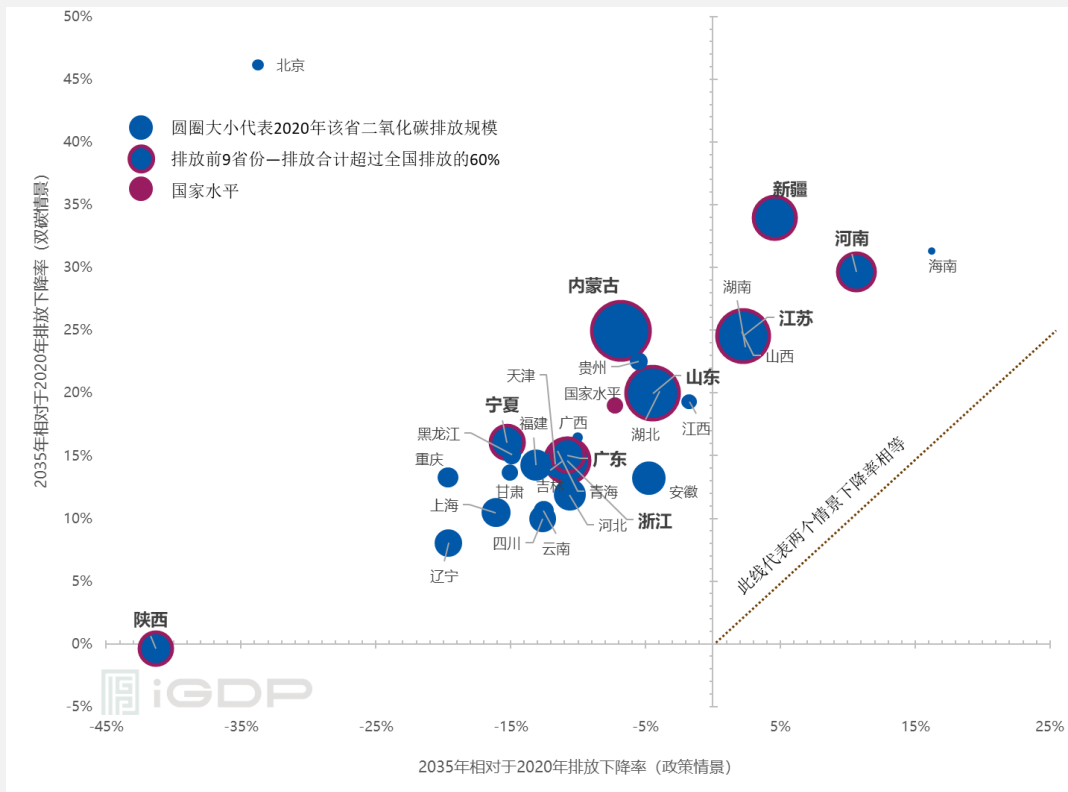
注：CO₂ 排放包括直接排放以及电力消费相关的间接排放

化工

在全国范围内，化工行业的二氧化碳排放分布相对比较均匀。排放量位居前列的省份主要包括内蒙古、山东、江苏、浙江、新疆、河南、广东、宁夏和陕西，这9个省份的排放量合计占全国该行业总排放量的60%。海南和北京的排放量最低。在政策情景下，大多数省份碳排放量预计将在2030年前达到峰值，但内蒙古、宁夏和山西这三个排放大省的达峰年份可能会推迟。而在双碳情景下，预计所有省份将在2029年前达到峰值。

在政策情景下，各省到2035年相对于2020年的碳排放变化率介于-16%至41%之间。特别值得关注的是，河南的减排幅度最为显著，而陕西的碳排放量仍在上升。在双碳情景下，各省2035年相对于2020年的碳排放下降率在0%至46%之间，新疆、河南、江苏和内蒙古的下降幅度领先，但陕西的下降幅度明显低于其他省份。

