

RUC-MESSAGEix-China (RMC)

模型文档

中国人民大学应用经济学院

2025 年 10 月

1 模型概述

1.1 背景

RUC-MESSAGEix-China（简称 RMC 模型）是基于开源建模框架 MESSAGEix 联合开发（IIASA ECE Programme, 2020）的中国省级尺度能源-经济-环境（E3）综合评估模型，由中国人民大学应用经济学院周文戟教授团队和华东理工大学任宏涛副教授联合开发。

1.2 基本原理

RMC 模型基于全球著名综合评估建模框架 MESSAGEix，该框架由国际应用系统分析研究所（IIASA）开发和维护，并广泛应用于综合评估模型（Integrated Assessment Models, IAM）和能源系统模型（Energy System Models, ESM），可以反映能源系统长期动态演化，并包含了丰富的技术细节（IIASA ECE Programme, 2020）。虽然该框架通常用于分析整体的宏观能源系统，但也可用于单个能源部门的研究，如电力或热力部门。

作为一种优化建模框架，其总体目标函数是最小化总贴现系统成本，包括所有能源技术的投资和运营成本、可耗竭资源的开采成本和可再生能源成本、排放税以及其他支出。此外，可根据需要向模型添加约束，例如限制能源系统的总碳排放（或单个技术的碳排放）。

MESSAGEix 的更多特性和功能可参阅其在线文档¹以及相关文献，例如（Huppmann et al., 2019）。源代码可从 GitHub 网站获得²。

1.3 时空分辨率

RMC 模型目前地理分区覆盖我国内地 31 个省级行政区（暂不包含港澳台），考虑省级尺度的能源系统、经济系统和资源环境特征。

为评估我国双碳目标的系统性影响，RMC 模型目前校准至 2022 年，建模时间跨度为 2025 至 2060 年，以 5 年步长运行。由于 MESSAGEix 框架的灵活性，模型的时间范围和时间步长均可根据研究需求进行灵活修改。

¹ <https://docs.messageix.org/en/latest/index.html>

² https://github.com/iiasa/message_ix

2 参考能源系统

RMC 模型的参考能源系统包括一个完整的宏观能源系统供应链，可分为一次能源开采、二次能源处理和转换、终端能源消费三个阶段（图 2-1）。能源需求部门由三个主要的终端能源消费部门组成：工业、建筑和交通运输。工业包括钢铁、水泥、石化、化工等传统高耗能工业、一般制造业、先进制造业和信息产业等新兴产业，交通包括道路交通、轨道交通、航运等，各种交通载具划分可参考 RMC|Transport 模型相关章节，建筑包括商业设施和居民生活。能源需求在模型中体现为最终能源，由社会经济发展预测外生决定。上述过程体现在下图展示的建模系统结构中。

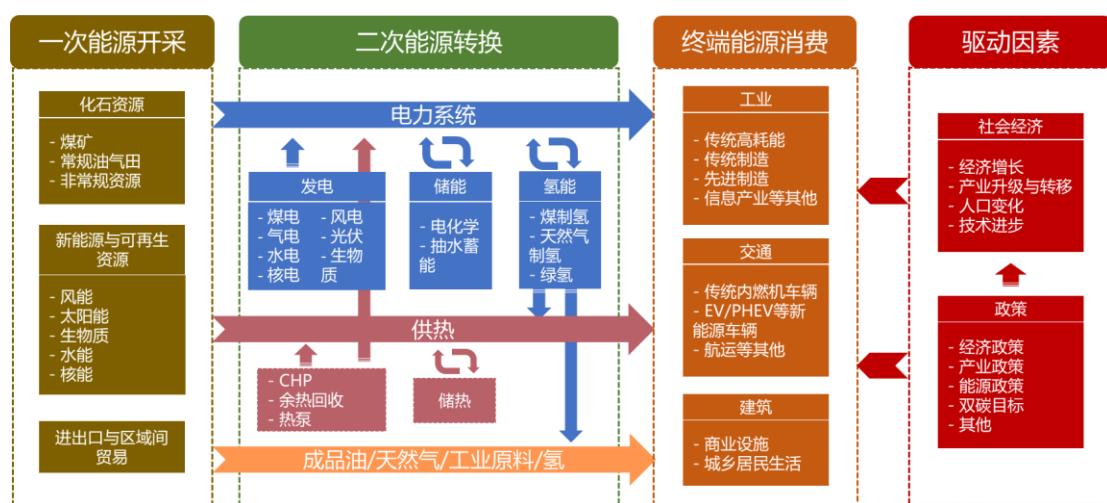


图 2-1 建模系统结构示意图

根据 MESSAGEix 的建模特征区分能源技术（过程）和能源商品，能源商品的相互转换和流动通过能源技术进行链接，从而形成能源系统的不同组成部分。能源技术具有较详细的各类参数，下图展示了在此框架下一个简化的能源系统和能源商品、技术之间的链接关系，简要显示了能源系统的范围，注意该简图并未包含系统中的全部技术组合以及区域间的能量流动关系。

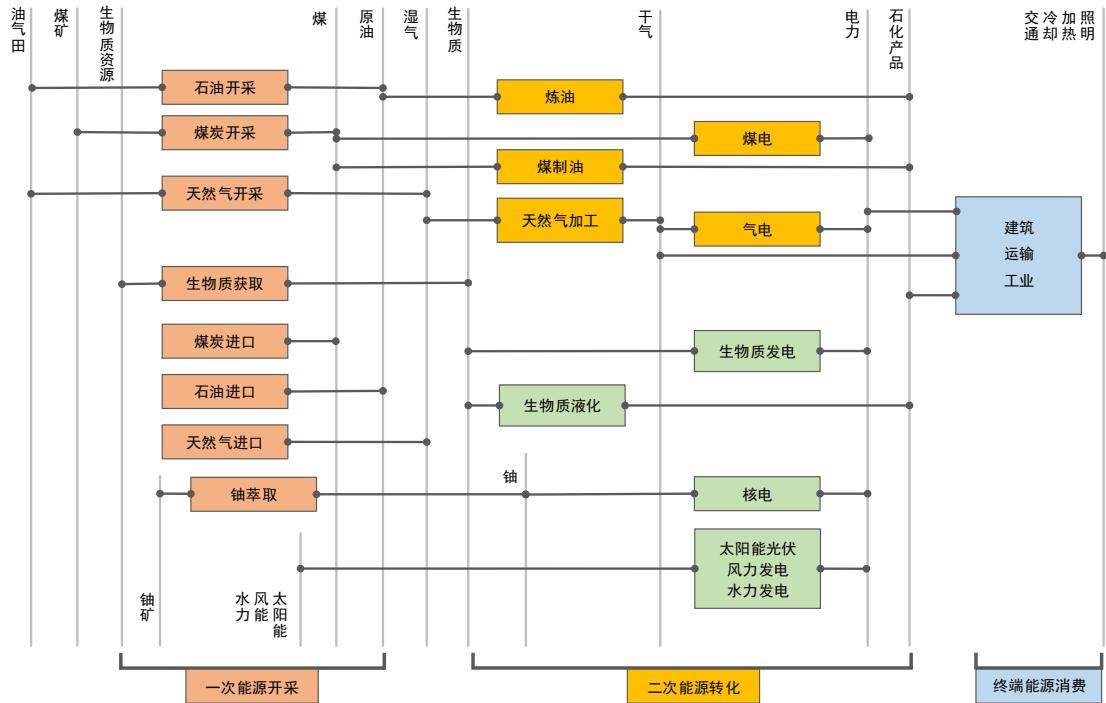


图 2-2 简化的参考能源系统

模型的当前版本包括从能源供应到消费的 400 多项能源技术，涵盖了能源供应的全范围：上游资源开采（资源供应）、中游加工转换（电厂、炼油厂、焦化厂等）、能源运输以及进出口。

2.1 能源资源禀赋

2.1.1 化石燃料储量与资源

化石燃料的可用性和成本对于确定能源系统的未来轨迹至关重要，从而影响未来气候缓解的挑战。因此，有必要了解化石燃料的可用性及其开采成本的变化。RMC 模型对化石能源资源的假设来自各种来源，包括国家层面和全球层面的数据库，如国家统计局和美国地质调查局（USGS），以及来自不同能源研究机构和组织的报告和预测结果。

模型中的“储量”是指在现有的操作条件下，未来可以从已知的油藏中开采的数量。“资源”比“储量”的定义更广泛，还包括用现有技术无法开采但未来可能开采的已发现的数量，以及地质上可能存在但目前尚未经勘探发现的数量。表 2-1 展示了 2022 年 RMC 模型中的中国化石燃料资源总量。对化石燃料储量的估计建立在当前技术假设基础上，随着未来技术的进步，被认为是“储量”和“资源”的数量可能会有较大变化。

表 2-1 RMC 模型对中国化石燃料资源的假设

类别	资源量 (ZJ)
煤	40
常规石油	0.8
非常规石油	0.6
常规天然气	1.6
非常规天然气	1.3

煤是化石燃料中规模最大的资源，约占中国化石资源总估计量的 90%。石油资源量最小，其中常规石油为 0.8 ZJ，非常规石油为 0.6 ZJ。天然气在常规资源和非常规资源上相比石油都更为丰富。

根据多种信息来源，包括一些主要的文献和报告（China National Administration of Coal Geology, 2016; Li, 2019; McGlade & Ekins, 2015; Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China, 2021; Welsby et al., 2021），我们对全国范围内化石燃料的供给成本进行了估算。图 2-3 给出了全国煤、石油、天然气的累积资源供给曲线，其中不同颜色的阴影表示不同的资源类别。

