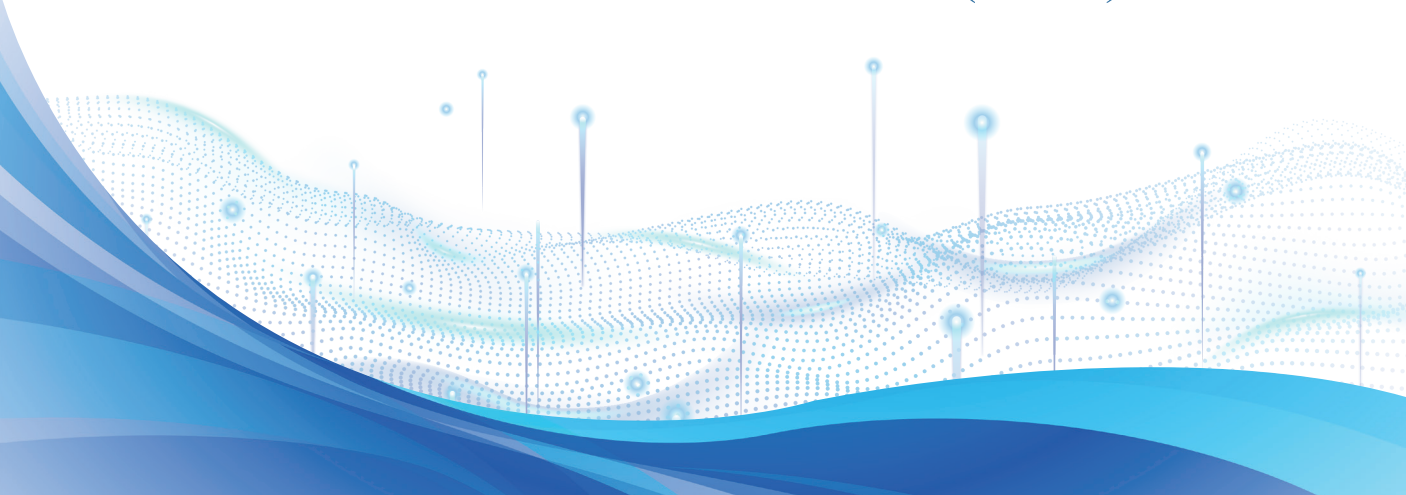




中国区域电网二氧化碳 排放因子研究 (2023)

China Regional Power Grids
Carbon Dioxide Emission Factors(2023)



**本研究得到中国工程院品牌项目
《我国碳达峰碳中和若干重大问题研究》(2022-PP-01)
资助**

指导专家

舒印彪

国家电网有限公司，中国工程院院士

王金南

生态环境部环境规划院，中国工程院院士

评审专家

杜祥琬	中国工程院院士
黄其励	国家电网有限公司，中国工程院院士
赵 勇	中国华能集团有限公司能源研究院，正高级工程师
严 刚	生态环境部环境规划院，研究员

作者

- 蔡博峰 生态环境部环境规划院碳达峰碳中和研究中心，研究员
- 赵良 中国华能集团有限公司碳中和研究所，教授级高级工程师
- 张哲 生态环境部环境规划院碳达峰碳中和研究中心，助理研究员
- 芦新波 中国华能集团有限公司碳中和研究所，工程师
- 贾敏 生态环境部环境规划院碳达峰碳中和研究中心，博士
- 张立 生态环境部环境规划院碳达峰碳中和研究中心，助理研究员
- 刘美 中国华能集团有限公司碳中和研究所，高级工程师
- 雷宇 生态环境部环境规划院碳达峰碳中和研究中心，研究员
- 姜玲玲 中国工程院战略咨询中心，副研究员
- 高亚静 中国华能集团有限公司碳中和研究所，高级工程师
- 宁礼哲 浙江吉利数字科技有限公司，高级工程师
- 郭静 生态环境部环境规划院碳达峰碳中和研究中心，博士
- 伍鹏程 清华大学万科公共卫生与健康学院，博士
-

摘要

区域电网二氧化碳排放因子是精准核算电力消费引起二氧化碳间接排放的基础参数。本研究采用平衡分析法，根据省级电网发电数据、跨省电力交换数据以及中长期电力发展规划等数据，构建省级电网生产模拟优化模型，通过情景分析评估未来不同情景下，省级电网电源结构和电力消费，分析中国 2020-2035 年不同情景下区域和省级电网二氧化碳排放因子。

基于情景分析，中国 2020-2035 年各省份电网排放因子将出现大幅下降，新能源政策情景下，各省降幅平均达到 43%，青海、云南、海南、吉林等 8 个省份的降幅超过 50%；新能源高速发展情景下，各省降幅平均达到 53%，青海、云南、海南、吉林等 16 个省份的降幅超过 50%；按照两类情景结果中位数考虑，各省份降幅平均达到 48%，青海、云南、海南、四川等 11 个省份的降幅超过 50%。

本研究建立的中长期省级电网排放因子，为支撑各省碳达峰碳中和路径研究，推动区域能源结构低碳化转型评估，鼓励用户优化生产和行为模式，降低企业预测间接排放不确定性，提供借鉴和参考。

目录 | CONTENTS

01	研究背景	01/05
02	中国电网排放因子现状	06/13
	2.1 中国各省电力分布现状	
	2.2 中国电网排放因子现状	
03	双碳目标下中国中长期电网排放因子研究	14/21
	3.1 技术路线图	
	3.2 情景设置	
	3.3 电网排放因子情景分析	
	附件材料	22/30
	附1：研究方法	
	附2：中国区域中长期电力发展规划明确边界条件	
	参考文献	31/34



1 研究背景

1 研究背景

“

电网二氧化碳排放因子是精准核算电力消费引起的温室气体间接排放量的基础,是定量分析并推动消费端碳减排的重要参数,其空间精度和时效性对区域、行业、企业等不同层级排放单元的间接排放影响显著。

”

电网二氧化碳排放因子指从电网获取和消费单位电量(1kWh)所导致的间接二氧化碳排放(范围二)。电网排放因子是消费端核算碳排放量的关键指标,用于测算评估由于电力消费所产生的间接排放。

电网排放因子尤其是区域电网排放因子,其空间精度和时效性对区域、行业、企业等不同层级排放单元的间接排放影响显著。中国电网分为不同的层级,如全国电网、区域电网和省级电网等,不同层级电网的覆盖范围不同,相应的电源

结构布局和网络条件不同,电网排放因子也不同。电网范围划分越小,电网排放因子越接近单位电力消费的实际间接排放,电网排放因子更新频率越高,其越能真实反映的电力排放情况。

一般将区域边界内的活动引起、但发生在区域外的排放称为间接排放。如企业外购电力的排放,该部分排放实际发生在发电端,但是由用电端的消费活动引起,对于用电端来说就属于间接排放。在现有温室气体核算标准中,净购入电力隐含排放一般基于排放因子法计



算，即排放量 = 净外购电量 × 电网排放因子。对于绝大部分非高耗能企业，间接排放是其碳排放的主要来源。电网排放因子作为电力生产端与电力消费端的关键枢纽，将发电侧的直接碳排放与电力消费侧的间接排放关联起来，有利于温室气体不仅从生产端进行源头减排，而且从消费端进行引导控制。因此，电网排放因子的准确性对于消费端实施碳排放有效控制至关重要。

结合实际电力需求和生产运行条件，研究区域电网排放因子，是精准反映区域能源结构低碳化进度，以及在消费端精准鼓励用户优化生产和行为模式的重要基础。研究建立中国中长期区域电网排放因子，对于支撑各省（区）碳达峰碳中和路径规划以及降低间接排放预测不确定性有着重要意义。

中国电力行业碳排放占中国二氧化碳总排放量的 40% 以上（中国大陆省区），准确摸清电力消费端碳排放，积极推动电力消费端碳减排，是落实“双碳”目标的关键举措。碳达峰碳中和目标下，未来发电端将以清洁能源为主体，新型电力系统中风电、太阳能发电为代表的非化石能源占比将大幅提高，电力行业实现深度低碳零碳。工业、交通和建筑等电力消费端部门的用电需求进一步增加，全社会电气化水平将持续提升，未来将依赖低碳电力实现降碳脱碳。2022 年，间接排放占总二氧化碳排放比例，北

京、上海均超过 20%，浙江、天津、江苏等省超过 10%。未来随着用电需求的上升，间接排放对典型省份总排放的影响可能会进一步凸显。

研究建立并滚动更新中国中长期区域电网排放因子，有利于精准估算消费端间接碳排放，反映各省电网排放因子的时序变化特征，精准计量净调入电量变化引起的间接排放量，有助于地方因地制宜地制定适合本地实际的能源转型政策，优化电力调入调出和电力消费结构，评估不同区域新能源发展、电力交换和储能应用等对降低排放的效果，形成电力生产端和消费端协