图7 分省化工行业2035年相对于2020年二氧化碳排放下降率（政策情景和双碳情景）

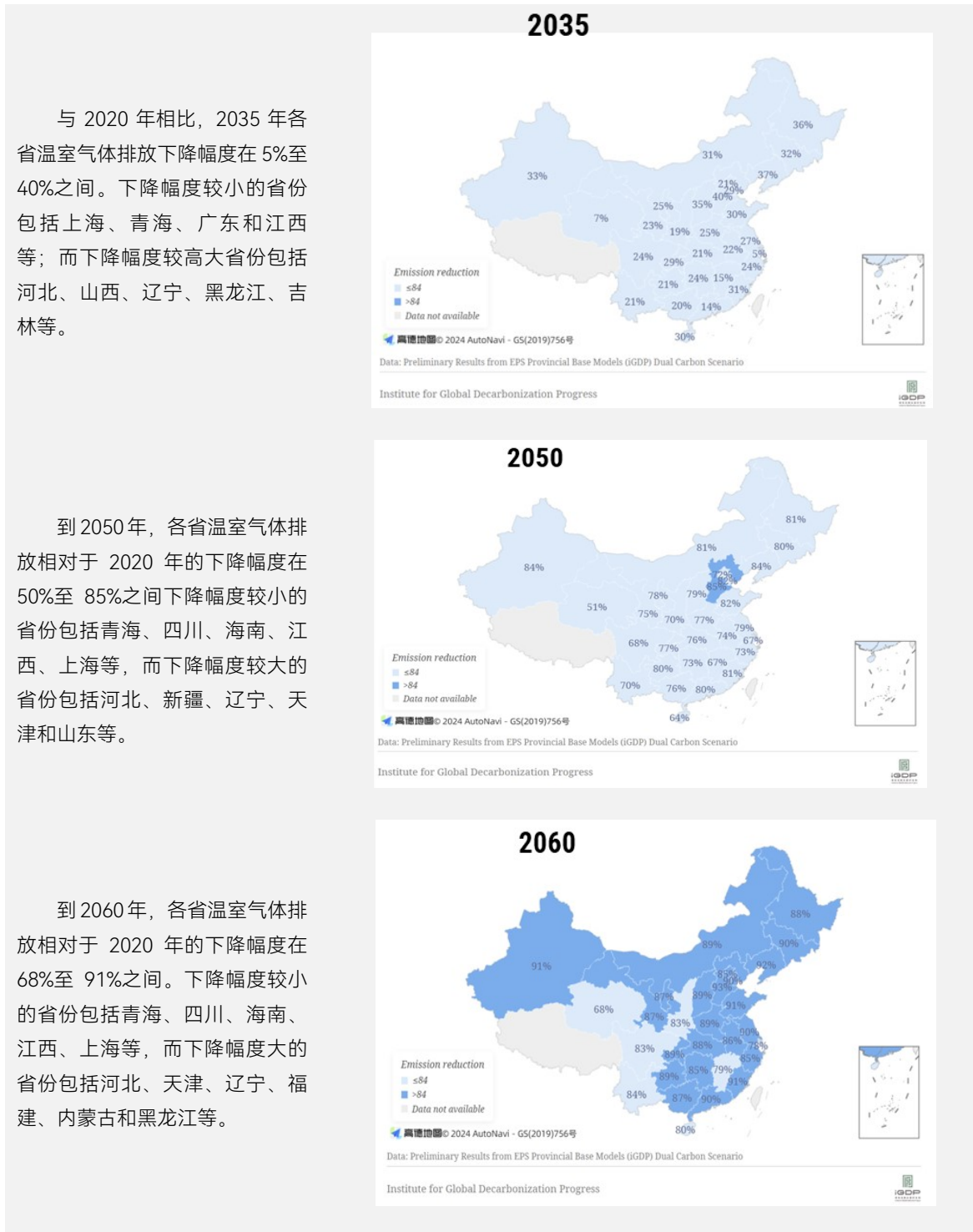


注：CO₂ 排放包括直接排放以及电力消费相关的间接排放

各省全经济范围温室气体排放

在各省执行相同政策力度的情况下，碳减排效果存在较大差异。这意味着，如果实行相同的温室气体减排目标要求，各省所需付出的努力程度是不同的。图 8 展示了在双碳情景下，各省 2035 年、2050 年和 2060 年温室气体排放分别相对于 2020 年的下降情况。

图 8 双碳情景下温室气体减排相对于 2020 年变化情况



注：不考虑 LULUCF。

终端用能电气化变化

工业

各省 2020 年工业电气化水平处于 12%至 44%之间，电气化水平较高的省份包括青海、广东、贵州、甘肃和浙江等。从 2020 年至 2035 年，各省电气化率平均累计增加 7%，其中电气化水平增加幅度较大的省份包括广东、重庆、四川、黑龙江和北京等。从 2030 年至 2060 年，各省电气化率平均累计增加 26%，增加幅度较大的省份包括江西、四川、湖南、黑龙江、安徽等。工业电气化水平的提升潜力受限于各省工业结构中难以电气化的重化工业占比，同时也与用于原料的能源消费占比密切相关。