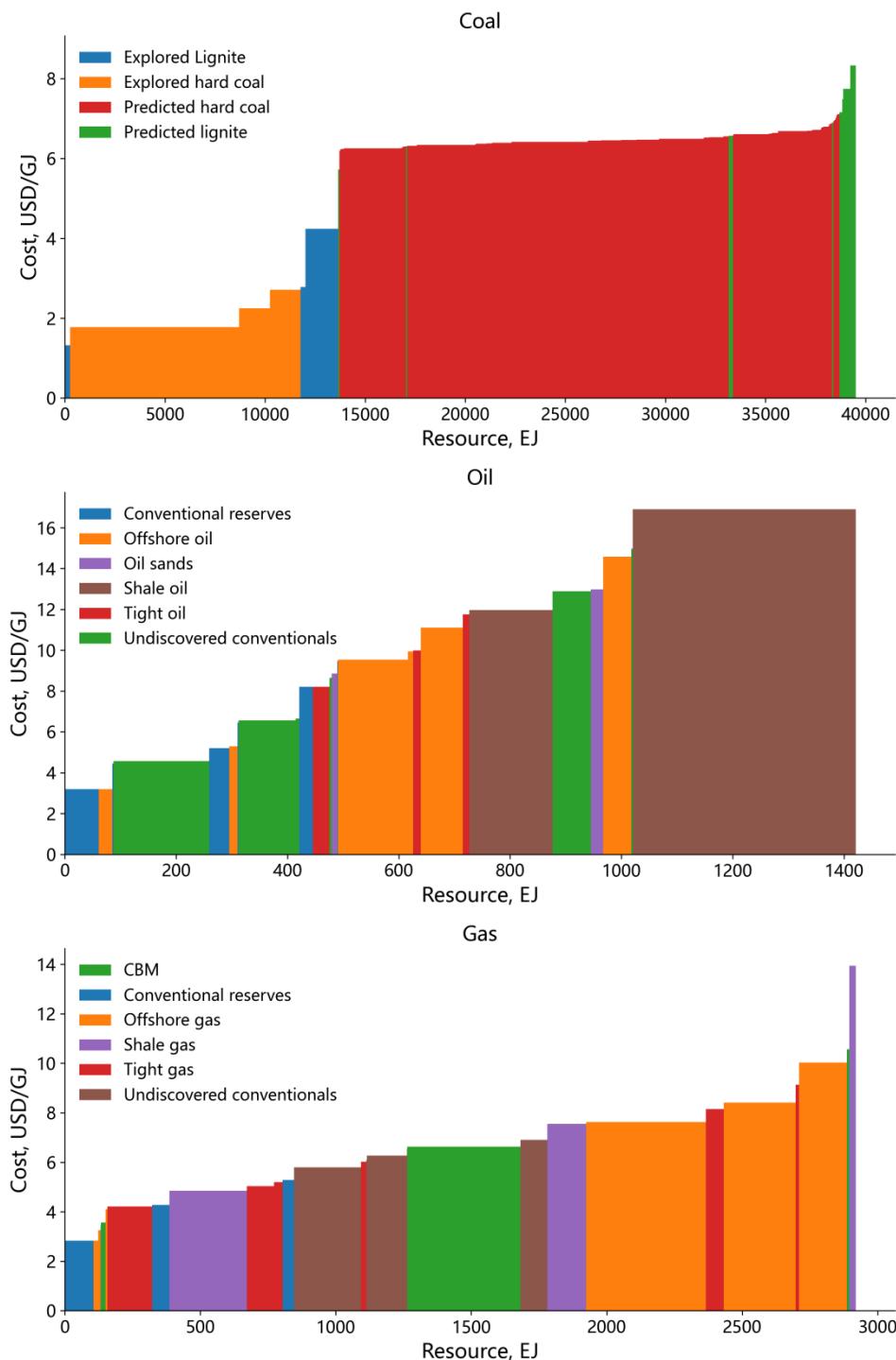


图 2-3 煤（上）、石油（中）、天然气（下）的全国累积资源供给曲线

煤炭是中国规模最大、分布最广泛的化石燃料资源。除上海外，中国的每个省份都有煤炭资源。在空间上，北方的煤炭资源数量多于南方。新疆和内蒙古是煤炭资源最多的两个地区，其次是山西和陕西。这四个北方省份约占全国煤炭资源总量的 79%。常规石油资源分布也主要集中在北方地区，新疆、甘肃、陕西、黑龙江、山东等地的常规陆上石油资源量均在 10 亿吨以上。海洋石油资

源主要来自海南、天津、广东等沿海省份。非常规石油主要以页岩油的形式存在，在全国的分布高度集中，主要分布在辽宁、新疆和吉林。常规天然气与非常规天然气的分布格局相似，四川、陕西、内蒙古在两种资源上均较为丰富。由于发达的煤炭产业，山西和内蒙古也拥有大量的煤层气（CBM）资源。海南和广东还拥有大量尚未开发的海洋天然气资源。不同类别化石资源的区域分布情况如图 2-4 至图 2-11 所示。



图 2-4 煤炭剩余可采探获资源量的区域分布 (Gt)

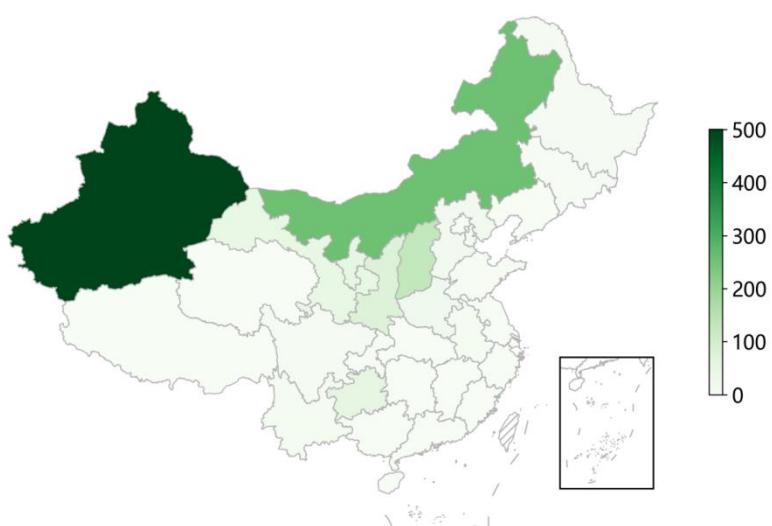


图 2-5 煤炭剩余可采预测资源量的区域分布 (Gt)

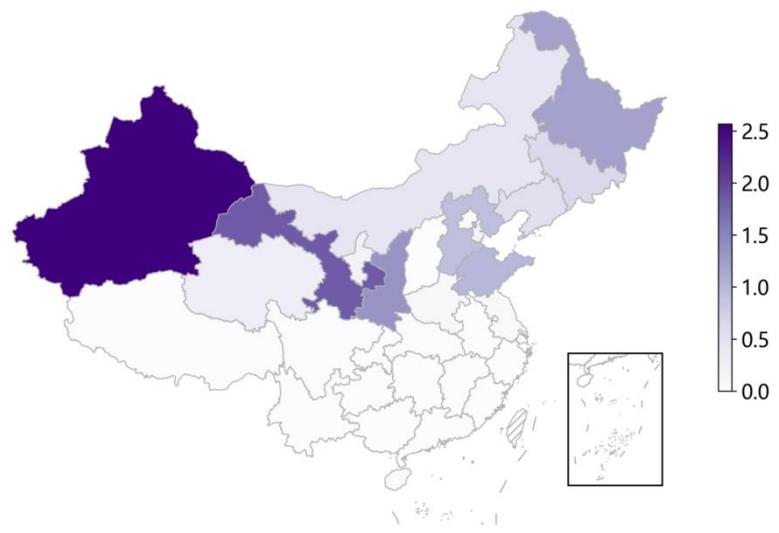


图 2-6 陆上常规石油剩余可采资源量的区域分布 (Gt)



图 2-7 海洋石油剩余可采资源量的区域分布 (Gt)



图 2-8 非常规石油剩余可采资源量的区域分布 (Gt)



图 2-9 陆上常规天然气剩余可采资源量的区域分布 (Tcm)



图 2-10 海洋天然气剩余可采资源量的区域分布 (Tcm)



图 2-11 非常规天然气剩余可采资源量的区域分布 (Tcm)

2.1.2 生物质资源

生物质能是 RMC 模型中一种潜在的重要可再生能源，涵盖商业用途和非商业用途。商业用途指在发电厂或生物燃料炼厂中使用生物能源，而非商业用途则指将生物能源用于住宅的取暖与烹饪等，主要用于农村家庭。模型对全国生物质资源潜力的估计参考了各类机构报告和学术研究。模型中考虑的生物质资源包括农业剩余物、林业剩余物、能源作物、市政污水、城镇固体废物以及禽畜粪肥。

表 2-2 展示了中国生物质资源的总量、可收集量和能源化利用潜力。能源

化利用潜力是指从可收集量中扣除非能源使用后所剩余的部分。凭借发达的农业和畜牧业，全国 60%以上的生物质资源来自农业剩余物和禽畜粪肥。在广西和云南等南部省份，丰富的森林资源也为生物质的发展提供了相当大的潜力。值得注意的是，尽管全国各地种植能源作物的潜力巨大，但相关的市场和工业体系仍不健全。因此，预计能源作物离成为中国生物质利用的主要来源可能还需要较长时间。

表 2-2 中国生物质资源规模与利用潜力 (EJ)

类别	总资源	可收集资源	能源化利用潜力
农业剩余物	15.3	13.3	4.2
禽畜粪肥	22.7	22.7	7.6
能源作物	16.0	16.0	16.0
林业剩余物	5.9	5.9	2.6
市政污水	0.2	0.2	0.2
城镇固废	1.7	1.7	1.7

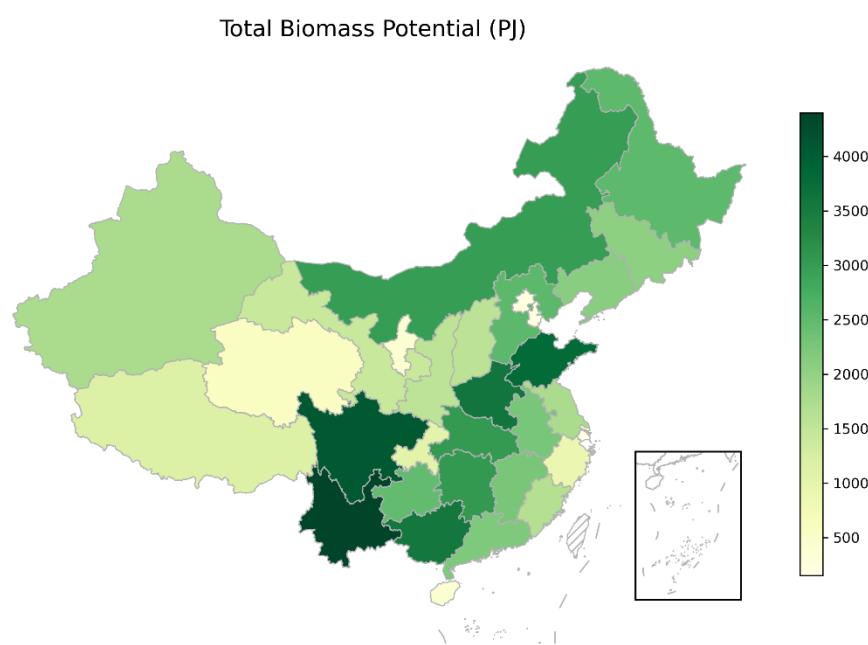


图 2-12 生物质资源总量的区域分布 (PJ)

2.1.3 风能和太阳能资源

风能和太阳能作为清洁可再生能源，对于中国实现 2060 年碳中和目标具有至关重要的战略意义。目前，中国风光装机容量已位居世界前列，但开发程度

仍然较低，仅占其巨大技术潜力的很小一部分，资源利用仍具有广阔的提升空间。模型参考多重来源对各省风能和太阳能资源潜力进行校准，包括基于地理信息系统（GIS）的精细化评估研究、中国气象局提供的年景公报等（China Meteorological Administration, 2025; Chinese Academy of Environmental Planning, 2024; Wang et al., 2022）。