同推进碳减排的良性互动，发挥新型电力系统在各领域降碳脱碳过程中的核心枢纽作用，为各省（区）确定碳达峰时间表、路线图以及政策措施等提供重要支撑。同时，有利于鼓励用户进一步优化生产和行为模式，为企业预测间接排放提供重要参数，降低测算误差和不确定性。

国内外研究学者对于计算电网排放因子主要采用两类方法：宏观测算法和平衡分析法。宏观测算法通过应用宏观统计或测算的区域电力行业碳排放总量数据和发电量数据，从而计算该区域电网排放因子水平。该方法测算方法简单，降低了对基础数据的要求，存在测算精度低、误差大等问题，无法客观准

“

本研究综合应用平衡分析法，全面整合中国省级（涵盖中国大陆 30 个省区，由于数据原因，本研究不包括香港、澳门、台湾和西藏）电网发电数据、电力运行数据以及中长期电力发展规划等多源数据，系统构建省级电网生产模拟优化模型，对未来省级电源结构和电力消费进行情景分析，进而研究建立中国 2020-2035 年省级电网排放因子。

”

确反映区域间电力交换带来的排放影响。相比较而言，平衡分析法重点基于电网发电数据、区域间电力交换数据，根据不同区域电源结构，按照平衡分析后的电力流向计算每

个区域电网排放因子。测算过程对基础数据要求较高，能够大幅提高电网排放因子的精确度。

美国、澳大利亚、加拿大、英国、新西兰等国均已形成定期更新和发



布电网平均排放因子的机制。中国的全国电网排放因子已更新三次，国家发展改革委发布了2015年的全国电网平均排放因子。在全国碳市场启动后，生态环境部在2022年和2023年两度更新全国电网排放因子数值。中国区域电网平均排放因子公布了2010、2011、2012的年度数据；省级电网平均排放因子公布了2010、2012和2018的年度数据。随着中国绿色发展步伐加快，电力生产供应清洁化、低碳化程度不断提升，电力排放因子的更新需求也更加迫切。

本研究采用平衡分析法测算出中国省级电网排放因子，通过情景分析法预测不同年份各省电源结构、电力需求，基于电力网络结构和各省电力盈亏，估算省间电力交换情况，进而测算现状及未来年（2020-2035年）省级电网排放因

子。并将平衡分析法与情景分析相结合，预测省级电网电源结构和电力需求变化，进一步提升了电网排放因子研究方法的准确性，促进了中长期省级电网排放因子研究方法进步。

本研究全面梳理了全国及各省电力发展规划和碳达峰方案预期目标等政策措施，综合应用平衡分析法，全面整合中国省级电网发电数据、跨省电力交换数据以及中长期电力发展规划等多源数据，系统构建中国省级电网生产模拟优化模型（Optimization Model of Power Production and Dispatch for China's Provincial Power Grid, OPPD），对未来省级电网电源结构和电力消费进行情景分析，进而研究提出中国2020-2035年省级电网排放因子的演化规律。





2 中国电网排放因子现状

2 中国电网排放因子现状

2.1 中国各省电力分布现状

2022年,全国发电装机容量25.64亿千瓦,火电仍是现阶段中国最主要的电源类型。装机占比中,火电装机占52%,水电装机占16%,核电装机占2%,风电装机占14%,太阳能发电装机占15%。全国全口径发电量8.69万亿千瓦时,火电发电量占66%,水电发电量占15%,核电发电量占5%,风电发电量占9%,太阳能发电量占5%(图1)。

从地区维度看,由于能源资源禀赋条件和开发利用情况不同,各省份之间发电结构存在显著差异。上海、天津和北京等地区以火电为主,装机占比分别达到89%、84%和84%;而青海、云南和四川等地区则以可再生能源发电为主,装机占比分别达到91%、86%和85%。

从电源类型看,各类电源类别的空间分布特征存在较大差异。火电主要分布于山东、江苏、内蒙古等地区,其装机容量占全国总装机

比重分别达到9%、8%和8%;水电主要分布于四川、云南、湖北等西南及中南地区,其装机容量占全国总装机比重分别达到24%、20%和9%;核电主要分布于广东、福建、浙江等东部沿海地区,其装机容量占全国总装机比重分别达到30%、22%和18%;风光发电主要分布于山东、内蒙古、河北等地区,其风电和光电装机占全国总装机比重分别达到6%、13%、8%和11%、4%、10%。不同类型电源分布主要与资源分布密切相关,与各地区生产力发展水平和能源消费结构也有较大关系。

中国省际间电力交换(图2)整体呈现“西电东送、北电南供”的特点。其中,内蒙古、云南和四川等西部北部地区为电力净调出省份,净调出电量分别占全国总调出电量的17%、15%和11%。相对应地,广东、江苏和浙江等东南地区省份为主要的电力输入省份,净调



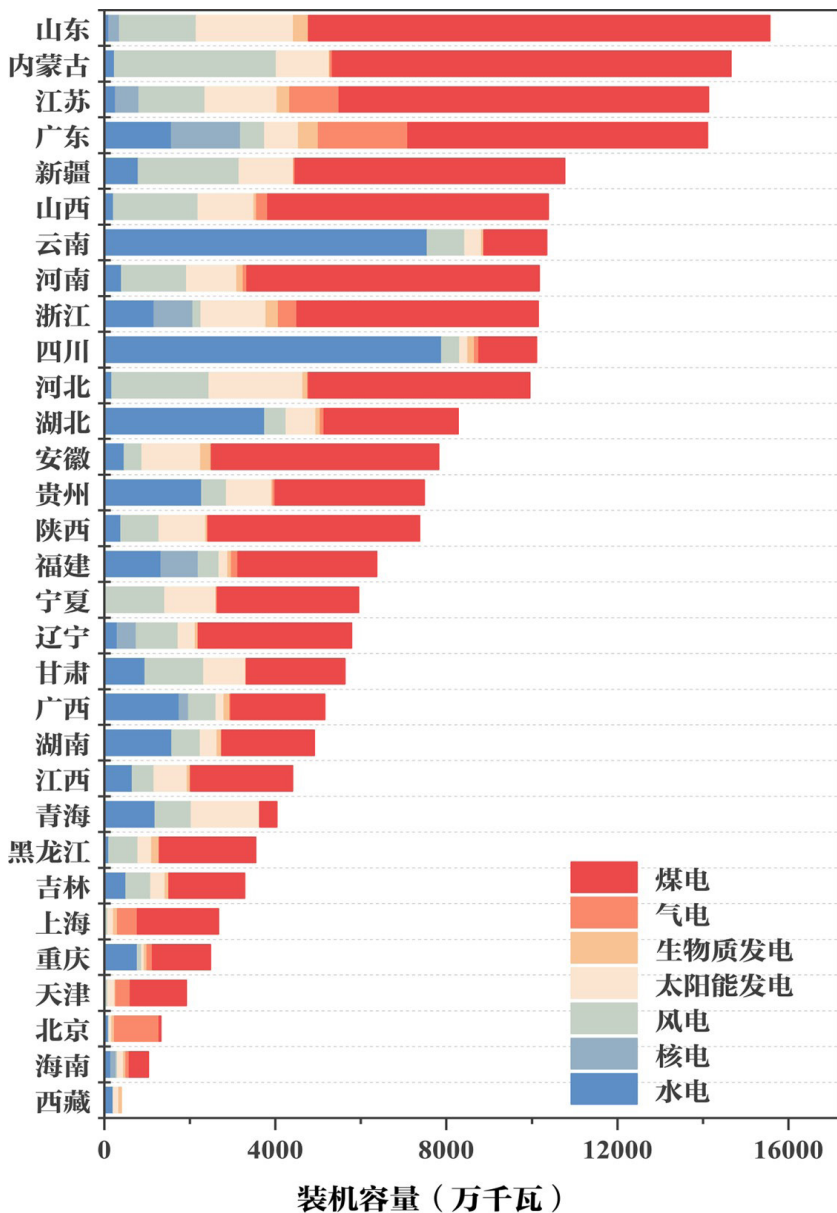


图 1 2020 年中国各省发电装机结构

入电量占全国总调入电量的 22%、14% 和 13%。主要由于中国传统化石能源资源总体分布呈现西部北部多、东部中部少的空间布局，而东中部地区是用电负荷中心，资源与负荷逆向分布决定了中国形成跨省跨区输电的基本格局。