建筑

各省 2020 年建筑电气化水平分布在 13%至 82%之间，电气化水平较高的省份包括海南、福建、广西、广东和上海。从 2020 年至 2035 年，各省电气化率平均累计增加 17%，其中电气化水平增加幅度较大的省份包括贵州、新疆、内蒙古、河南、甘肃等。在 2030 年至 2060 年间，各省电气化率平均累计增加 42%，其中电气化水平增幅靠前的省份是黑龙江、内蒙古、吉林、新疆、天津等。

交通

各省 2020 年交通电气化水平相对均衡，分布在 1%至 4%之间。从 2020 年至 2035 年，各省电气化率平均累计增加 16%，其中增幅较大的省份为浙江、天津、江苏、广西和重庆等。在 2030 年至 2060 年期间，各省电气化率平均累计增加 56%，其中增幅较大的省份为青海、辽宁、新疆、云南、黑龙江和湖南等。值得注意的是，上海和海南是中国小汽车电动化发展较为领先的省份，但根据模型结果，这些省份的电气化增幅相对较低，主要是因为其航空和水运交通较为发达，而这些领域的电气化难度相对较大。

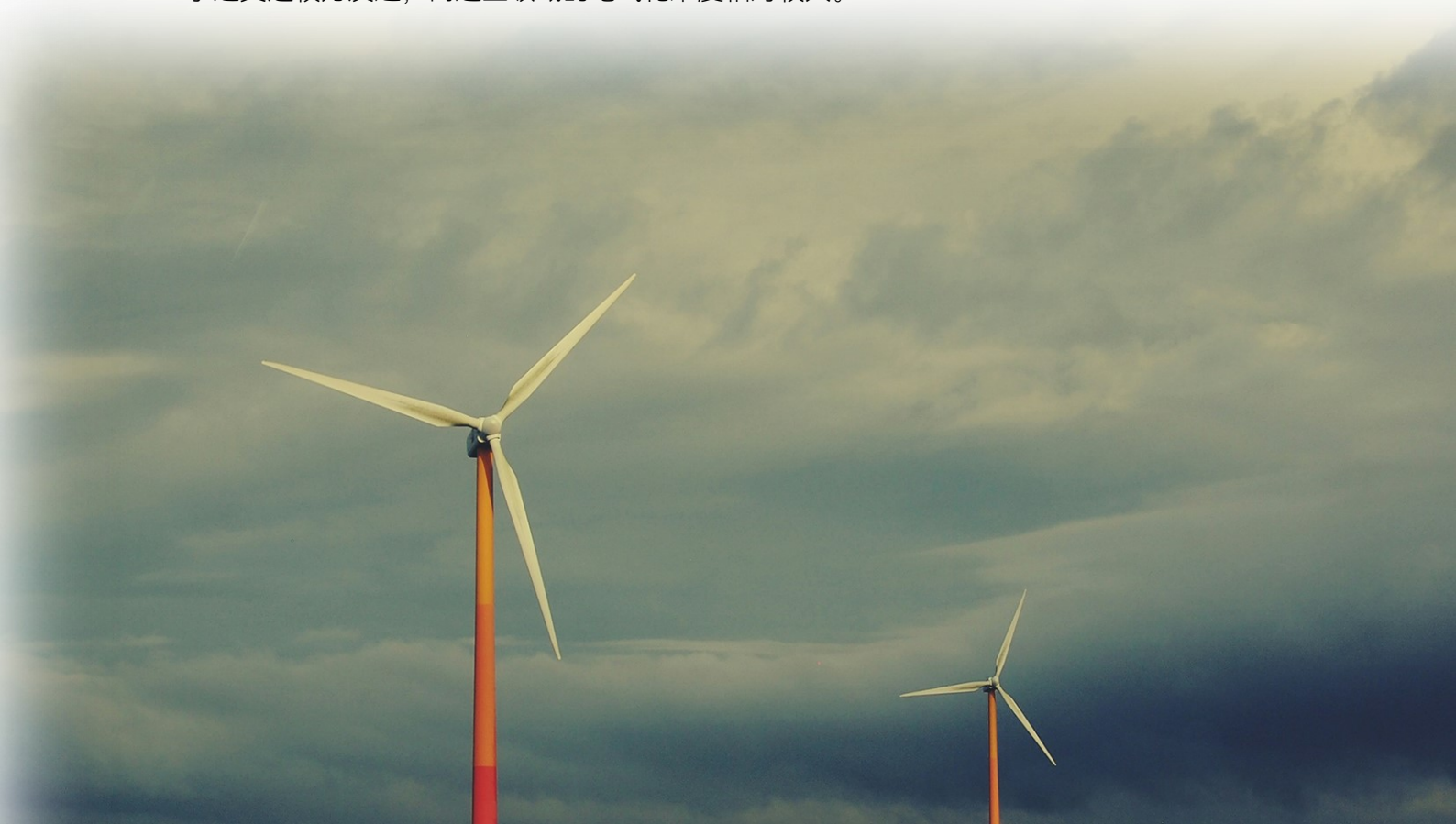
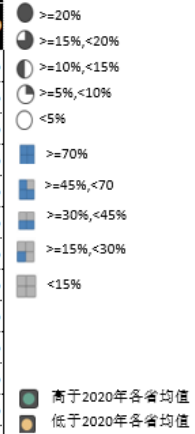