从空间分布看，风能丰富区主要集中于西部、北部和沿海省份，而光伏资源则以西部和北部地区为主，“三北”地区集中了全国绝大部分的潜力。具体而言，全国风电技术潜力约 109.5 亿千瓦，光伏技术潜力约 456 亿千瓦。总体来看，中国拥有足以支撑能源转型的丰富可再生能源禀赋，未来风光能源基地的宏观布局和分布式开发应当关注重点区域。

表 2-3 各省风能和太阳能发电资源潜力

区域	发电装机容量 (GW)						发电量 (TWh)	
	风能	陆风	海风	太阳能	集中式	分布式	风能	太阳能
内蒙古	2697	2697	-	9460	9230	230	7143	14167
黑龙江	706	706	-	301	149	152	1937	394
吉林	304	304	-	356	243	113	861	466
辽宁	289	176	113	191	17	174	777	238
甘肃	321	321	-	2758	2682	76	718	4128
宁夏	82	82	-	282	253	29	241	391
青海	186	186	-	3914	3886	28	379	6491
陕西	165	165	-	372	298	75	448	458
新疆	618	618	-	21198	21054	144	1293	29265
北京	-	-	-	61	2	59	-	72
河北	334	281	53	338	59	279	988	587
山东	596	296	300	417	21	395	1636	552
山西	127	127	-	311	194	117	364	439
天津	15	11	4	42	-	42	42	50
重庆	43	43	-	22	1	21	108	3
贵州	109	109	-	104	76	28	296	105
四川	223	223	-	157	75	82	621	182
西藏	524	524	-	3332	3327	4	1375	6177
广东	677	141	536	202	19	182	1977	257

广西	250	181	69	187	101	86	708	222
海南	246	45	201	29	10	19	563	33
云南	132	132	-	115	60	55	374	159
河南	291	291	-	303	14	289	869	377
湖北	206	206	-	157	33	124	558	188
湖南	174	174	-	91	9	83	462	96
江西	152	152	-	97	27	70	423	109
安徽	225	225	-	233	11	222	679	280
福建	321	32	289	91	18	73	957	102
江苏	441	177	264	302	5	297	1200	372
上海	55	10	45	38	-	37	150	51
浙江	429	50	379	112	4	108	1163	121
全国	10948	8694	2254	45604	41878	3726	29308	66529

2.2 电力系统

RMC 模型涵盖了中国 31 个省级行政区电力系统内部与电力系统间的全部发电、输电和储能。该系统可以与其他模块一致的年度时间分辨率运行，也可与具有小时分辨率（一个建模年为 8760 小时）的专用电力系统模型 CPOST 进行软链接，以捕获电力系统中更详细的特征。RMC 和 CPOST 模型在电力系统的空间分辨率和技术考虑上保持一致。关于 CPOST 的描述可参阅对应的模型文档（Renmin University of China, 2025）。

2.2.1 发电技术

电力系统涵盖多种发电技术，包括化石燃料发电、核能和可再生能源发电，如水力发电、风能、太阳能和生物质发电，以及储能与输电设施。在燃煤发电中，有大型超超临界、超临界机组等技术，以及相对落后的亚临界技术。燃气发电包括大型联合循环燃气轮机（CCGT）机组和传统的开式循环燃气轮机（OCGT）发电技术。该系统还考虑了发电机组对碳捕获和存储（CCS）技术的集成。模型中涵盖的化石能源与可再生能源发电技术列表如下所示：

- 燃煤发电（无 CCS）：超超临界（USC）、超临界（SC）、亚临界（Sub-C）；
- 燃煤发电（有 CCS）：超超临界+CCS、超临界+CCS；
- 燃气发电（无 CCS）：联合循环燃气轮机（CCGT）、开式循环燃气轮机

(OCGT);

- 燃气发电（有 CCS）：CCGT+CCS、OCGT+CCS；
- 生物质发电（无 CCS）；
- 生物质发电（有 CCS）；
- 太阳能发电：集中式/分布式光伏电站（PV）、太阳能热电厂（聚光太阳能发电，CSP）；
- 风力发电：陆上风电、海上风电；
- 核电。

CCS 被视为在母技术（如超超临界煤电等）之上的“附加技术”（add-on），关于其建模细节可参阅 MESSAGEix 文档。

2.2.2 投资成本

基于对大量文献的参考，表 2-4 展示了基准情景下各类技术的投资成本路径。（CEIC, 2024; China Meteorological Administration, 2023; Dianchacha, 2024; Ember, 2023; EMBER, 2024; IEA, 2022, 2023b, 2023a, 2024; Lu et al., 2021; McElroy et al., 2009; National Bureau of Statistics of China, 2022, 2023, 2024; Wang et al., 2022）。模型允许在不同的情景设计中对各种特定发电技术的成本进行调整。

表 2-4 RMC 模型中主要技术的投资成本假设（US\$/kW）

技术	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055	2060
燃煤发电（无 CCS）	631	606	583	563	546	533	523	514
燃煤发电（有 CCS）	1015	932	860	798	753	719	695	668
燃气发电（无 CCS）	325	315	306	298	291	286	282	278
燃气发电（有 CCS）	678	617	564	519	487	463	446	427
水电	2168	2059	1966	1873	1873	1873	1873	1873
核电	2311	2242	2173	2103	2034	1965	1910	1865
太阳能发电（分布式光伏）	393	336	279	256	235	216	201	189
太阳能发电（集中式光伏）	493	394	296	272	251	232	217	205
太阳能发电（光热）	2329	1491	1400	1309	1227	1154	1095	1048
陆上风电	600	521	489	457	428	402	378	360
海上风电	1383	1047	808	778	750	726	706	690

生物质发电（无 CCS）	1290	1231	1191	1150	1113	1080	1053	1032
生物质发电（有 CCS）	2321	2108	1936	1784	1668	1580	1515	1445
电池储能	824	798	773	764	757	750	744	740
抽水蓄能	1237	1090	1002	949	917	898	889	884
特高压输电	329	325	315	306	299	296	295	295

2.3 其他能源转换

与电力类似，RMC 模型也考虑了基于化石和可再生能源的一系列区域供暖技术。这些供热厂将热量送入区域供暖系统，然后用于终端使用部门。

除了电力和集中供热外，模型还包含了能源转换部门的另外三个子部门：液体燃料生产、气体燃料生产和制氢。

除了炼油作为目前液体燃料的主要供应技术外，模型还包括从多种原料生产液体燃料的各种替代途径，如煤的液化、天然气液化和生物质液化技术，同样也考虑了 CCS 的集成。气体燃料生产技术包括生物质气化和煤气化。制氢包括煤和生物质的气化、天然气的蒸汽甲烷重整和电解氢。

2.4 技术进步

在 RMC 模型中，技术进步被视为外生因素。但目前已经对技术进步进行了额外的研究，通过能源工程模型中的学习曲线纳入了技术变化的内生因素，并分析市场结构对技术成本的影响。

目前的成本和效率参数，如转换效率和排放系数，通常来自现有的工程研究；同时也补充了关于这些参数的替代性预测，以反映对未来模型结果产生重大影响的不确定性。

2.5 能源需求

来自工业、交通和住宅/商业等终端使用部门的能源服务需求根据社会经济发展预测所计算，外生于 RMC 模型。这些需求通过使用基于 Python 的情景生成器得到。情景生成器将历史人均 GDP 与区域层面的终端能源需求相关联，并利用对 GDP 和人口增长的预测，外推出各部门能源服务的未来需求。情景生成器对历史数据集进行回归分析，以建立 31 个 RMC 区域的自变量（人均 GDP）与最终能源强度、不同能源终端使用部门（工业、住宅/商业、交通）的终端能

源份额以及工业和住宅/商业部门之间的用电份额等因变量之间的关系。基于以上输入的参数，可以预测出终端能源强度以及在部门间的分布情况。

特定部门的模型正在动态开发中，通过不同方式实现与 RMC 主模型的链接。

3 社会经济因素

人口和经济发展水平对减缓和适应气候变化的能力产生了深远的影响（O'Neill et al., 2014）。在 RMC 模型中，人口变化和经济增长是决定未来能源需求的外生关键因素。

3.1 人口

在模型的基准版本中，全国和各区域的人口发展趋势参考 Chen 等以及联合国《世界人口展望》的预测进行计算（Chen et al., 2020; UN DESA/Population Division, 2024）。Chen 等根据年龄（0 至 100 岁以上）、性别（男性和女性）和教育水平（文盲、小学、初中、高中、大专、本科、硕士及以上）在 5 条共享社会经济路径（SSP1-5）对 2010 至 2100 年中国省级人口进行了估计。我们的研究使用 SSP2 路径下的预测，该路径代表了一条未来发展遵循历史模式的中间路径（O'Neill et al., 2017）。由于 Chen 等人的预测从 2010 年开始，并未包括最新趋势，因此我们使用来自国家统计局的数据以及联合国世界人口展望的全国人口预测对省级预测值进行校准和更新。结果显示，中国的全国总人口在 2021 年达到 14 亿的峰值水平，并在此后缓慢下降，到本世纪末降至 6.31 亿人。模型中各区域校准后的人口变化趋势如图 3-1 所示。与（Chen et al., 2020）的原始结果一致，模型还区分了农村和城市人口，并考虑了不同的家庭收入水平和能源消费结构。

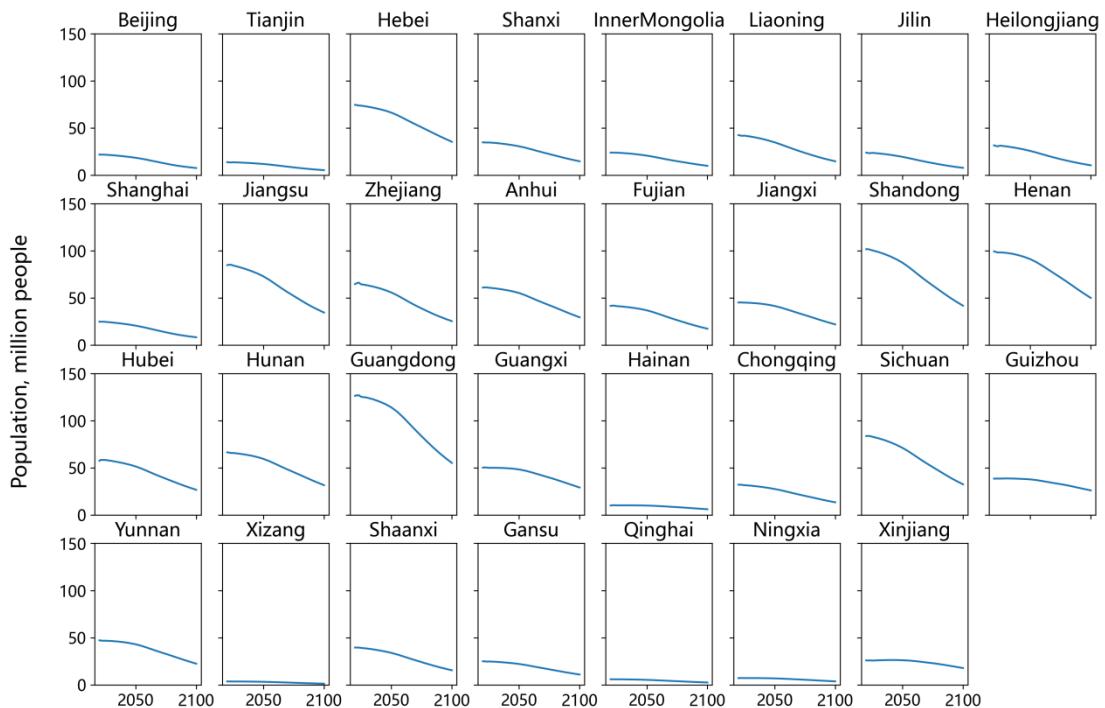


图 3-1 2020-2100 年中国分省总人口变化趋势

3.2 经济增长

模型中省级层面的未来经济增长路径基于相关文献中的 GDP 预测 (Bai & Zhang, 2017; Christensen et al., 2018; Jing et al., 2022; Leimbach et al., 2017; Pan et al., 2020; Yang et al., 2024)。根据对人口和 GDP 规模的预测，可进一步计算出未来不同区域的人均 GDP 变化情况。到本世纪末，全国人均收入预计将超过 10 万美元，超过 2020 年的 10 倍。图 3-2 和图 3-3 显示，各省未来将实现显著的经济增长，但不同地区的经济并不完全趋同，省份之间的经济发展水平差异仍然存在。