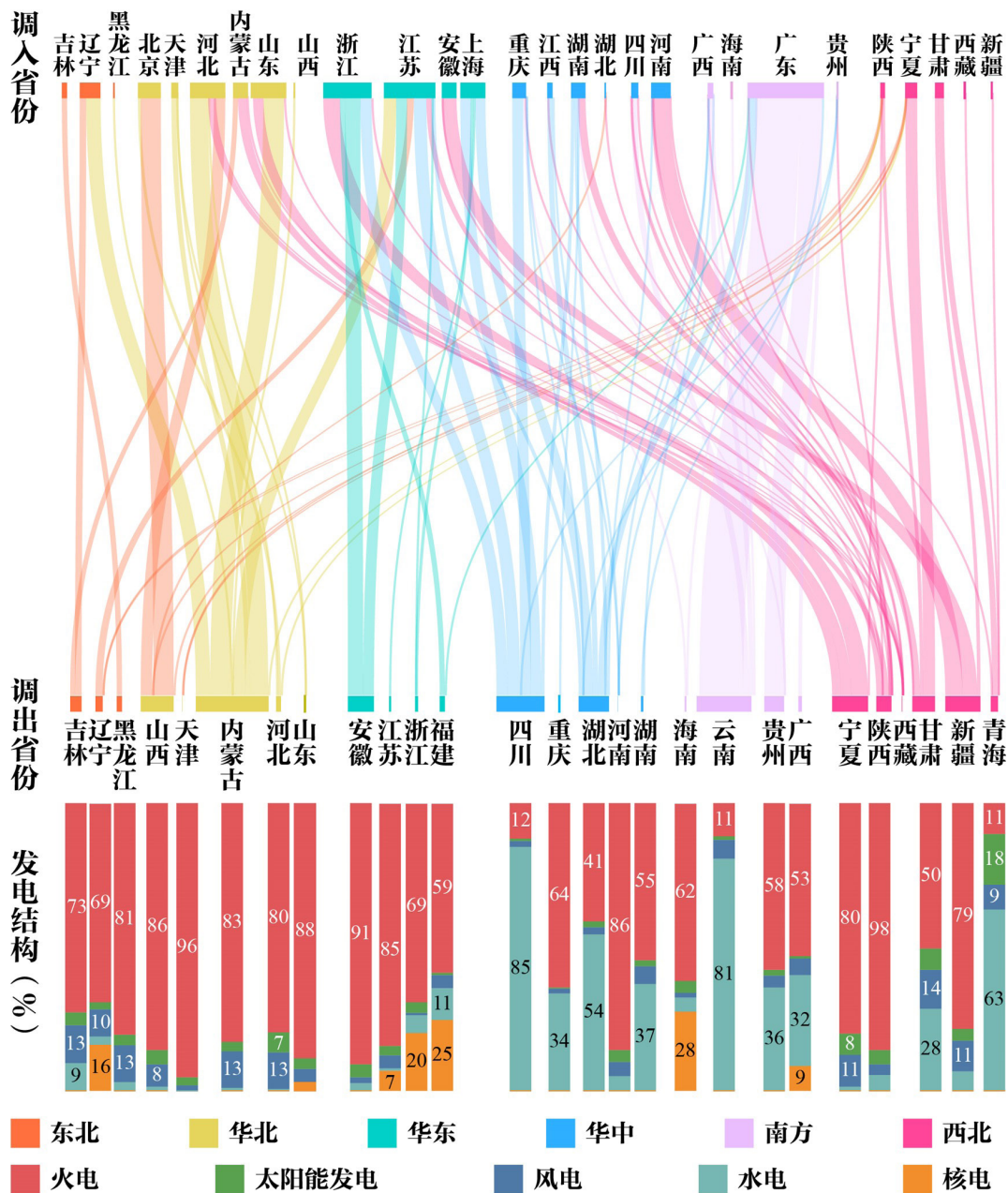


图 2 2020 年中国各省发电结构及电力交换情况

2.2 中国电网排放因子现状

基于各省份各类电源构成、省际间电力交换以及电力消费数据，从电力净调出省份出发，按照电力实际和规划流向及规模计算省级电网排放因子(图3)。

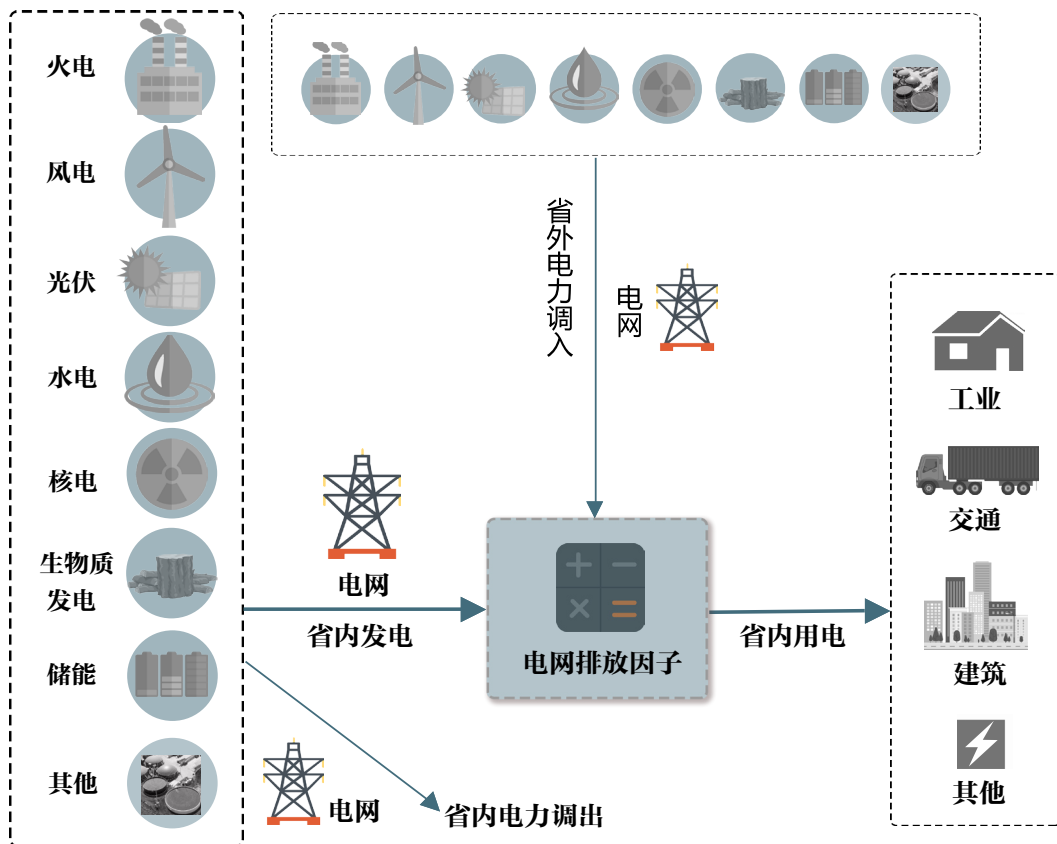


图3 电网排放因子计算框架图

从计算结果及与已公布电网排放因子数据对比可以看出，中国省级电网排放因子整体呈现东北高、西南低的分布(表1和图4)。电网排放因子较高的省份主要集中在

东北和华北北部。在这些地区中，山西、内蒙古均为中国主要煤炭产区，电力结构中煤电占比高。电网排放因子较低地区主要分布在西南地区，该地区水能资源丰富，电

源结构以水电为主。虽然省级电网排放因子有较强的地域分布特征，但相同区域内不同省份由于发电结构不同，导致省级电网排放因子与区域电网排放因子有一定差异。例如青海省电网排放因子仅是西北区域电网排放因子的 14.1%，主要

因为青海省发电装机结构以水电（30%）、风电（21%）和光伏发电（40%）为主，2020 年青海可再生能源发电量占总发电量比例高达 86%，而西北区域电网内的新疆、宁夏、陕西均以火电为主，具有较高的省级电网排放因子。



表 1 中国 2010、2012、2018 及 2020 省级电网排放因子 (kgCO₂/kWh)