表 4 分省终端部门电气化变化 (双碳情景)

省份	工业			建筑			交通		
	2020	额外增加		2020	额外增加		2020	额外增加	
		2020 vs 2035	2030 vs 2060		2020 vs 2035	2030 vs 2060		2020 vs 2035	2030 vs 2060
北京	22%	10%	32%	43%	15%	57%	2%	16%	32%
天津	15%	7%	29%	28%	20%	63%	2%	21%	50%
河北	14%	4%	23%	26%	19%	57%	3%	16%	55%
山西	18%	6%	29%	25%	20%	51%	4%	15%	51%
内蒙古	25%	7%	22%	15%	22%	65%	1%	14%	63%
辽宁	12%	4%	16%	29%	20%	61%	1%	16%	72%
吉林	12%	5%	14%	26%	17%	65%	1%	13%	68%
黑龙江	15%	10%	33%	13%	14%	73%	1%	14%	60%
上海	20%	6%	25%	57%	12%	28%	1%	10%	15%
江苏	31%	7%	29%	71%	10%	17%	1%	22%	56%
浙江	32%	6%	14%	51%	17%	30%	2%	27%	48%
安徽	22%	7%	33%	49%	19%	30%	1%	21%	63%
福建	27%	7%	33%	82%	6%	10%	2%	17%	49%
江西	24%	7%	37%	54%	17%	25%	1%	15%	60%
山东	27%	6%	23%	35%	19%	57%	2%	16%	57%
河南	26%	6%	24%	43%	24%	42%	1%	19%	62%
湖北	20%	8%	32%	38%	22%	36%	1%	18%	59%
湖南	17%	8%	35%	34%	21%	38%	1%	18%	67%
广东	35%	12%	32%	64%	13%	19%	1%	19%	54%
广西	24%	6%	31%	68%	9%	19%	2%	20%	63%
海南	13%	3%	7%	82%	6%	11%	1%	13%	19%
重庆	18%	11%	29%	57%	14%	27%	1%	20%	56%
四川	21%	10%	35%	48%	18%	33%	1%	19%	55%
贵州	34%	8%	30%	27%	25%	42%	1%	19%	66%
云南	27%	7%	31%	50%	12%	32%	1%	15%	69%
陕西	22%	7%	26%	37%	20%	52%	2%	16%	54%
甘肃	33%	6%	27%	25%	22%	58%	3%	14%	68%
青海	44%	7%	26%	23%	21%	54%	1%	11%	73%
宁夏	23%	4%	16%	28%	20%	61%	2%	6%	51%
新疆	30%	8%	20%	23%	23%	63%	2%	11%	69%

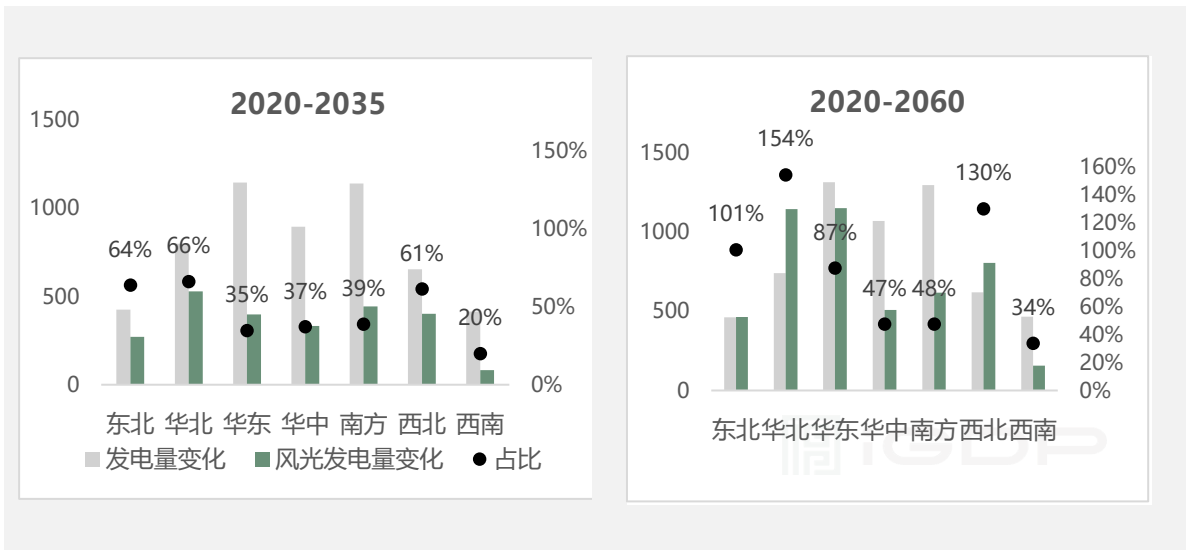
注：工业电气化包括作为原料用的能源消费；建筑电气化考虑了分布式电力消费；交通电气化包括各类交通方式