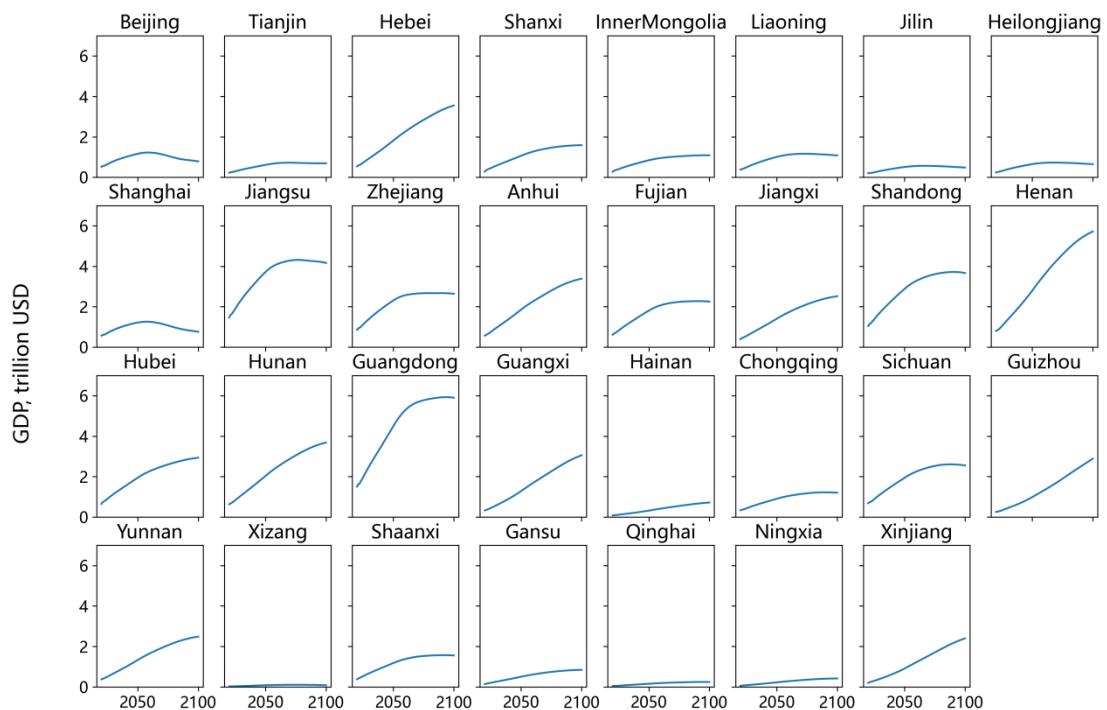


图 3-2 2020-2100 年中国分省 GDP 变化趋势

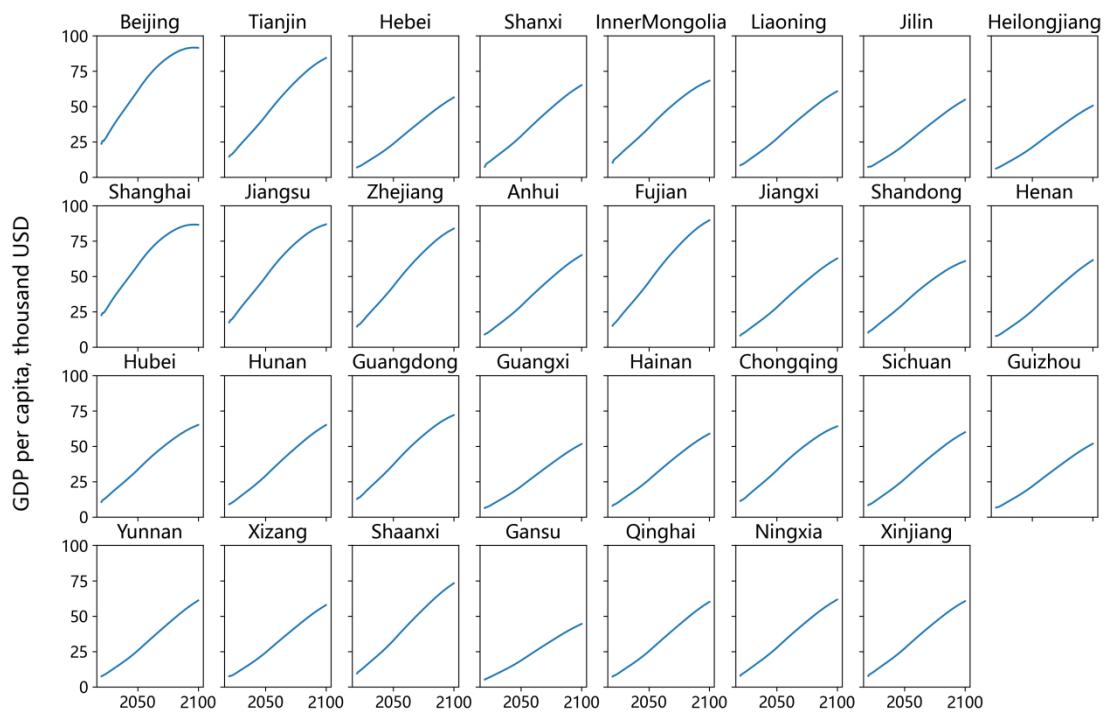


图 3-3 2020-2100 年中国分省人均 GDP 变化趋势

4 钢铁模块：RMC|Steel

RUC-MESSAGEix-China|Steel（RMC|Steel）是 RMC 模型家族聚焦于钢铁工业的模块，用于分析中国钢铁工业在绿色低碳转型过程中的供需变化、技术组合、能源结构以及对特定能源商品（如氢能）的需求等。模型同样采用 MESSAGEix 的建模框架，地理分区包括内地 31 个省级行政单位，以自下而上的方式包含了钢铁领域的主要生产流程和关键技术信息，并已根据产能、产量和技术成本的实际历史数据进行校准。

4.1 模型结构

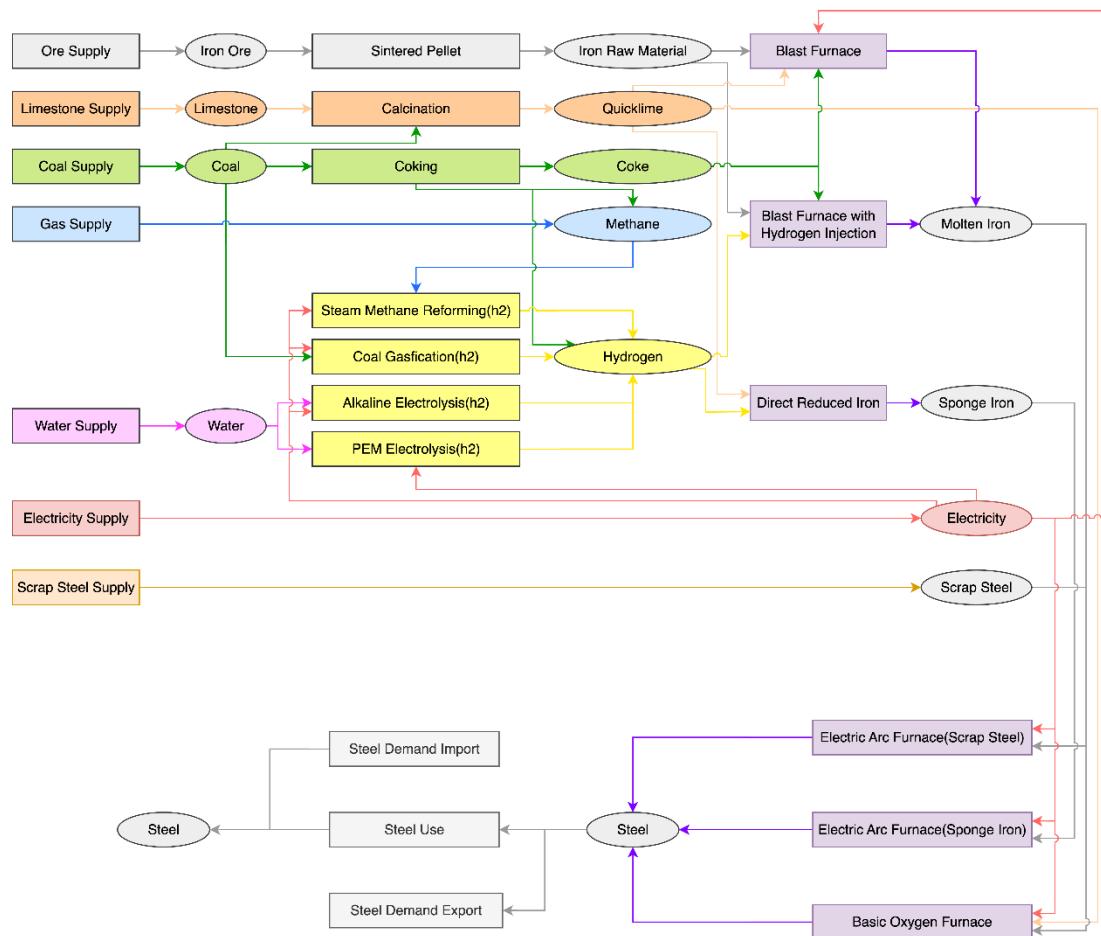


图 4-1 RMC|Steel 模型技术流程连接图

如图 4-1 所示，RMC|Steel 模型主要对原材料处理、生铁冶炼、粗钢冶炼进行建模，不涉及后续钢卷、钢坯等产品的加工。其中，原材料处理主要包括：

- (1) 炼焦（coking）
- (2) 石灰煅烧（calcin）

(3) 铁矿石烧结与球团 (sint_pelle)