省份	2010 年	2012 年	2018 年	2020 年
辽宁	0.836	0.775	0.722	0.91
吉林	0.679	0.721	0.615	0.839
黑龙江	0.816	0.797	0.663	0.814
北京	0.829	0.776	0.617	0.615
天津	0.873	0.892	0.812	0.841
河北	0.915	0.898	0.903	1.092
山西	0.88	0.849	0.74	0.841
内蒙古	0.85	0.929	0.753	1.000
山东	0.924	0.888	0.861	0.742
上海	0.793	0.624	0.564	0.548
江苏	0.736	0.75	0.683	0.695
浙江	0.682	0.665	0.525	0.532
安徽	0.791	0.809	0.776	0.763
福建	0.544	0.551	0.391	0.489
江西	0.764	0.634	0.634	0.616
河南	0.844	0.806	0.791	0.738
湖北	0.372	0.353	0.357	0.316
湖南	0.552	0.517	0.499	0.487
重庆	0.629	0.574	0.441	0.432
四川	0.289	0.248	0.103	0.117
广东	0.638	0.591	0.451	0.445
广西	0.482	0.495	0.394	0.526
海南	0.646	0.686	0.515	0.459
贵州	0.656	0.495	0.428	0.42
云南	0.415	0.306	0.092	0.146
陕西	0.87	0.769	0.767	0.641
甘肃	0.612	0.573	0.491	0.46
青海	0.226	0.232	0.26	0.095
宁夏	0.818	0.779	0.62	0.872
新疆	0.764	0.79	0.622	0.749

注：表中 2010 年数据来自国家发展和改革委员会《2010 年中国区域及省级电网平均排放因子》；2012 年数据来自国家发展和改革委员会《2012 年省级电网平均二氧化碳排放因子》；2018 年数据来自《关于商请提供 2018 年度省级人民政府控制温室气体排放目标责任落实情况自评报告的函》；2020 年数据为本研究计算结果。

与美国各个区域、欧盟各个国家电网排放因子（图 5）相比，中国各省电网排放因子分布较为分散。中国各省电网排放因子分布范围为 0.095-1.092kg/kWh，各省平均电网排放因子约 0.608 kg/kWh，居于美国（0.651 kg/kWh）和欧盟（0.278 kg/kWh）之间。此外，从各个区域之间的分散程度看，相比

美国各区域和欧盟各国，中国各省份电网排放因子差异较大。特别地，中国各个省份电网排放因子的变异系数最高达到 0.41，远高于美国各个区域电网排放那因子变异系数（0.22）（注：变异系数为标准差与平均值之比，是表征离散程度的一个归一化量度）。

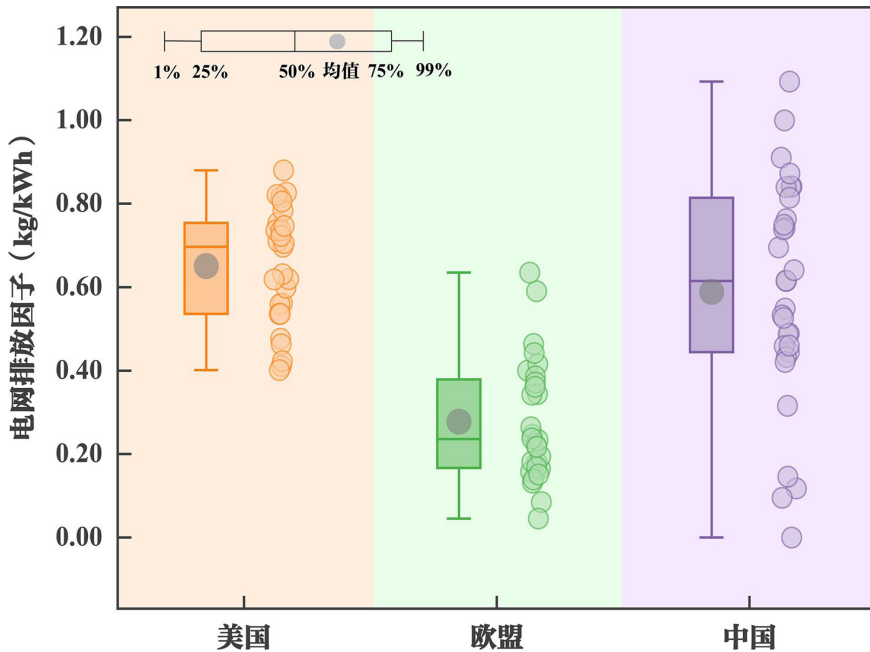


图 5 国内外区域电网排放因子对比

注：图中的点代表各个具体的省份、区域或国家。美国和欧盟数据来源：U.S. Environmental Protection Agency, 2023; EMBER 数据库。年份说明：图中美国各区域采用 2021 年数据；欧盟各国采用 2022 年数据；中国各省采用 2020 年数据。



3 双碳目标下 中国中长期电网排放因子研究

3 双碳目标下中国中长期电网排放因子研究

3.1 技术路线图

研究中国中长期省级电网排放因子主要包括以下步骤(图6): (1) 按照覆盖的地理区域确定所研究的省级电网。本次研究对象主要包括中国31个省级电网,暂不考虑香港特别行政区、澳门特别行政区和台湾省3个地区的省级电网; (2) 预测省级电网电源结构及电网间交换的电力电量。基于现状省级电网各类电源发电出力及用电需求,综

合考虑各省份达峰方案及电力发展规划,应用非线性优化模型,预测2025-2035年省级电网发电及负荷情况,经分省电力电量平衡分析及生产模拟优化,确定各省级电网电力盈亏及省间电力电量交换规模; (3) 从电力净调出省份出发,按照电力流向及规模,计算各省级电网排放因子。

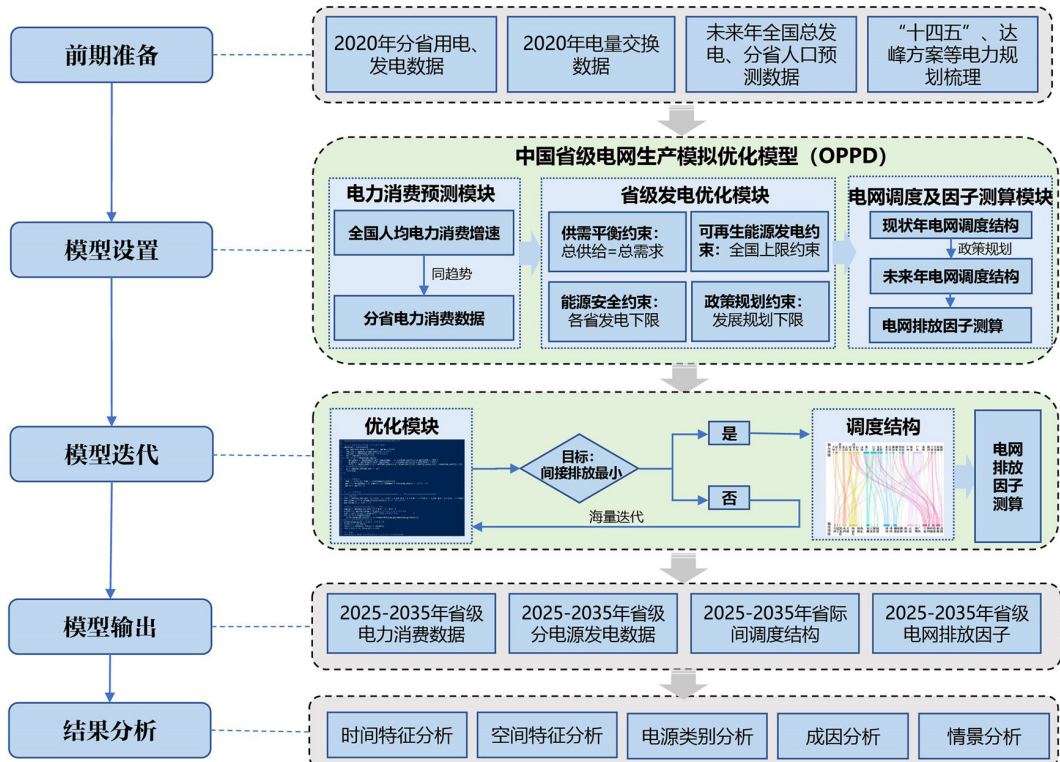


图6 中国中长期电网排放因子研究框架

3.2 情景设置

为有效评估未来中国清洁能源发电发展的不同场景，在各省份电力发展规划、碳达峰方案等已明确目标基础上，设计 2 个情景来定量分析和评估未来中国省级电网排放因子的分布区间范围。2 个情景分别为：新能源政策发展情景、新能源高速发展情景。（1）新能源政策发展情景。各省中长期可再生能源发展低预期情景。（2）新能源高速发展情景。结合生态环境部环境规划院对于可再生能源未来技术发展潜力评估结果，参考联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）第六次评估报告情景数据库亚洲和中国情景数据，以各省中长期可再生能源发展高预期为目标。