可再生能源发展

在 2020 到 2060 年间，各地区风光发电量在新增发电量中占比逐渐提高，逐步成为发电“主力”。双碳情景结果显示，华北、西北、东北地区累计风光发电量增幅超过了整体发电量增幅，华东电网的风光发电比例约为 87%，华中、南方、西南的风光发电占比在 30%~50% 之间。

图9 各地区风光及总发电量变化（太瓦时）



重点减排省份和政策

在双碳情景下，10 个省份（山东、河北、江苏、广东、河南、内蒙古、浙江、山西、安徽和辽宁）在 2021 年至 2060 年期间展现出巨大的温室气体减排潜力，其相对于 2020 政策冻结情景的减排量约占全国总减排量的 63%（图 10）。

图 10 2021 年至 2060 年重点省份减排潜力

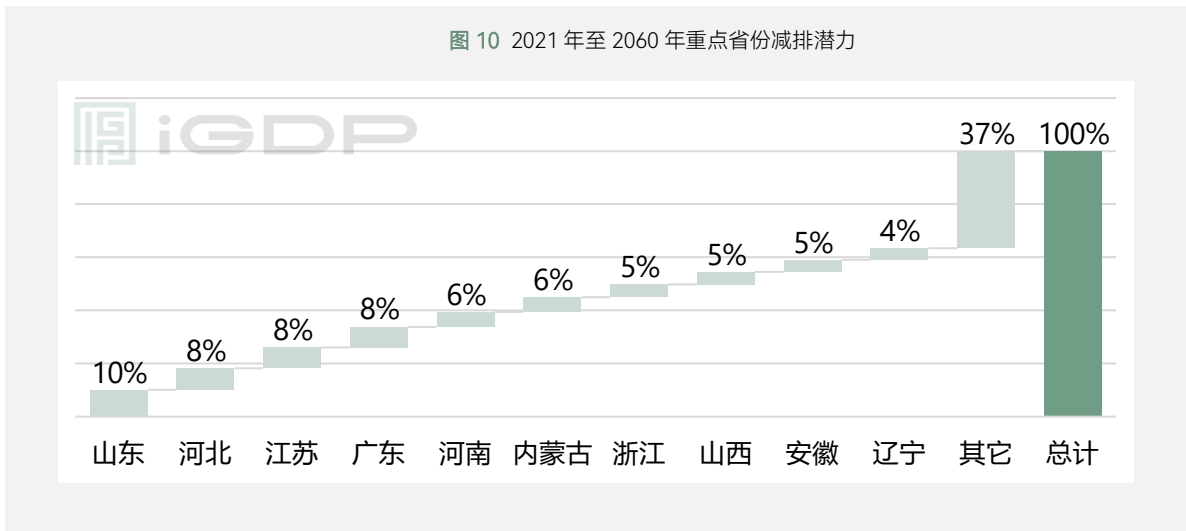


图 11 通过比较双碳情景与 2020 年政策冻结情景，识别出最具温室气体减排潜力的政策和措施，发展可再生发电以及推动工业、建筑和交通部门电气化是各省未来四十年应重点关注的减排政策。

在 2026 年到 2035 年期间，工业电气化是减排潜力最大的政策，减排贡献³约占 23%，紧随其后的是发展和消纳可再生电力（14%）、提高建筑能效标准（10%）和建筑运行设备电气化（9%）。其他减排政策如工业能效标准（6%）和零排放交通工具渗透率（6%）也贡献较大。