炼铁技术主要包括：

- (1) 高炉炼铁 (bf)
- (2) 富氢高炉炼铁 (bf_h2)
- (3) 天然气基直接还原铁 (dri)
- (4) 氢基直接还原铁 (hdri)
- (5) 氢基直接熔融还原 (hmr)

炼钢技术主要包括：

- (1) 氧气顶吹转炉炼钢 (bof)
- (2) 以废钢为原料的电弧炉炼钢 (eaf_scrap)
- (3) 以（直接还原铁产出的）海绵铁为原料的电弧炉炼钢 (eaf_spg)

对于高炉炼铁、直接还原铁和转炉炼钢技术，还可附加碳捕集与封存 (CCS) 技术以减少碳排放；对于高炉还可进行氢气喷吹装置改造，也以附加技术的形式实现。此外，模型对氢气生产层面做了细致划分，从生产技术角度划分为煤制氢、天然气制氢、电解水制氢，并可附加相应的 CCS 技术。各项主要技术的输入和输出关系如下表所示。

表 4-1 RMC|Steel 主要技术的输入与输出

技术	输入	输出
高炉	焦炭，电力，铁矿石，生石灰	铁水
直接还原铁	氢气，铁矿石	海绵铁
转炉	铁水，电力，生石灰	粗钢
电弧炉（海绵铁）	海绵铁，电力	粗钢
电弧炉（废钢）	废钢、电力	粗钢
煤制氢	煤炭	氢气
天然气制氢	天然气	氢气
电解水制氢	水，电力	氢气

4.2 主要参数设置

4.2.1 投资成本

技术	投资成本	单位	来源
烧结/球团预处理	45.87	M\$/Mtpa ³	Steelonthenet.com, 2023
高温煅烧石灰石	109.6	M\$/Mtpa	Chumin, 2025
炼焦	446.2	M\$/Mtpa	Reliable Plant, 2008
高炉炼铁	211	M\$/Mtpa	IEA-ETSAP, 2010
高炉加装喷吹氢气装置改造	40	M\$/Mtpa	-
高炉加装 CCS	80.24	M\$/Mtpa	He et al., 2025; Wang et al., 2025
氢基直接还原铁	580	M\$/Mtpa	Christoph Heinemann et al., 2024
转炉炼钢	100	M\$/Mtpa	IEA-ETSAP, 2010
转炉加装 CCS	80.24	M\$/Mtpa	He et al., 2025
电弧炉（以 DRI 为主要原料）	143	M\$/Mtpa	Steelonthenet.com, 2025
电弧炉（以废钢为主要原料）	143	M\$/Mtpa	Steelonthenet.com, 2025
煤制氢	10692	M\$/Mtpa	Energy Transitions Commission, 2023; International Energy Agency, 2020
煤制氢附加 CCS	444	M\$/Mtpa	International Energy Agency, 2020
天然气制氢	3641.3	M\$/Mtpa	International Energy Agency, 2020
天然气制氢附加 CCS	2693 (2050 年 1488.5)	M\$/Mtpa	International Energy Agency, 2020
电解水制氢	8296.5 (2050 年 3583.1)	M\$/Mtpa	International Energy Agency, 2020

³ tpa: tons per annum.

4.2.2 固定运维成本

技术名称	运维成本	单位	参考文献
烧结/球团预处理	1.835	M\$/Mtpa	Arasto, 2015
高温煅烧石灰石	8.05	M\$/Mtpa	AGICO Cement Plant Equipment, 2025
焦化	17.18	M\$/Mtpa	Gallaher, Depro and Agency, 2002
高炉炼铁	14.14	M\$/Mtpa	Gallaher, Depro and Agency, 2002; IEA, 2013
富氢高炉炼铁	10	M\$/Mtpa	-
高炉加装 CCS	4.07	M\$/Mtpa	IEA, 2013
(氢基) 直接还原铁	20	M\$/Mtpa	Steelonthenet.com, 2025
转炉炼钢	15.45	M\$/Mtpa	IEA Greenhouse Gas R&D Programme, 2024
转炉加装 CCS	2.16	M\$/Mtpa	IEA, 2013
电弧炉 (DRI)	81.24	M\$/Mtpa	Vogl, Åhman and Nilsson, 2018; Benavides et al., 2024
电弧炉 (废钢)	81.24	M\$/Mtpa	Vogl, Åhman and Nilsson, 2018; Benavides et al., 2024
煤制氢	433	M\$/Mtpa	International Energy Agency, 2020; 邵乐 et al., 2024
煤制氢加装 CCS	18	M\$/Mtpa	/
天然气制氢	454.5	M\$/Mtpa	邵乐 et al., 2024
天然气制氢加装 CCS	50.2	M\$/Mtpa	/
电解水制氢	182.5	M\$/Mtpa	International Energy Agency, 2020

4.2.3 可变运维成本

技术名称	可变成本	单位	参考文献
铁矿石供应	110.61	M\$/Mt	Trading Economics, 2025
石灰石供应	19.59	M\$/Mt	矿权资源网, 2025
煤矿供应	195.89	M\$/Mt	国家统计局, 2025
天然气供应	694	M\$/Mt	CEIC Data, 2025
电力供应	0.085	M\$/GWh	国务院国有资产监督管理委员会, 2020; 新浪财经, 2023
水供应	0.676	M\$/Mt	CEIC Data, 2025
废钢供应	349.8	M\$/Mt	《中国冶金报》-中国钢铁新闻网, 2025
烧结/球团预处理	20	M\$/Mt	Rahbari et al., 2025
煤制氢	434.1	M\$/Mt	邵乐 et al., 2024
天然气制氢	338.5	M\$/Mt	邵乐 et al., 2024
天然气制氢附加 CCS	0	M\$/Mt	/
电解水制氢	0	M\$/Mt	/

4.2.4 碳排放系数

技术名称	碳排放系数	单位	参考文献
烧结/球团预处理	0.2	t-CO ₂ /t-output	中国钢铁新闻网, 2023; 赵泽东, 李嘉璇, and 李原野, 2025; steelonthenet, no date
高温煅烧石灰石	1	t-CO ₂ /t-output	Shenlan Environmental Protection Industry Development Co., Ltd., 2025
炼焦	0.794	t-CO ₂ /t-output	Steelonthenet, 2025
高炉炼铁	1.22	t-CO ₂ /t-output	Steelonthenet, 2025
富氢高炉炼铁	0.67	t-CO ₂ /t-output	OECD, 2025; Zhang et al., 2024
高炉加装 CCS	0.0523	t-CO ₂ /t-output	Santos et al., 2013
(氨基)直接还原铁	0.04	t-CO ₂ /t-output	Rechberger et al., 2020
转炉炼钢	0.181	t-CO ₂ /t-output	European Commission. Joint Research Centre., 2022; Nancy Margolis & Ross Brindle, 2000; steelonthenet, n.d.
转炉加装 CCS	0.03	t-CO ₂ /t-output	Butterworth, 2024
电弧炉 (DRI)	0.03	t-CO ₂ /t-output	European Commission. Joint Research Centre., 2022
电弧炉 (废钢)	0.03	t-CO ₂ /t-output	European Commission. Joint Research Centre., 2022
煤制氢	20.1	t-CO ₂ /t-output	IEA, 2019
煤制氢加装 CCS	2.1	t-CO ₂ /t-output	IEA, 2019
天然气制氢	10.13	t-CO ₂ /t-output	Baltac et al., 2022
天然气制氢加装 CCS	2.32	t-CO ₂ /t-output	Baltac et al., 2022

5 交通模块：RMC|Transport

RMC|Transport 是 RMC 模型家族聚焦于交通部门的模块，用于分析中国交通部门在绿色低碳转型过程中的供需变化、技术组合、能源结构、碳排放以及其他影响（例如关键金属等影响）。模型采用存量-流量（Stock-Flow）的系统动力学建模方式，地理分区包括内地 31 个省级行政单位，以自下而上的方式包含了钢铁领域的主要生产流程和关键技术信息，并已根据产能、产量和技术成本的实际历史数据进行校准。



图 5-1 道路交通部门分类

5.1 模型结构

如图 5-1 所示, RMC|Transport 主要覆盖道路交通部门(未来将拓展至航运、铁路等其他交通部门), 包括私人汽车交通、公路营运汽车交通、公共服务汽车交通、其他道路交通。模型涉及的能源品种包括汽油、柴油、电能、氢能、天然气和其它替代燃料。

5.2 私人载客汽车的规模与结构

模型采用系统动力学方法, 对私人载客汽车的“存量-流量”关系开展建模分析。令 $V_{f,c,a}(t)$ 表示在年份 t , 燃料类型为 f 、车身类型为 c 、车龄为 a 的私人载客汽车存量。通过对车龄聚合, 得到 $V_{f,c}(t) = \sum_{a=0}^A V_{f,c,a}(t)$ 。总存量 $N(t)$ 定义为所有“燃料-车身”复合类型的存量之和, 即 $N(t) = \sum_{f,c} V_{f,c}(t)$ 。记该年私人载客汽车的新注册量为 $n_{f,c}(t)$, 由于到期退役造成的自然淘汰量为 $r_{f,c,a}(t)$, 则存量-流量关系表示为:

$$\Delta V_{f,c}(t) = n_{f,c}(t) - \sum_{a=0}^A r_{f,c,a}(t) \quad (5-1)$$

其中淘汰量满足:

$$r_{f,c,a}(t) = \alpha_{f,c,a}(t) \cdot V_{f,c,a}(t) \quad (5-2)$$

式中 $\alpha_{f,c,a}(t) \in [0,1]$ 为特定车型的淘汰风险系数。

全国人均私人载客汽车保有量 $\bar{N}(t)$ 遵循由 GDP 增强的 Gompertz 曲线:

$$\bar{N}(t) = \gamma_{max} \cdot \exp(-K \cdot \exp(-B \cdot G(t))) + \theta \cdot \bar{N}(t-1) \quad (5-3)$$

其中, γ_{max} 是饱和水平, $G(t)$ 为人均 GDP, 正数 K 和 B 分别为曲线的形状和位置参数, 系数 $\theta \in [0,1]$ 则用于调整人均保有量的惯性效应和收入效应。在此基础上, 保有量的绝对水平 $N(t)$ 通过人口 POP_t 得到:

$$N(t) = \bar{N}(t) \cdot POP_t \quad (5-4)$$

为保证宏观和微观层面上的一致性, 私人载客汽车保有量的年度净变化 $\Delta N_t = N(t+1) - N(t)$ 、总新注册量 $n_t = \sum_{f,c} n_{f,c}(t)$ 、总淘汰量 $R_t = \sum_{f,c,a} r_{f,c,a}(t)$ 应