随着中国新能源装机持续快速增长，煤电将逐步向基础保障性和系统调节性电源并重转型，未来发电结构存在较大的区域异质性。从区域维度，基于已有规划，结合资源禀赋和经济发展状况等因素，对华北、华东、华中、东北、西北、西南和南方七个区域进行了分析。

华北地区

华北地区将建设冀北新能源基地和山东海上风电基地，“十五五”和“十六五”期间，新能源装机分别新增 1 亿千瓦和 2.1 亿千瓦。

华东地区风电和太阳能发电装机保持较快增长，“十六五”期间，风电、太阳能发电和核电装机分别增加 7000 万千瓦、1 亿千瓦和 3300 万千瓦。

华东地区

华中地区

华中地区各类电源装机保持稳定增长，“十四五”期间，新能源、煤电和水电装机分别新增 6200 万千瓦、2500 万千瓦和 350 万千瓦。“十六五”期间，新能源装机占比达到 60%，发电量占比接近 40%，煤电装机占比降低至 25% 以下，发电量占比约 40%。

东北地区

东北地区“十五五”和“十六五”期间，煤电装机占比持续降低至 50% 和 22%，新能源装机占比将超过 70%。

西北地区

西北地区将新建多条送电华北、华中和西南的直流外送通道，新能源持续高速增长，“十四五”和“十五五”新增装机 1.4 亿千瓦。“十六五”期间，新能源装机占比达到 75%，发电量占比超过 50%。

西南地区

西南地区结合流域水电开发，发展水风光互补，保持大规模电力外送，“十四五”和“十五五”期间，水电和新能源新增装机均超过 4000 万千瓦和 2000 万千瓦。“十六五”期间，水电装机占比接近 60%，新能源装机占比 38%。

南方地区

南方地区各类电源装机呈稳定增长。“十四五”期间，新能源、气电、水电、煤电和核电装机分别新增 7000 万千瓦、4200 万千瓦、1100 万千瓦、1500 万千瓦和 500 万千瓦以上。“十五五”除煤电装机下降，其余电源装机将持续增长。“十六五”期间，新能源装机占比达到 42%，水电装机占比略高于 20%，核电装机占比 8%。

3.3 电网排放因子情景分析

新能源政策发展情景下，从区域维度看，华北区域省份电网排放因子整体较高，南方区域省份电网排放因子整体较低，华北区域省份电网排放因子平均为南方区域省份电网排放因子的 2.3 倍。从省级维度看，各省电网排放因子平均年下降速率达 4.07%，其中，青海、云

南、海南下降速率最高，分别达到 12.26%，9.95% 和 7.47%；安徽、陕西和湖北年下降速率较低，分别为 1.12%，1.26% 和 1.28%。此外，各省份下降趋势存在较大差异，降幅变异系数 CV 高达 40%。从时间维度看，新能源政策发展情景下，2020-2035 年间各省电网排放因子

“中国 2020-2035 年，各省份电网排放因子将出现大幅下降，新能源政策发展情景下，各省降幅平均达到 43%，青海、云南、海南、吉林等 8 个省份的降幅超过 50%；新能源高速发展情景下，各省降幅平均达到 53%，青海、云南、海南、吉林等 16 个省份的降幅超过 50%；按照两类情景结果中位数考虑，各省份降幅平均达到 48%，青海、云南、海南、四川等 11 个省份的降幅超过 50%。”

整体呈现下降趋势，其中，2025-2020 年间平均降幅达 14%，2030-2025 年间平均降幅达 12%，2035-2020 年间平均降幅达 26%。

新能源高速发展情景下，从区域维度看，华北区域省份电网排放因子整体较高，南方区域省份电网排放因子整体较低，华北区域省份

电网排放因子平均为南方区域省份电网排放因子的 2.4 倍。从省份维度看，各省电网排放因子平均年下降速率达 5.24%，其中，青海、云南和海南下降速率最高，分别达到 13.94%，11.81% 和 9.10%；安徽、陕西和山西年下降速率较低，分别仅达到 2.21%，2.38% 和 2.42%。

此外，各省份下降趋势存在较大差异，降幅变异系数 CV 高达 31%。从时间维度看，新能源高速发展情景下，2020-2035 年间各省电网排放因子整体呈现下降趋势，其中，2025-2020 年间平均降幅达 24%，2030-2025 年间平均降幅达 15%，2035-2035 年间平均降幅达 28%。

按照两类情景分析结果中位数考虑，从区域维度看，华北区域省份电网排放因子整体较高，南方区

域省份电网排放因子整体较低，华北区域省份电网排放因子平均为南方区域省份电网排放因子的 2.3 倍。从省份维度看，各省电网因子平均年下降速率达 4.68%，其中，青海、云南和海南下降速率最高，分别达到 13.86%，11.09% 和 8.87%；陕西、安徽和新疆年下降速率较低，分别为 1.45%，1.63% 和 1.78%。此外，各省份下降趋势存在较大差异，降幅变异系数 CV 高达 35%。



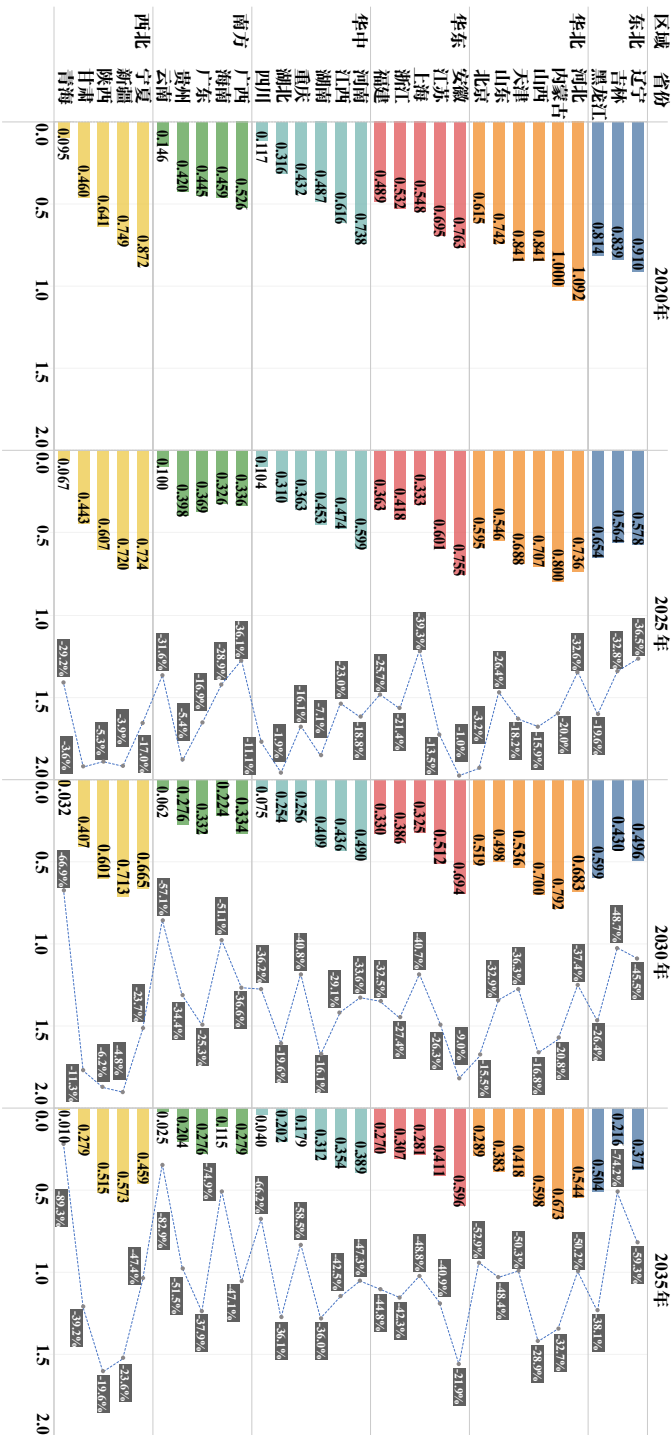


图 7 2020-2035 年中国省级电网排放因子 (kgCO₂/kWh)

注：图中数据使用两类情景中位数；折线代表未来年份各个省份电网排放因子相比于 2020 年的下降百分比。

表 2 2020-2035 年中国省级电网排放因子 (kgCO₂/kWh)