在 2021 年到 2060 年期间，可再生电力消纳的减排潜力居第一位，减排贡献为 25%；工业电气化和氢能替代仍然至关重要，减排贡献为 20%。此外，建筑运行电气化和科学规划跨省可再生电力调入分别贡献 9%和 7%的减排量。含氟气体控制的减排贡献为 6%，而零排放交通工具渗透率和建筑能效提升分别贡献 4%和 3%。

图 11 全国不同转型阶段重点减排政策

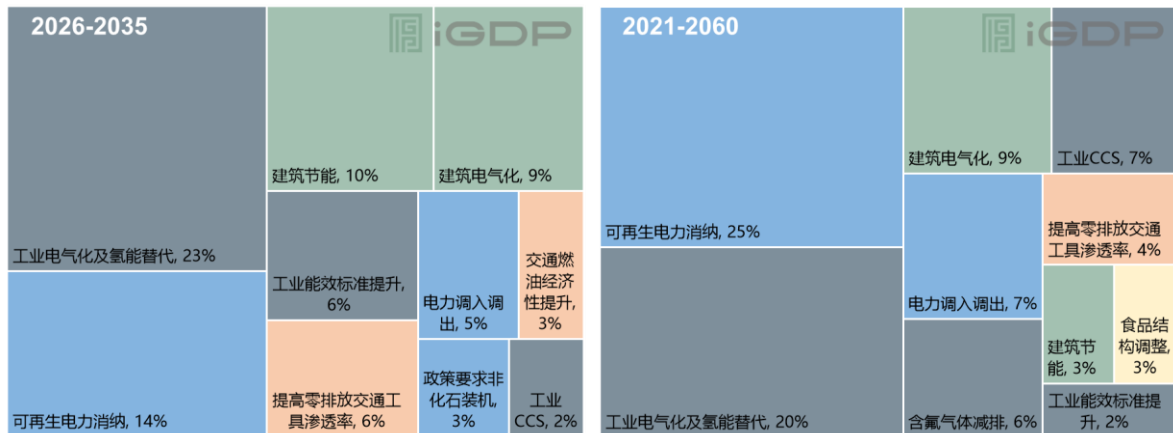
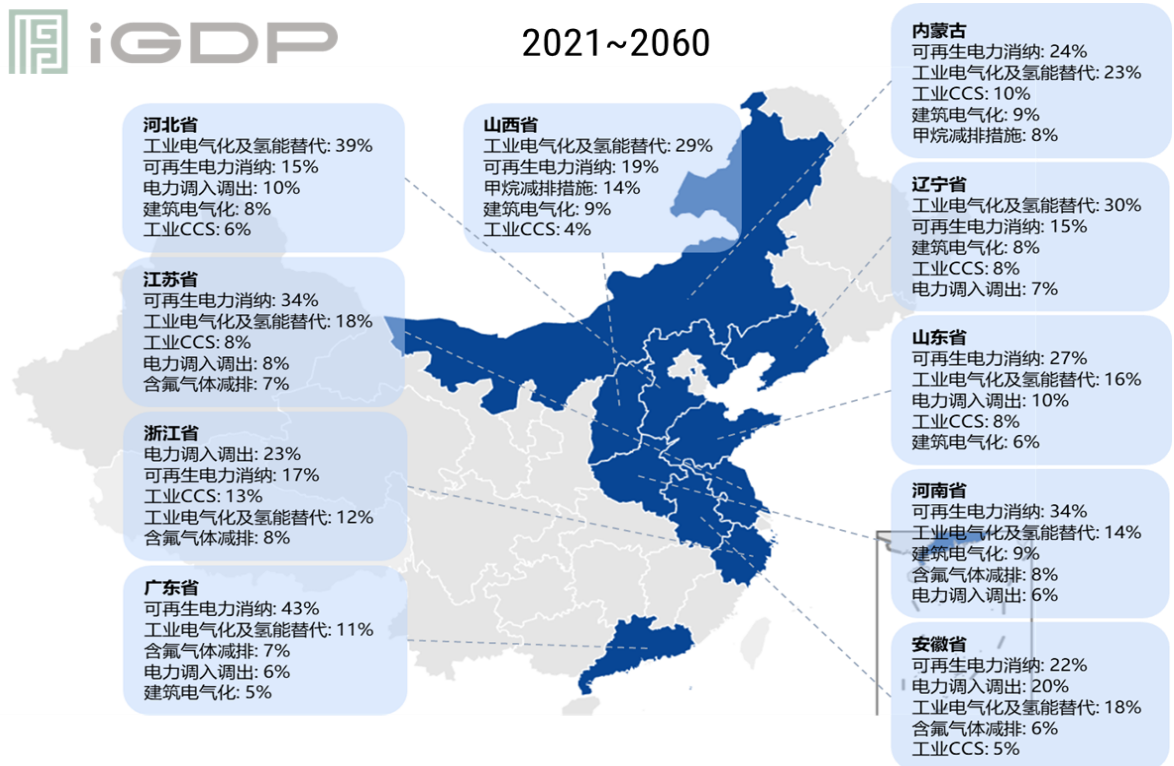
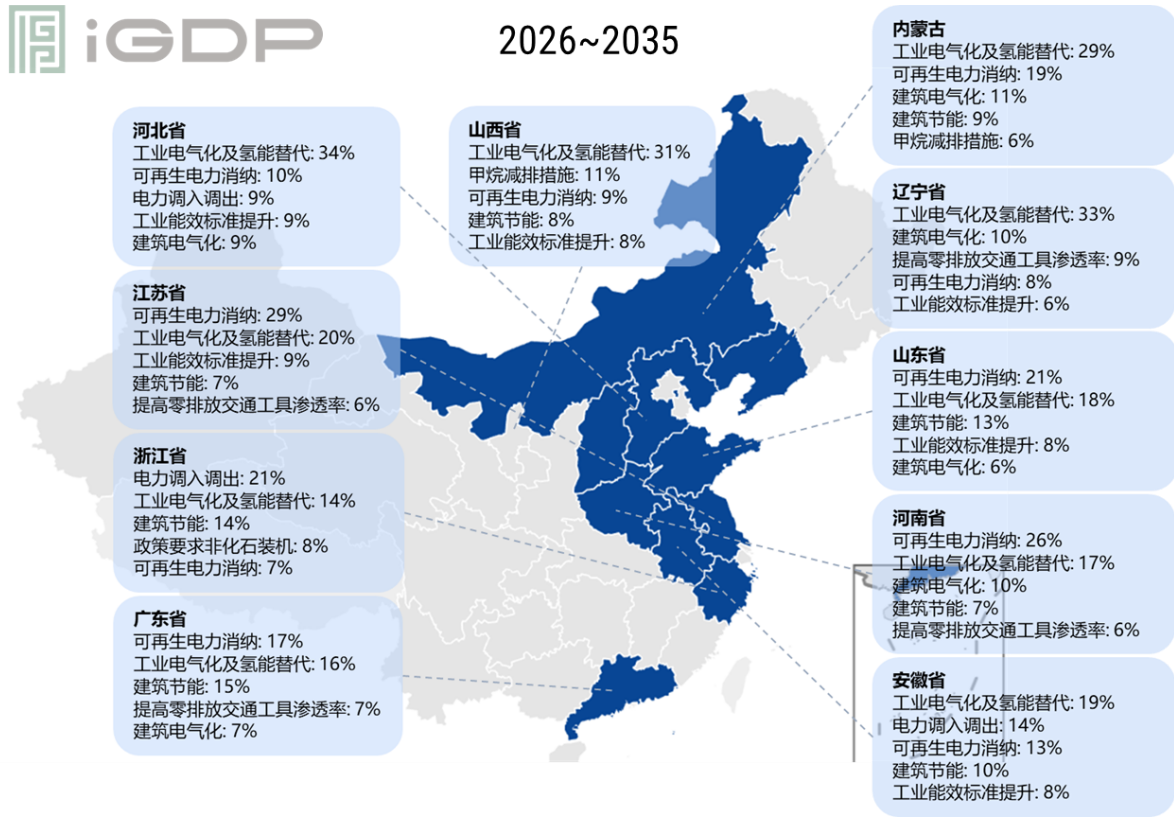