满足：

$$\Delta N_t = n_t - R_t \quad (5-5)$$

在车队⁴层面上，以一年为步长的递归关系如下式所示：

$$V_{f,c,a+1}(t+1) = (1 - \alpha_{f,c,a}(t)) \cdot V_{f,c,a}(t) \quad \forall a \geq 0 \quad (5-6)$$

$$V_{f,c,0}(t+1) = n_{f,c}(t) \quad (5-7)$$

车辆寿命假设服从 Weibull 分布以契合老车淘汰更快的经验规律，此时淘汰风险系数可以从 Weibull 分布参数中计算得出：

$$\alpha_{f,c,a} = 1 - \frac{S(a+1)}{S(a)} = 1 - \exp\left(-\left[\left(\frac{a+1}{h_{f,c}}\right)^{s_{f,c}} - \left(\frac{a}{h_{f,c}}\right)^{s_{f,c}}\right]\right) \quad (5-8)$$

此外，也可采用对数正态或 Gamma 分布进行简化。

对私人载客汽车规模及结构的预测结果如图 5-2 所示。目前，每百人私人载客汽车保有量与经济发展水平呈显著正相关趋势，浙江、江苏、北京等经济发达省份均超过 24 辆/百人，而江西、湖南、甘肃等地约为 15 辆/百人。未来一线城市的保有量水平增长较慢，于 2050 年后接近或达到饱和水平，其余地区维持较快增长。

⁴ fleet，指私人载客汽车的车辆存量集合，即全国范围内所有正在使用的私人汽车按燃料类型、车身类型和车龄分类的总体。

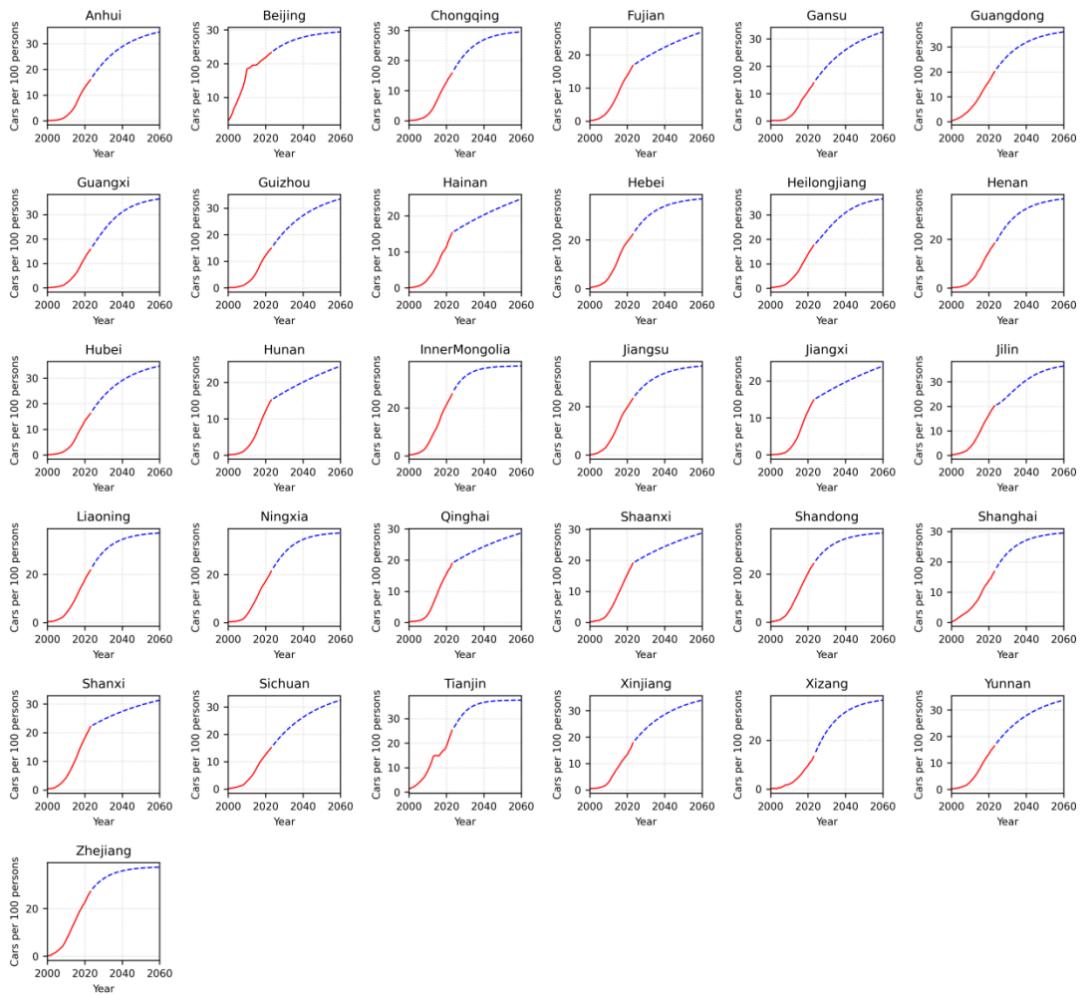


图 5-2 各省每百人私人载客汽车保有量（2000-2060）

5.3 私人载客汽车的消费者选择

私人载客汽车的选择受多种因素驱动，主要包括车辆购置价格、百公里耗能经济成本、续航里程和补能便捷性等。这些因素共同塑造消费者的决策行为，其相互关系如图 5-3 所示。

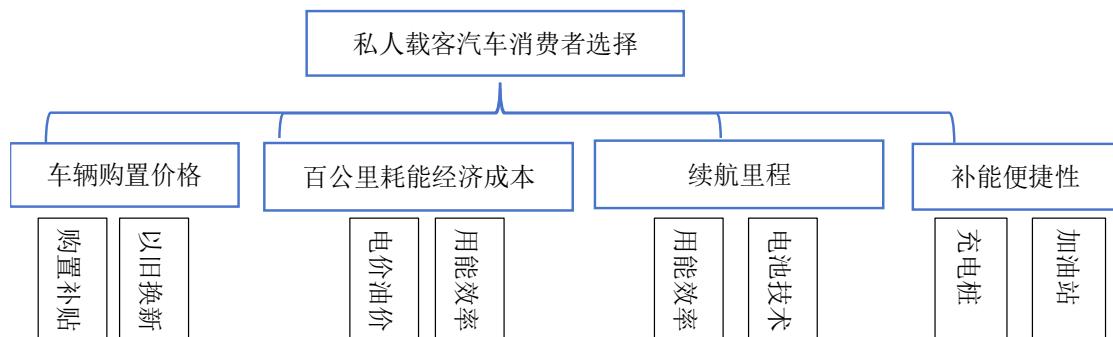


图 5-3 影响私人载客汽车选择的主要因素

5.3.1 车辆购置价格

车辆购置价格指消费者实际支付的全部成本，包括厂商指导价、政策激励和市场环境的影响。实际到手价等于厂商指导价、保险和拍照成本之和，减去经销商优惠、地方补贴和消费券。参数演变主要受地方政府补贴政策（如国补、地补）和限牌城市牌照成本驱动。基于历史数据（2017-2021 年补贴优惠政策实施情况）设定 BEV 和 PHEV 的分省折减系数，例如 2019 年地补为国补的 0.3 倍，2020 年为 0.1 倍，2021 年地补系数为 0 但存在隐形优惠。未来价格路径通过价格变动率参数 $\delta_{i,f}$ 描述（表 5-1、表 5-2），公式为：

$$P_f(t) = P_f(t_0) \cdot \prod_{i=t_0}^t (1 + \delta_{i,f}) \quad (5-9)$$

其中 $P_f(t)$ 是 t 期燃料类型 f 车辆的购置价格， $P_f(t_0)$ 是该车型基准年份购置价格。

表 5-1 分车型的购置价格阶段性变化趋势

类型	短期（2025 - 2030）	中期（2030 - 2045）	长期（2045 - 2060）
BEV	快速下降（电池成本驱动）	趋稳或缓慢下降（边际改进）	价格最亲民
PHEV	小幅下降（依赖双系统）	基本稳定	需求减少 → 价格回升或退市
GASL	保持稳定或略涨	加速上涨（环保成本上升）	大幅减少 → 价格结构扭曲
DIESEL	小幅上涨（限制政策）	大幅上涨（禁售/禁用）	基本退市

表 5-2 依据不同车型价格变动趋势设置的价格变动率

动力类型	2025 - 2030	2030 - 2045	2045 - 2060
BEV	- 5%/年	- 1.5%/年	0%/年 至 - 0.5%/年
PHEV	- 2%/年	0%/年	+1%/年
GASL	0%/年 至 +1%/年	+2%/年	+3%/年 至 +4%/年
DIESEL	+1%/年	+4%/年	+5%/年或以上

5.3.2 百公里耗能经济成本

百公里耗能经济成本衡量每行驶 100 km 所消耗能源的货币价值。对于纯电动车（BEV），该成本为百公里电耗与电价的乘积；燃油车（GASL/DIESEL）

为百公里油耗与油价的乘积；插电混动车（PHEV）需综合折算。公式如下：

$$C_{p,k}(t) = EC_{p,k}(t) \cdot \alpha_{p,k} \cdot P_{p,k}^{\text{fuel}}(t) \quad (5-10)$$

其中 $C_{p,k}(t)$ 是省份 p 、车型组合 k 在 t 期的成本， $EC_{p,k}(t)$ 是 NEDC 标称耗能， $\alpha_{p,k}$ 是省份特定修正系数， $P_{p,k}^{\text{fuel}}(t)$ 是燃料单价。BEV 的耗电效率基于 IEA 提供的物理极限设定 S 型技术扩散路径；燃油车油耗基本稳定；PHEV 油耗不变，效率改善依赖纯电续航提升。燃料单价演化基于绿色转型情景假设：电价因可再生能源先升后降，油价因碳税长期温和上涨。

5.3.3 续航里程

续航里程指车辆满能后的最大行驶距离，是新能源汽车用户的关键考量。假设燃油车续航不变；新能源汽车（NEV）续航由电芯能量密度 $ED_{f=NEV}(t)$ 、电池包质量 M_{pack} 、电池包集成效率 $\eta_{\text{pack}}(t)$ 和能耗 $EC_{p,f=NEV}(t) \cdot \alpha_{p,f=NEV}$ 决定：

$$Range_{p,f=NEV}(t) = \frac{ED_{p,f=NEV}(t) \cdot M_{\text{pack}} \cdot \eta_{\text{pack}}(t)}{EC_{p,f=NEV}(t) \cdot \alpha_{p,f=NEV}} \times 100\% \quad (5-11)$$

行业平均电芯能量密度 $ED_{avg}(t)$ 是各技术路线市场份额的加权平均：

$$ED_{avg}(t) = \sum_{\varphi} s_{\varphi}(t) \cdot ED_{\varphi}(t) \quad (5-12)$$

其中 $s_{\varphi}(t)$ 是技术 φ （如 NCX、LFP、Li-S/Li-Air）的市场份额，单位能量密度 $ED_{\varphi}(t)$ 遵循 S 型技术进步曲线。