省份	2025 年	2030 年	2035 年
辽宁	0.578 (0.528-0.664)	0.496 (0.432-0.571)	0.371 (0.342-0.408)
吉林	0.564 (0.559-0.594)	0.43 (0.384-0.472)	0.216 (0.210-0.281)
黑龙江	0.654 (0.648-0.683)	0.599 (0.590-0.621)	0.504 (0.467-0.528)
北京	0.595 (0.573-0.612)	0.519 (0.476-0.532)	0.289 (0.208-0.299)
天津	0.688 (0.668-0.709)	0.536 (0.53-0.584)	0.418 (0.413-0.448)
河北	0.736 (0.714-0.784)	0.683 (0.666-0.733)	0.544 (0.512-0.571)
山西	0.707 (0.69-0.738)	0.7 (0.684-0.738)	0.598 (0.583-0.633)
内蒙古	0.8 (0.791-0.836)	0.792 (0.783-0.836)	0.673 (0.665-0.714)
山东	0.546 (0.536-0.56)	0.498 (0.489-0.506)	0.383 (0.36-0.386)
上海	0.333 (0.321-0.464)	0.325 (0.312-0.432)	0.281 (0.259-0.349)
江苏	0.601 (0.579-0.639)	0.512 (0.489-0.539)	0.411 (0.386-0.435)
浙江	0.418 (0.412-0.427)	0.386 (0.381-0.402)	0.307 (0.289-0.314)
安徽	0.755 (0.725-0.758)	0.694 (0.65-0.757)	0.596 (0.546-0.644)
福建	0.363 (0.346-0.379)	0.33 (0.322-0.358)	0.27 (0.266-0.293)
江西	0.474 (0.451-0.498)	0.436 (0.414-0.444)	0.354 (0.334-0.359)
河南	0.599 (0.553-0.621)	0.49 (0.462-0.512)	0.389 (0.356-0.409)
湖北	0.31 (0.307-0.317)	0.254 (0.247-0.316)	0.202 (0.19-0.261)
湖南	0.453 (0.447-0.46)	0.409 (0.397-0.422)	0.312 (0.3-0.331)
重庆	0.363 (0.231-0.396)	0.256 (0.193-0.304)	0.179 (0.131-0.226)
四川	0.104 (0.103-0.107)	0.075 (0.073-0.075)	0.04 (0.04-0.04)
广东	0.369 (0.359-0.382)	0.332 (0.318-0.351)	0.276 (0.269-0.295)
广西	0.336 (0.316-0.363)	0.334 (0.317-0.373)	0.279 (0.26-0.308)
海南	0.326 (0.312-0.332)	0.224 (0.188-0.236)	0.115 (0.11-0.143)
贵州	0.398 (0.393-0.408)	0.276 (0.26-0.278)	0.204 (0.146-0.206)
云南	0.1 (0.093-0.102)	0.062 (0.05-0.075)	0.025 (0.022-0.03)
陕西	0.607 (0.533-0.623)	0.601 (0.528-0.619)	0.515 (0.446-0.53)
甘肃	0.443 (0.433-0.469)	0.407 (0.391-0.439)	0.279 (0.223-0.285)
青海	0.067 (0.048-0.078)	0.032 (0.027-0.041)	0.01 (0.01-0.013)
宁夏	0.724 (0.703-0.758)	0.665 (0.643-0.714)	0.459 (0.452-0.551)
新疆	0.720 (0.601-0.745)	0.713 (0.595-0.745)	0.573 (0.516-0.599)

注：表中（）内上限和下限分别代表新能源高速发展情景和新能源政策发展情景的测算结果，最终取值为对两类情景 1.3 万次模拟优化后选取的中位数。



附件材料

附 1：研究方法

A1 数据来源

(1) 2020 年

2020 年各省份火电、水电、风电、太阳能发电量数据源自《中国电力统计年鉴 2021》，核电发电量数据源自《2020 年电力工业统计资料汇编》；跨省电量交换数据和全社会总用电量源自《2020 年电力工业统计资料汇编》；各省份人口数据来源于《2021 年中国统计年鉴》。

(2) 2025 年 -2035 年

全面梳理电力发展规划政策以及相关单位研究成果，作为未来年份发电结构以及电力交换数据的优化及预测依据。未来年份电源结构预测，主要依据各省份“十四五”及中长期规划、中国工程院《中国碳达峰碳中和战略及路径研究》、各省份碳达峰方案规划目标、国家及各地区能源电力发展规划数据等，参考国网能源研究院、中国电力科学研究院、电力规划设计总院等机构在“十四五”电源发展方面的研究成果。

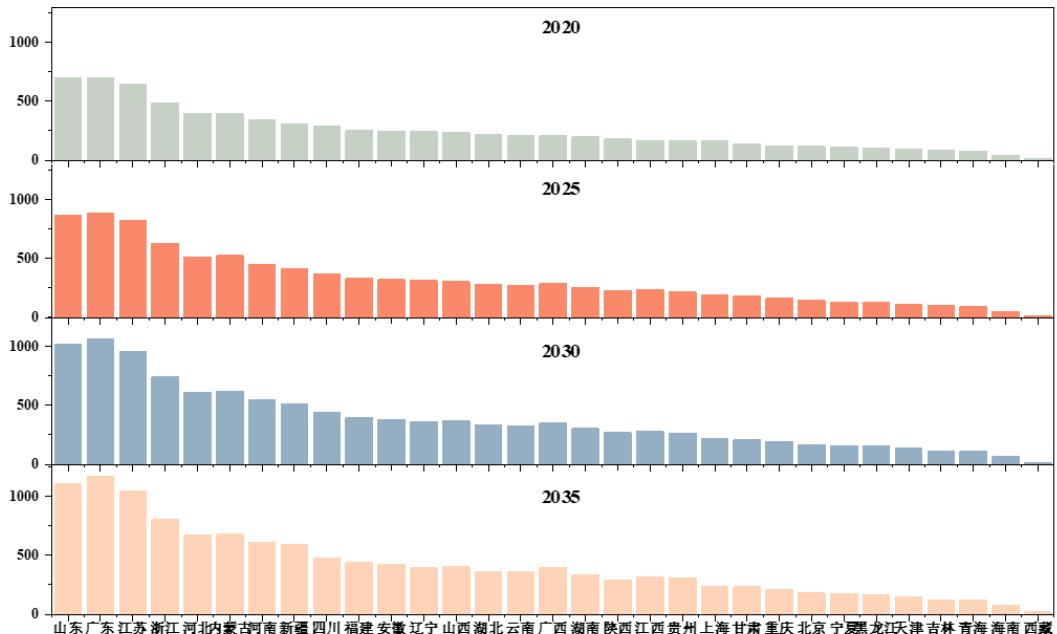
未来年份电力流预测，主要基于现有电力传输通道，根据《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》、《“十四五”现代能源体系规划》等，参考全球能源互联网发展合作组织《中国“十四五”电力发展规划研究》、国网能源研究院《中国能源电力发展展望（2021）》及《中国能源电力发展展望（2022）》等研究报告中提出的 2030 年和 2035 年跨区电力传输通道，并结合工程建设进度等实际情况，确定未来年份跨省区电力传输规模。

未来年份人口预测，主要参考国家有关部门相关研究结果，综合考虑中国人口出生率、死亡率、迁移率、教育程度，生育促进政策与超大城市人口规模政策，以及全国数据与分省数据的一致性，参考各省的“十四五”和中长期规划等，根据最新情况进行动态更新。

A2 数据优化

电力消费预测模块

本研究基于中国工程院研究的全国总发电、Chen 等（2020）研究的分省人口预测结果，预测未来年份各省份电力消费数据。具体地，假设未来年份各省份人均电力消费增速与全国人均电力消费增速一致，测算各省份未来年份电力消费（附图 1）。



附图 1 2020-2035 年中国各省份电力消费（单位：十亿千瓦时）

省级发电优化模块

(1) 目标函数

2020 年各省份火电、水电、风电、太阳能发电量数据源自《中国电力统计年鉴 2021》，核电发电量数据源自《2020 年电力工业统计资料汇编》；跨省电量交换数据和全社会总用电量源自《2020 年电力工业统计资料汇编》；各省份人口数据来源于《2021 年中国统计年鉴》。

本研究目标函数为各省份间接排放最低，见公式（1）：

$$\text{Min} : C_t = \sum_{i_{\text{out}}} [EF_{i_{\text{out}},t} \times (\sum_j G_{i_{\text{out}},j,t} - C_{i_{\text{out}},t})] \quad (1)$$