图 12 识别了针对排放规模居前 10 位的重点省份应关注的前五项政策。在 2026 年至 2035 年期间，发展和消纳可再生电力对这些省份至关重要，同时工业和建筑部门电气化也将发挥重要作用。对于电气化率已经非常高的地区（如广东省）应更加关注建筑节能和提高建筑能效标准。广东、辽宁和河南则应加快推广零排放交通工具。在非二氧化碳气体减排方面，山西应在未来十年内优先制定并实施煤矿瓦斯捕集与销毁等政策措施。

在 2021 年到 2060 年期间，工业 CCS 和含氟温室气体减排将逐步在 10 个省份的工业减排中发挥关键作用。此外，各省仍然应优先推广可再生电力消纳以及提高终端能源电气化水平。

³ 减排贡献是指该项政策的减排量占所有政策总减排量的比重

图 12 重点省份关键碳中和政策



结 论

在过去十几年间，中国各省在低碳发展领域取得了显著成效。这得益于各省都在不断提高碳排放控制目标，以及实施更有力度的政策和措施，例如推广可再生能源利用、提升能效以及加速电气化和燃料替代。

本研究揭示了中国社会经济发展和碳排放的区域不均衡性，反映了经济增长与气候变化减缓之间的复杂关系。2022 年，11 个排放大省贡献了过半的碳排放，主要来自于电力和工业部门，但实际上，许多省份已实现经济增长与碳排放的脱钩，其中大多数可能已进入排放平台期。

为评估能源和低碳政策的减排效果，模拟 30 个省份的长期碳排放趋势，团队开展分省 EPS 建模研究，设置了两种情景。一种是政策情景，延续当前“1+N”和“十四五”政策；另一种是双碳情景，探索以碳中和为目标的更具雄心的路径。

研究显示，中国所有省份都有望在 2030 年前实现碳达峰，而工业部门有望于 2025 年前率先达峰。在 2020 年至 2030 年间，现有政策将带来更显著的碳减排效果，其中电力系统自身脱碳将发挥关键作用，同时也可以支持多省交通和建筑部门提前达峰。

在双碳情景下，工业部门是实现 2060 年碳中和目标的关键。实现这一雄心要求在 2035 年前对工业实施更严格的减排措施，力度需远超政策情景中基于 2020 年排放水平的设置值。然而，各省在高碳排放工业部门和全经济范围内温室气体（GHG）的减排潜力上存在显著差异，这表明各省需要根据具体情况和面临的挑战有针对性地采取有效措施。

研究认为，在 2026 年至 2035 年间，工业电气化是最有效的减排政策，其次是可再生电力消纳和建筑能效提升。长远来看，在 2021 年至 2060 年期间，提高可再生电力消费将成为减排重点，同时工业电气化和氢能替代也将是各省制定长期减排战略过程中应重点关注的政策领域。

参考文献

- [1] EI, IGDP. 中国 EPS (2024, iGDP) [EB/OL]. <https://energypolicy.solutions/home/china-igdp/en>.
- [2] 刘强, 田川, 郑晓奇, 等. 中国气候与能源政策方案: 定量分析及与“十三五”规划期的政策建议 [R/OL]. 国家应对气候变化战略研究和国际合作中心, 2016. https://docs.energypolicy.solutions/assets/files/20160703_ExecutiveSummary_CN-6f7caa5404cd91bdf26a938941fb7048.PDF.
- [3] 国务院办公厅. 加快构建碳排放双控制度体系工作方案[EB/OL]. (2024-08-02). https://www.gov.cn/zhengce/content/202408/content_6966079.htm.
- [4] 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[R/OL]. (2024-11-20). 北京
- [5] 绿色创新发展研究院. 中国省级气候行动进程与展望[R/OL]. (2023-03-02). <https://www.igdp.cn/wp-content/uploads/2023/08/2023-08-23-iGDP-Report-CH-CCNT-Annual-Report-2022.pdf>.
- [6] 绿色创新发展研究院. 省级气候行动进展概览[R/OL]. (2023-07-10). <https://www.igdp.cn/wp-content/uploads/2023/08/2023-08-23-iGDP-CCNT-factsheets-CH.pdf>.
- [7] UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. Emissions Gap Report 2024.No more hot air ... please! With a massive gap between rhetoric and reality, countries draft new climate commitments[R/OL]. Nairobi, 2024. <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/46404>.
- [8] 奚溪, 杨鹏. 能源政策模型 (EPS) 应用于区域“双碳”战略规划研究: 入门工作手册[R/OL]. 绿色创新发展研究院, 2023[2024-08-30]. <https://www.igdp.cn/energy-policy-simulator/>.
- [9] 宋然平. 中国减缓气候变化的机遇: 非二氧化碳类温室气体[R]. 华盛顿哥伦比亚特区: 世界资源研究所, 2019.
- [10] 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.
- [11] LYNN PRICE, NINA KHANNA, NAN ZHOU, 等. Reinventing Fire: China – the Role of Energy Efficiency in China’s Roadmap to 2050[R]. Lawrence Berkeley National Laboratory.
- [12] 中国政府. 中国落实国家自主贡献成效和新目标新举措[Z/OL]. (2022-06). http://www.ncsc.org.cn/zt/2021_COP/202111/P020211110590484647110.pdf.