5.3.4 补能便捷性

补能便捷性量化基础设施可及性，是新能源汽车推广的关键。各省份补能便捷性指数由基础设施密度与车辆保有量之比定义：

$$ERAI_{p,f}(t) = \frac{RI_{p,f}(t)/Area_p}{V_{p,f}(t)} \quad (5-13)$$

其中 $RI_{p,f}(t)$ 是补能设施数量（如充电桩、加油站）， $Area_p$ 是省份面积， $V_{p,f}(t)$ 是保有量。BEV 便捷性由公共充电桩密度与 BEV 保有量之比衡量；ICEV 由加油站密度与燃油车总量之比衡量；PHEV 则为私人充电桩密度与 PHEV 保有量之

和与加油站密度之比。车桩比演变路径受国家规划约束，公桩和私桩比例 $\Psi_p(t)$ 由系统一致性约束定义：

$$\frac{1}{R_{\text{public}}} = \frac{V_{p,f=\text{BEV}}(t) + V_{p,f=\text{PHEV}}(t)}{\text{Charge}_{\text{public}_p}(t)} \quad (5-14)$$

$$\frac{1}{R_{\text{private}}} = \frac{V_{p,f=\text{BEV}}(t) + V_{p,f=\text{PHEV}}(t)}{\text{Charge}_{\text{private}_p}(t)} \quad (5-15)$$

$$\frac{1}{R_{\text{total}}} = \frac{V_{p,f=\text{BEV}}(t) + V_{p,f=\text{PHEV}}(t)}{\text{Charge}_{\text{public}_p}(t) + \text{Charge}_{\text{private}_p}(t)} \quad (5-16)$$

$$\frac{1}{R_{\text{total}}} = \frac{1}{R_{\text{public}}} + \frac{1}{R_{\text{private}}} \quad (5-17)$$

$$\Psi_p(t) = \frac{R_{\text{public}_p}(t)}{R_{\text{private}_p}(t)} \quad (5-18)$$

5.4 公共汽电车的保有量预测

公共汽电车保有量预测采用需求驱动型容量规划模型，分三步实现。

第一步，基于人口、人均 GDP 和私人载客汽车保有量，通过多元线性拟合预测各省公共交通客运量。历史数据口径方面，2017 年及以前客运量统计包括公共汽电车和轨道交通；2018 年后分开统计，2020 年起纳入出租车和轮渡客运量。

第二步，构建“公交汽电车客运量占比”变量，利用历史数据与城镇化率的非线性关系，借助机器学习方法估计未来占比，进而计算公交汽电车客运量。假设未来占比随城镇化动态变化，并考虑地铁开通等因素（如青海、西藏等地假设 2030 年通地铁）。

第三步，根据各省“服务强度”（即车均客运量）推算保有量。服务强度通过拟合近五年公交汽电车客运量与运营数量关系，采用加权平均法得到各省每辆车年客运量，进而结合未来客运量预测保有量。

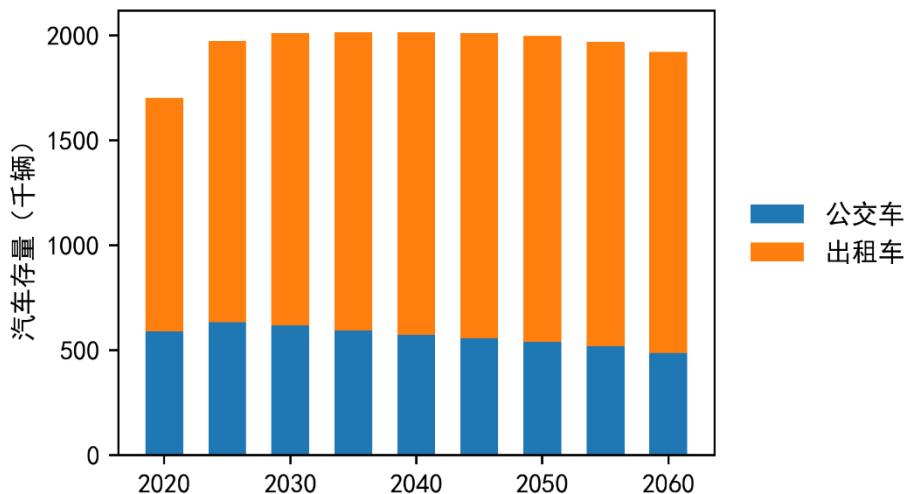


图 5-4 全国公交车和出租车存量预测 (2020-2060)

表 5-3 根据地铁开通情况进行的地区分组

分组	说明	地区
G1	地铁早开通 (<1997)	北京、上海
G2	地铁未开通 (截至 2023 年)	海南、青海、西藏、宁夏
G3	地铁 1997-2005 年开通	广东、天津、湖北、吉林、辽宁、江苏、重庆
G4	地铁 2009-2014 年开通	四川、河南、黑龙江、浙江、湖南、陕西、云南、
G5	地铁 2015 年开通	福建、江西、山东
G6	地铁 2016-2021 年开通	内蒙古、安徽、河北、广西、甘肃、贵州、新疆、山西

参考文献

- AGICO Cement Plant Equipment. (2025). *Lime Rotary Kiln*.
<https://cementplantequipment.com/products/lime-rotary-kiln/>
- Arasto, A. (2015). *Techno-economic evaluation of significant CO₂ emission reductions in the iron and steel industry with CCS*.
<https://publications.vtt.fi/pdf/science/2015/S111.pdf>
- Bai C., & Zhang Q. (2017). China's Growth Potential to 2050: A Supply-side Forecast Based on Cross-country Productivity Convergence and Its Featured Labor Force. *China Journal of Economics*, 4(4), 1–27.
<https://doi.org/10.16513/j.cnki.cje.2017.04.001>
- Baltac, S., Wilson, M., O'Sullivan, C., Leguijt, C., & Beeftink, M. (2022). *Low-Carbon Hydrogen from Natural Gas: Global Roadmap* (Nos. 2022–07). IEA Greenhouse Gas R&D Programme (IEAGHG).
<https://publications.ieaghg.org/technicalreports/2022-07%20Low-Carbon%20Hydrogen%20from%20Natural%20Gas%20Global%20Roadmap.pdf>
- Benavides, K., Gurgel, A., Morris, J., Mignone, B., Chapman, B., Kheshgi, H., Herzog, H., & Paltsev, S. (2024). Mitigating emissions in the global steel industry: Representing CCS and hydrogen technologies in integrated assessment modeling. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 131, 103963.
<https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2023.103963>
- Butterworth, P. (2024, November 28). *Challenges in achieving >90% carbon capture: Technical vs economic factors*.
<https://www.crugroup.com/cn/communities/thought-leadership/2024/Challenges-in-achieving-90percent-carbon-capture-Technical-vs-economic-factors/>
- CEIC. (2024). *CEIC Open Data*.
- CEIC Data. (2025). *中国36城工业用天然气平均价格（月度）*.
<https://www.ceicdata.com/zh-hans/china/price-monitoring-center-ndrc-36-city-monthly-avg-transaction-price-production-material/cn-usage-price-36-city-avg-natural-gas-natural-gas-for-industry>

Chen, Y., Guo, F., Wang, J., Cai, W., Wang, C., & Wang, K. (2020). Provincial and gridded population projection for China under shared socioeconomic pathways from 2010 to 2100. *Scientific Data*, 7(1), 83. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0421-y>

China Meteorological Administration. (2023). *China Wind and Solar Energy Resources Bulletin* (2022).
https://www.cma.gov.cn/zfxxgk/gknr/qxbg/202304/t20230421_5454513.html

China Meteorological Administration. (2025, February). *China Wind and Solar Energy Resources Bulletin*.
https://www.cma.gov.cn/zfxxgk/gknr/qxbg/202502/t20250211_6847016.html

China National Administration of Coal Geology (with 程爱国). (2016). *China Occurrence Regularity of Coal Resources and Resource Evaluation* (Di 1 ban). Science Press.

Chinese Academy of Environmental Planning. (2024). *Assessment of Wind and Solar Power Generation Potential in China 2024*.
https://www.caep.org.cn/sy/tdftzhyjzx/zxdt/202406/t20240614_1075803.shtml

Christensen, P., Gillingham, K., & Nordhaus, W. (2018). Uncertainty in forecasts of long-run economic growth. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(21), 5409–5414. <https://doi.org/10.1073/pnas.1713628115>

Christoph Heinemann, Dr. Roman Mendelevitch, Susanne Krieger, Kaya Dünzen, Dr. Katharina Göckeler, Dr. Markus Haller, Christian Winger, & Johannes Aschauer. (2024). *PTX Business Opportunity Analyser (BOA): Data Documentation. Documentation of data sources and data processing, version 2.1*. Oeko-Institut.
https://www.agora-industry.org/fileadmin/Projects/2022/2022-01_INT_PtX-Dialog/Oeko-Institut_2024_PTXBAA_Data_Documentation_v_2.1.pdf

Chumin. (2025). *Maerz Vertical Calcination Lime Kiln Double Chamber Shaft HPS Operation*. TONGLI HEAVY MACHINERY. <https://www.cementl.com/maerz-vertical-calcination-lime-kiln-double-chamber-shaft>

Dianchacha. (2024). *Power data platform*. <https://www.dianchacha.cn>

Ember. (2023). *Global Electricity Review 2023*. EMBER. <https://ember-energy.org/latest-insights/global-electricity-review-2023>

EMBER. (2024). *Global Electricity Review 2024*. Ember.

Energy Transitions Commission. (2023). *Making the Hydrogen Economy Possible: Accelerating Clean Hydrogen in an Electrified Economy—Technical Annex* (Version 1.0). Energy Transitions Commission. https://www.energy-transitions.org/wp-content/uploads/2023/04/2022-053-ETC-Hydrogen-Technical-Annex-Final_.pdf

European Commission. Joint Research Centre. (2022). *Greenhouse gas intensities of the EU steel industry and its trading partners*. Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2760/170198>

Gallagher, M. P., Depro, B. M., & Agency, U. S. E. P. (2002). *Economic Impact Analysis of the Final Coke Ovens NESHAP: Final Report* (No. EPA-452/R-02-008). U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards. https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-07/documents/coke-ovens_eia_neshap_final_08-2002.pdf

He, Y., Du, E., Liu, P., & Li, Z. (2025). Decarbonization pathways and layout evolution in China's steel sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 215, 115588. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115588>

Huppmann, D., Gidden, M., Fricko, O., Kolp, P., Orthofer, C., Pimmer, M., Kushin, N., Vinca, A., Mastrucci, A., Riahi, K., & Krey, V. (2019). The MESSAGEix Integrated Assessment Model and the ix modeling platform (ixmp): An open framework for integrated and cross-cutting analysis of energy, climate, the environment, and sustainable development. *Environmental Modelling & Software*, 112, 143–156. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.11.012>

IEA. (2013). *Iron and Steel CCS Study (Techno-Economics Integrated Steel Mill)*. IEA Greenhouse Gas R&D Programme. <https://ieaghg.org/publications/iron-and-steel-ccs-study-techno-economics-integrated-steel-mill/>

IEA. (2019). *The Future of Hydrogen*.