其中, i_{out} 为净调出省份; j 为不同发电类型 (即煤电、气电、风电、光电、核电、水电和生物质发电); t 为年份; C_t 为总间接排放 (g); $EF_{i_{\text{out}}}$ 为净调出省份电网排放因子 ($\text{kgCO}_2 \text{kWh}^{-1}$); $G_{i_{\text{out},t}}$ 为发电量 (kWh); $G_{i_{\text{out}}}$ 为省份电力需求 (kWh)。其中, 净调出省份的电网排放因子计算如公式 (2):

$$EF_{i_{\text{out}},t} = \frac{G_{i_{\text{out}},j_{\text{gas}},t} \times ef_{i_{\text{out}},j_{\text{gas}},t} + G_{i_{\text{out}},j_{\text{coal}},t} \times ef_{i_{\text{out}},j_{\text{coal}},t}}{\sum_j G_{i_{\text{out}},j,t}} \quad (2)$$

其中, $ef_{i_{\text{out}},j_{\text{gas}},t}$ 和 $ef_{i_{\text{out}},j_{\text{coal}},t}$ 为气电和煤电排放因子 ($\text{kgCO}_2 \text{kWh}^{-1}$)。

(2) 约束条件

约束 1: 电力需求供给平衡约束。为保证电力需求, 假设全国总电力供给量应等于电力总需求量:

$$\sum_i \sum_j G_{i,j,t} = \sum_i C_{i,t} \quad (3)$$

约束 2: 可再生能源发电约束, 见公式 (4):

$$\sum_i G_{i,j_{\text{renewable}},t} \leq \text{Potential}_{j_{\text{renewable}},t} \quad (4)$$

其中, $\text{Potential}_{j_{\text{renewable}},t}$ 为可再生能源发电上限。

约束 3: 能源安全约束。为了保证逐年增长的用电需求, 本研究设定各类电力类型发电最低增长率或上一期发电量作为发电下限, 相关增长率数据来源于工程院前期预测结果, 见公式 (5):

$$\frac{G_{i,j,t} - G_{i,j,t-1}}{G_{i,j,t-1}} \geq R_{j,t} \quad (5)$$

其中, $R_{j,t}$ 为 i 省份第 j 类电源类型第 t 年发电增长率。

约束 4：政策约束。本模型将现有政策（“十四五”等）中对各电力类型发电装机的发展规划作为未来电力发展的下限。具体地，现有政策主要涵盖三类指标：装机容量目标值、占比和增速。其中，装机容量目标值作为参数下限设置；装机容量占比约束见公式（6）：

$$\frac{G_{i,j,t} / h_{i,j}}{\sum_j (G_{i,j,t} / h_{i,j})} \geq P_{i,j,t} \quad (6)$$

其中 h_{ij} 为发电小时（h），假设发电小时与 2022 年发电小时一致。 $P_{i,j,t}$ 为政策中的装机容量占比指标。对于装机容量增速约束，约束同公式（5）。

电力交换及因子测算模块

基于现状年电力传输结构（2020 年）以及相关政策规划，初步确立 2025-2035 年电力传输网络。耦合现状及优化模型预测结果，测算 2020-2035 年各省份电网排放因子。电网排放因子划分为净调出省份和净调入省份电网排放因子。其中，净调出省份电网排放因子计算见公式（2），净调入省份电网排放因子见公式（7）：

$$EF_{i_{in},t} = \frac{G_{i_{in},j_{gas},t} \times ef_{i_{in},j_{gas},t} + G_{i_{in},j_{coal},t} \times ef_{i_{in},j_{coal},t} + \sum_{i_{out}} (D_{i_{in}i_{out},t} \times EF_{i_{out},t})}{\sum_j G_{i_{in},j,t} + \sum_{i_{out}} D_{i_{in}i_{out},t}} \quad (7)$$

其中， $D_{i_{in}i_{out},t}$ 为净调出省份 i_{out} 对净调入省份 i_{in} 的在第 t 年的电力传输量（kWh）。特别地，净调入省份 i_{in} 发电量、用电量和调入电量应满足如下等式（8）：

$$\sum_{i_{out}} D_{i_{in}i_{out},t} = \sum_j G_{i_{in},j,t} - C_{i_{in},t} \quad (8)$$

附 2：中国区域中长期电力发展规划明确边界条件

附表 1 全国及省级新能源发展政策

全国 / 省级	规划目标	政策文件
全国	到 2030 年，风电、太阳能发电总装机容量达到 12 亿千瓦以上。	2030 年前碳达峰行动方案
全国	全面推进风电和太阳能发电大规模开发和高质量发展，优先就地就近开发利用，加快负荷中心及周边地区分散式风电和分布式光伏建设，推广应用低风速风电技术。	“十四五”现代能源体系规划
北京	大力发展地热及热泵、太阳能、储能蓄热等清洁供热模式，2025 年太阳能、风电总装机容量达到 280 万千瓦；到 2030 年，太阳能、风电总装机容量达到 500 万千瓦左右。	北京市碳达峰实施方案
天津	开发陆上风电，稳妥推进海上风电。	天津市碳达峰实施方案
河北	全面推进风电、太阳能发电大规模开发利用和高质量发展。	河北省碳达峰实施方案
辽宁	科学合理规划和利用海上风能资源，加快陆上风电建设，积极推动风能资源条件较好的西部地区加快发展；充分利用矿区等废弃土地发展光伏发电，鼓励有条件地区利用屋顶、院落等发展分布式光伏发电。	“十四五”能源发展规划
黑龙江	到 2025 年风电新增装机 1000 万千瓦；到 2025 年光电新增装机 550 万千瓦。	黑龙江省国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要
上海	探索实施深远海风电示范试点，因地制宜推进陆上风电及分散式风电开发；大力推进光伏大规模开发和高质量发展。	上海市碳达峰实施方案
江苏	全力推进近海海上风电规模化发展，稳妥开展深远海风电示范建设；稳步有序开展海上光伏建设，加快推进光伏复合利用，全力发展分布式光伏系统。	江苏省碳达峰实施方案

全国 / 省级	规划目标	政策文件
浙江	有序推进抽水蓄能电站和海上风电布局建设；鼓励发展分布式光伏发电。	浙江省国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要
安徽	积极开发风电资源，在皖北平原、皖西南地区建设集中连片风电，持续推进就近接入、就地消纳的分散式风电建设；推动光伏发电规模化发展。	安徽省碳达峰实施方案
福建	2025年电力规划装机风电900万千瓦、占10.6%，新增410万千瓦；光伏装机500万千瓦、占5.9%，新增300万千瓦。	“十四五”能源发展专项规划
河南	到2025年，风电累计并网容量达到2700万千瓦以上；光伏发电并网容量达到2000万千瓦以上。	河南省碳达峰实施方案
湖北	“十四五”期间有序推进集中式风电项目建设，加快推进分散式风电项目开发，新增风电装机500万千瓦；新增光伏发电装机1500千瓦。	湖北省能源发展“十四五”规划
湖南	大力促进具备条件的风电和光伏发电快速规模化发展。	湖南省碳达峰实施方案
广东	规模化开发海上风电，打造粤东粤西两个千万千瓦级海上风电基地，适度开发风能资源较为丰富地区的陆上风电；积极发展分布式光伏发电，因地制宜建设集中式光伏电站示范项目。	广东省碳达峰实施方案
广西	积极开发陆上风电，规模化、集约化发展海上风电；积极开发光伏发电，加快推进整县屋顶分布式光伏试点。	广西壮族自治区碳达峰实施方案
海南	积极发展海上风电；加大分布式光伏应用。	海南省碳达峰实施方案
重庆	有序推进市内风电、光伏项目建设。	重庆市能源发展“十四五”规划（2021—2025年）

全国 / 省级	规划目标	政策文件
贵州	到 2025 年光伏、风电和生物质发电装机容量分别达 3100 万千瓦、1080 万千瓦、60 万千瓦；到 2030 年光伏、风电和生物质发电装机容量分别提高到 6000 万千瓦、1500 万千瓦、80 万千瓦以上。	贵州省碳达峰实施方案
陕西	全面推动风电和光伏发电大规模开发利用。	陕西省碳达峰实施方案
甘肃	在消纳条件较好、接入条件较优的中东部地区，高标准建设生态环境友好型风电场，稳步推进分散式风电项目开发；逐步扩大光伏基地建设规模，优先在沙漠、戈壁、荒漠地区开展规模化建设。	甘肃省“十四五”能源发展规划
青海	加强全省风电、太阳能发电为主的多类型清洁能源规模化开发和高质量发展。	青海省碳达峰实施方案
宁夏	重点依托沙漠、戈壁、荒漠、采煤沉陷区等建设一批百万千瓦风电光伏基地；稳步推进集中式平价风电建设和分散风能资源开发，加快老旧风电项目技改升级。	宁夏回族自治区能源领域碳达峰实施方案
新疆	积极开发分布式太阳能发电和分散式风电。	新疆生态环境保护“十四五”规划

参考文献

- Álvarez M, Cuello N, Berigüete R. Determination of the Grid CO₂ Emission Factor for the Electrical System of the Dominican Republic[C]. Puerto Rico Energy Center, Universidad del Turabo. VI International Symposium on Energy and Innovation and Entrepreneurship Forum (2014). 2013: 88-97.
- Cai B, Zhang L, Xia C, et al. A new model for China's CO₂ emission pathway using the top-down and bottom-up approaches[J]. Chinese Journal of Population, Resources and Environment, 2021, 19(4): 291-294.
- Chen Y, Guo F, Wang J, et al. Provincial and gridded population projection for China under shared socioeconomic pathways from 2010 to 2100[J]. Scientific Data, 2020, 7(1): 83.
- EMBER. Emission Intensity of Electricity Production in 2022. (April 2023) [EB/OL]. <https://ember-climate.org/countries-and-regions/regions/european-union/>.
- United States Environmental Protection Agency. eGRID with 2021 Data (January 2023) [EB/OL]. <https://www.epa.gov/egrid/summary-data>.
- Finenko A, Cheah L. Carbon Dioxide Reduction Potential in Singapore's Power Generation Sector[J]. Energy Procedia, 2014, 61: 527-532.
- Gu A, Zhou X. Emission reduction effects of the green energy investment projects of China in belt and road initiative countries[J]. Ecosystem Health and Sustainability, 2020, 6(1): 1747947.
- Maennel A, Kim H G. Comparison of greenhouse gas reduction potential through renewable energy transition in South Korea and Germany[J]. Energies, 2018, 11(1): 206.
- Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, et al. Climate change 2021: the physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, 2021, 2.
- Peng Y, Chong T, Zhang X, et al. Calculation of Emission Factors of the Northwest Regional Grid Based on Linear Support Vector Machines[C]. Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2023, 2474(1): 012083.
- Riahi K, Van Vuuren D P, Kriegler E, et al. The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview[J]. Global environmental change, 2017, 42: 153-168.
- Shukla P R., Skea J, Slade R, et al. Climate change 2022: Mitigation of climate change. Contribution of working group III to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022, 10, 9781009157926.
- UNDESA (United Nations Population Division Department of Economic and Social Affairs). World Population Prospects 2022, 2022. <https://population.un.org/wpp/>
- World Bank, Population estimates and projections Database, 2021.
- Yang Z, Zhang Q, Li J, et al. Emission factors measurement of regional power grid based on Gaussian process regression[C]. Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2023, 2474(1): 012077.

- 安徽省人民政府办公厅. 安徽省电力供应保障三年行动方案(2022-2024)[Z]. 2021.
- 北京市人民政府. 北京市“十四五”时期能源发展规划[Z]. 2022.
- 蔡博峰, 曹丽斌, 雷宇等. 中国碳中和目标下的二氧化碳排放路径[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(01): 7-14.
- 重庆市人民政府办公厅. 重庆市能源发展“十四五”规划(2021-2025年)[Z]. 2022.
- 福建省人民政府办公厅. 福建省“十四五”能源发展专项规划[Z]. 2022.
- 甘肃省人民政府办公厅. 甘肃省“十四五”能源发展规划[Z]. 2021.
- 广东省人民政府办公厅. 广东省能源发展“十四五”规划[Z]. 2022.
- 广东省人民政府. 广东省碳达峰实施方案[Z]. 2022.
- 广西壮族自治区人民政府办公厅. 广西能源发展“十四五”规划[Z]. 2022.
- 国家发展改革委. “十四五”现代能源体系规划[Z]. 2022.
- 国务院. 2030年前碳达峰行动方案[Z]. 2021.
- 国家发展和改革委员会应对气候变化司. 2010年中国区域及省级电网平均二氧化碳排放因子[Z]. 2013.
- 国家发展和改革委员会应对气候变化司. 2011年和2012年中国区域电网平均二氧化碳排放因子[Z]. 2014.
- 河北省人民政府. 河北省“十四五”节能减排综合实施方案[Z]. 2022.
- 黑龙江省人民政府. 黑龙江省国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要[Z]. 2021.
- 黑龙江省人民政府. 黑龙江省建立健全绿色低碳循环发展经济体系实施方案[Z]. 2021.
- 河南省人民政府. 河南省“十四五”现代能源体系和碳达峰碳中和规划[Z]. 2021.
- 湖北省人民政府. 湖北省能源发展“十四五”规划[Z]. 2022.
- 湖南省发展和改革委员会. 湖南省电力支撑能力提升行动方案(2022-2025年)[Z]. 2022.
- 湖南省发展和改革委员会. 湖南省“十四五”可再生能源发展规划[Z]. 2022.
- 江苏省发展改革委. 江苏省“十四五”可再生能源发展专项规划[Z]. 2022.
- 江苏省人民政府. 江苏省碳达峰实施方案[Z]. 2022.
- 江西省人民政府办公厅. 江西省“十四五”能源发展规划[Z]. 2022.
- 江西省人民政府. 江西省碳达峰实施方案[Z]. 2022.
- 吉林省能源局. 吉林省电力发展“十四五”规划[Z]. 2022.
- 吉林省人民政府办公厅. 吉林省能源发展“十四五”规划[Z]. 2022.
- 辽宁省人民政府办公厅. 辽宁省“十四五”能源发展规划[Z]. 2022.
- 马翠梅, 李士成, 葛全胜. 省级电网温室气体排放因子研究[J]. 资源科学, 2014(5): 1005-1012.
- 宁礼哲, 张哲, 蔡博峰等. 2020年中国区域和省级电网温室气体排放因子研究[J]. 环境工程, 2023, 41(03): 222-228.
- 宁礼哲, 任家琪, 张哲等. 2020年中国区域及省级电网电力碳足迹研究[J]. 环境工程, 2023, 41(03): 229-236.
- 内蒙古自治区能源局. 内蒙古自治区“十四五”电力发展规划[Z]. 2022.
- 宁夏回族自治区发展改革委. 宁夏回族自治区能源领域碳达峰实施方案[Z]. 2023.
- 宁夏回族自治区人民政府办公厅. 宁夏回族自治区能源发展“十四五”规划[Z]. 2022.
- 山东省能源局. 山东省电力发展“十四五”规划[Z]. 2022.

- 山东省人民政府. 山东省能源发展“十四五”规划[Z]. 2021.
- 山东省人民政府. 山东省碳达峰实施方案[Z]. 2022.
- 生态环境部. 关于商请提供2018年度省级人民政府控制温室气体排放目标责任落实情况自评报告的函[Z]. 2019. http://www.ncsc.org.cn/SY/tjkyhg/202003/t20200323_770098.shtml
- 上海市人民政府. 上海市能源发展“十四五”规划[Z]. 2022.
- 上海市人民政府. 上海市碳达峰实施方案[Z]. 2022. 宋然平, 朱晶晶, 候萍, 等. 准确核算每一吨排放: 企业外购电力温室气体排放因子解析[R]. 华盛顿: 世界资源研究所, 2013.
- 山西省发展和改革委员会. 山西省电力工业“十四五”发展规划[Z]. 2023.
- 四川省发展和改革委员会. 四川省“十四五”电力发展规划[Z]. 2022.
- 四川省人民政府. 四川省碳达峰实施方案[Z]. 2022.
- 天津市发展和改革委员会. 天津市电力发展“十四五”规划[Z]. 2021.
- 云南省人民政府办公厅. 云南省绿色能源发展“十四五”规划[Z]. 2022.
- 张希良, 黄晓丹, 张达等. 2022. 碳中和目标下的能源经济转型路径与政策研究. 管理世界, 38 (01): 35-66.
- 浙江省人民政府办公厅. 浙江省能源发展“十四五”规划[Z]. 2022.
- 中国电力企业联合会. 中国电力统计年鉴2021[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- 中国电力企业联合会统计与数据中心. 2020电力工业统计资料汇编[M]. 北京: 中国电力企业联合会, 2021.
- 省级温室气体清单编制指南编写组. 省级温室气体清单编制指南(试行)[R]. 国家发展和改革委员会, 2010.
- 中国工程院. 中国碳达峰碳中和战略及路径研究[M]. 2021
- 中共贵州省委. 贵州省碳达峰实施方案[Z]. 2022.
- 中共河北省委. 河北省国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要[Z]. 2021.
- 中共河南省委. 河南省碳达峰实施方案[Z]. 2023.
- 中共西藏自治区委员会. 西藏自治区国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要[Z]. 2021.



中国区域电网 二氧化碳排放因子研究

China Regional Power Grids
Carbon Dioxide Emission Factors(2023)

2023