- https://iea.blob.core.windows.net/assets/9e3a3493-b9a6-4b7d-b499-7ca48e357561/The_Future_of_Hydrogen.pdf
- IEA. (2022). *World Energy Outlook 2022*.
- IEA. (2023a). *Energy Technology Perspectives 2023*.
<https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2023>
- IEA. (2023b). *World Energy Investment 2024*. IEA.
- IEA. (2024, October 22). *ETP Clean Energy Technology Guide – Data Tools*.
IEA. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/etp-clean-energy-technology-guide>
- IEA Greenhouse Gas R&D Programme. (2024). *Clean Steel: An Environmental and Technoeconomic Outlook of a Disruptive Technology* (Nos. 2024–02). IEA GBHG R&D Programme. <https://publications.ieaghg.org/technicalreports/2024-02%20Clean%20Steel%20An%20environmental%20and%20technoeconomic%20outlook%20of%20a%20disruptive%20technology.pdf>
- IEA-ETSAP. (2010). *Iron and Steel: Highlights*. IEA-ETSAP (Energy Technology Systems Analysis Programme). <https://iea-etsap.org/E-TechDS/HIGHLIGHTS%20PDF/I02-Iron%26Steel-GS-AD-gct%201.pdf>
- IIASA ECE Programme. (2020). *Documentation of the MESSAGEix framework*.
- International Energy Agency. (2020). *Global Average Levelised Cost of Hydrogen Production by Energy Source and Technology, 2019 and 2050*.
<https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-average-levelised-cost-of-hydrogen-production-by-energy-source-and-technology-2019-and-2050>
- Jing, C., Su, B., Zhai, J., Wang, Y., Lin, Q., Gao, M., Jiang, S., Chen, Z., & Jiang, T. (2022). Gridded value-added of primary, secondary and tertiary industries in China under Shandong Socioeconomic Pathways. *Scientific Data*, 9(1), 309.
<https://doi.org/10.1038/s41597-022-01440-0>
- Leimbach, M., Kriegler, E., Roming, N., & Schwanitz, J. (2017). Future growth patterns of world regions – A GDP scenario approach. *Global Environmental Change*, 42, 215–225. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.02.005>

Li, J. (2019). *Fourth Assessment for Oil and Gas Resource*. Petroleum Industry Press.

Lu, X., Chen, S., Nielsen, C. P., Zhang, C., Li, J., Xu, H., Wu, Y., Wang, S., Song, F., Wei, C., He, K., McElroy, M. B., & Hao, J. (2021). Combined solar power and storage as cost-competitive and grid-compatible supply for China's future carbon-neutral electricity system. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(42), e2103471118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2103471118>

McElroy, M. B., Lu, X., Nielsen, C. P., & Wang, Y. (2009). Potential for Wind-Generated Electricity in China. *Science*, 325(5946), 1378–1380. <https://doi.org/10.1126/science.1175706>

McGlade, C., & Ekins, P. (2015). The geographical distribution of fossil fuels unused when limiting global warming to 2 °C. *Nature*, 517(7533), 187–190. <https://doi.org/10.1038/nature14016>

Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. (2021). *National Petroleum and Natural Gas Resources Exploration and Mining Reports 2020*. http://gi.m.mnr.gov.cn/202109/t20210918_2681270.html

Nancy Margolis & Ross Brindle. (2000). *Energy and Environmental Profile of the U.S. Iron and Steel Industry*. Energetics, Incorporated. https://www.energy.gov/sites/prod/files/2013/11/f4/steel_profile.pdf

National Bureau of Statistics of China. (2022). *China Statistical Yearbook 2022*. <https://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/2022/indexch.htm>

National Bureau of Statistics of China. (2023). *China Statistical Yearbook 2023*. <https://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/2023/indexch.htm>

National Bureau of Statistics of China. (2024). *China Statistical Yearbook 2024*. <https://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/2024/indexch.htm>

OECD. (2025). *Hydrogen in steel: Addressing emissions and dealing with overcapacity* (174th ed., OECD Science, Technology and Industry Policy Papers) [OECD Science, Technology and Industry Policy Papers]. <https://doi.org/10.1787/7e2edc69-en>

O'Neill, B. C., Kriegler, E., Ebi, K. L., Kemp-Benedict, E., Riahi, K., Rothman, D. S., Van Ruijen, B. J., Van Vuuren, D. P., Birkmann, J., Kok, K., Levy, M., & Solecki, W. (2017). The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. *Global Environmental Change*, 42, 169–180. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.01.004>

O'Neill, B. C., Kriegler, E., Riahi, K., Ebi, K. L., Hallegatte, S., Carter, T. R., Mathur, R., & Vuuren, D. P. (2014). A new scenario framework for climate change research: The concept of shared socioeconomic pathways. *Climatic Change*, 122(3), 387–400. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0905-2>

Pan J., Su B., Wang Y., Jing C., Huo J., & Jiang T. (2020). Spatio-temporal changes of output value from the primary, secondary and tertiary industries for 2020–2050 under the Shared Socioeconomic Pathways. *Climate Change Research*, 16(6), 725–737.

Rahbari, A., Zheng, M., Corsi, C., Gunawan Gan, P., Wang, Y., & Pye, J. (2025). Solar-thermal sintering of iron ore. *Solar Energy*, 286, 113123. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.113123>

Rechberger, K., Spanlang, A., Sasiain Conde, A., Wolfmeir, H., & Harris, C. (2020). Green Hydrogen-Based Direct Reduction for Low-Carbon Steelmaking. *Steel Research International*, 91(11), 2000110. <https://doi.org/10.1002/srin.202000110>

Reliable Plant. (2008, May 5). *Sunoco to build coke facility in Granite City, Illinois*. <https://www.reliableplant.com/Read/11674/sunoco-to-build-coke-facility-in-granite-city%2C-illinois>

Renmin University of China. (2025, October). *CPOST documentation*. <http://ae.ruc.edu.cn/docs/2025-02/55f9843587594f7ba4975a1124c964f9.pdf>

Santos, S., Hooey, L., Johns, J., & Tobiesens, A. (2013). *Understanding the Cost of Deploying CO₂ Capture in an Integrated Steel Mill*. IEA Greenhouse Gas R&D Programme.

https://publications.ieaghg.org/docs/General_Docs/IEAGHG_Presentations/S._Santos_ESTEP_Mtg_IS_ppt_final.pdf

- Shenlan Environmental Protection Industry Development Co., Ltd. (2025, April). *Cement industry, why become global carbon emissions “hot potato”?* https://mp.weixin.qq.com/s/Tq6LJxZq_ATvOirTzWteeA
- steelonthenet. (n.d.). *Steel Industry Scope 1 CO₂ Emissions by Process Step.* <https://www.steelonthenet.com/kb/scope-1-emissions.html>
- Steelonthenet. (2025). *Steel Industry Scope 1 CO₂ Emissions by Process Step.* <https://www.steelonthenet.com/kb/scope-1-emissions.html>
- Steelonthenet.com. (2023). *Examples of capital investment costs for iron and steelmaking.* https://www.steelonthenet.com/pdf/commerce/capex_examples.pdf
- Steelonthenet.com. (2025). *Iron & steel industry capital investment cost database* (Version 2025 edition) [Dataset]. <https://www.steelonthenet.com/capital-investment/eaf.html>
- Trading Economics. (2025, August 28). *Iron Ore—价格数据与图表.* <https://zh.tradingeconomics.com/commodity/iron-ore>
- UN DESA/Population Division. (2024). *World Population Prospects 2024: Summary of Results.*
- Vogl, V., Åhman, M., & Nilsson, L. J. (2018). Assessment of hydrogen direct reduction for fossil-free steelmaking. *Journal of Cleaner Production*, 203, 736–745. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.279>
- Wang, Y., Chao, Q., Zhao, L., & Chang, R. (2022). Assessment of wind and photovoltaic power potential in China. *Carbon Neutrality*, 1(1), 15. <https://doi.org/10.1007/s43979-022-00020-w>
- Wang, Y., Wen, Z., Xu, M., & Doh Dinga, C. (2025). Long-term transformation in China’s steel sector for carbon capture and storage technology deployment. *Nature Communications*, 16(1), 4251. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-59205-3>
- Welsby, D., Price, J., Pye, S., & Ekins, P. (2021). Unextractable fossil fuels in a 1.5 °C world. *Nature*, 597(7875), 230–234. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03821-8>
- Yang Y., Huo J., Su B., Jing C., & Jiang T. (2024). National and provincial

economy projection databases under Shared Socioeconomic Pathways (SSP1–5)_v2.
Climate Change Research, 20(4), 498–503.

Zhang, Q.-Z., Wang, L.-N., Chen, W.-Y., Zhang, C.-L., Xiang, K.-L., & Chen, J.-Y. (2024). Analysis of hydrogen supply and demand in China's energy transition towards carbon neutrality. *Advances in Climate Change Research*, 15(5), 924–935.
<https://doi.org/10.1016/j.accre.2024.07.013>

《中国冶金报》-中国钢铁新闻网. (2025, August 27). 国内废钢市场偏弱运行
(8月16日—8月22日).
http://www.csteelnews.com/sjzx/gsfx/202508/t20250827_103195.html

中国钢铁新闻网. (2023, April 6). 烧结粉矿日耗增加 国产球团矿占比升高——2023年2月下旬我国钢企铁矿石日耗结构分析.
http://www.csteelnews.com/xwzx/gdpl/202304/t20230406_73453.html

国务院国有资产监督管理委员会. (2020). 国务院国资委关于印发《中央企业混合所有制改革操作指引》的通知.
<http://www.sasac.gov.cn/n16582853/n16582883/c17715327/content.html>

国家统计局. (2025, January 24). 2025年1月中旬流通领域重要生产资料市场价格变动情况. 国家统计局.
https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202501/t20250123_1958423.html

新浪财经. (2023, June 27). 工信部：加快推进钢铁行业超低排放改造.
<https://finance.sina.cn/2023-06-27/detail-imyytqep3463654.d.html?from=wap>

矿权资源网. (2025, August 19). 2025年8月19日石灰石价格行情.
<https://www.kq81.com/AspCode/KyxtShow.asp?ArticleId=534897>

赵泽东, 李嘉璇, & 李原野. (2025). 现代长流程钢铁企业低碳生产模式实践. *冶金动力*, 4, 83–87. <https://doi.org/10.13589/j.cnki.yjdl.2025.04.002>

邵乐, 张益, 唐燕飞, 杨鹏, 王宇欢, & 王辉. (2024). 煤制氢、天然气制氢及绿电制氢经济性分析. *炼油与化工*, 35(2), 10–14.
<https://doi.org/10.16049/j.cnki.lyyhg.2024.02.013>