



中国钢铁行业净零碳排放路线图



作者: Ali Hasanbeigi¹, Hongyou Lu², Nan Zhou²

¹ Global Efficiency Intelligence

² 劳伦斯伯克利国家实验室

2023年3月

致谢

作者感谢北京大学杨富强博士、陈炯博士和朱泓博士，冶金工业经济发展研究中心陈瑜博士，中国金属学会张春霞博士，冶金工业规划研究院李冰博士，东北大学张琦博士，中国钢铁研究总院酆秀萍博士，欧洲气候基金会杨婵，劳伦斯伯克利国家实验室 Lynn Price，哥伦比亚大学 Chris Bataille，以及 Global Efficiency Intelligence 的 Navdeep Bhadbhade，他们为本研究提出了宝贵意见，和/或对本文件早期版本作出了有见地评论。

免责声明

劳伦斯伯克利国家实验室（以下简称“LBNL”）和Global Efficiency Intelligence, LLC（以下简称“GEI”）在本出版物中提供的信息仅供参考。GEI和LBNL非常谨慎地维持本出版物项下收集和提供之信息的准确性，但是，任何一方均未就此类信息做出任何明示或暗示的保证，也无需就任何人使用该等材料可能产生的后果承担任何责任。本出版物所载的任何估算都反映了我们基于可用数据和信息作出的当前分析和预测。如果通过商号、商标、制造商或者以其他方式提及特定商业产品、工艺或服务，并未表明或暗示GEI/LBNL对其予以背书、推荐或支持。

根据与美国能源部签订的合同（合同编号：DE-AC02-05CH11231），劳伦斯伯克利国家实验室作为合著者之一撰写本研究报告。美国政府保留出版或复制本研究报告（或者允许他人作为美国政府进行出版和复制）的非独占、付费、不可撤销的全球性许可，如果出版商出版本研究报告，即表明其承认美国政府保留该等许可。

参考文献：Hasanbeigi, A.、Lu, H.和 Zhou, N., 2023 年。《中国钢铁行业净零碳排放路线图》，劳伦斯伯克利国家实验室和 Global Efficiency Intelligence。LBNL-2001506

<https://eta.lbl.gov>

<https://www.globalefficiencyintel.com>

执行摘要

钢铁制造业属于全球范围内能源密集程度最高的行业之一，其排放量约占全球温室气体（GHG）排放量的 7%，全球二氧化碳（CO₂）排放量的 11%。2021 年，中国钢铁产量占全球钢铁产量的 53%。2021 年，中国钢铁行业粗钢产量为 10.33 亿吨，其中 89.4% 的产量由使用高炉-转炉（BF-BOF）工艺的一次炼钢厂生产，10.6% 的产量采用电弧炉（EAF）生产工艺生产。

中国承诺在 2030 年之前实现二氧化碳排放量达峰，并在 2060 年之前实现碳中和。中国钢铁行业的二氧化碳排放量预计将在 2030 年之前达到峰值。钢铁行业的二氧化碳排放量达峰主要是由中国国内钢铁需求达峰所推动的。中国的钢铁生产是世界上碳强度最高的生产国之一，原因在于大部分钢铁都是通过能源和碳密集型的高炉-转炉（BF-BOF）炼钢工艺生产的。

本研究的目标旨在制定中国钢铁行业深度脱碳的路线图。我们分析了中国钢铁行业的现状，并制定了 2050 年的情景设想，从而评估能够大幅减少中国钢铁行业二氧化碳排放量的各种脱碳路径。

我们在分析中谈到了五大脱碳支柱，即：1）需求减少，2）能源效率，3）燃料转换、电气化和电网脱碳，4）技术转向低碳炼钢，5）碳捕获、利用与封存（CCUS）。

我们对 2050 年设想的分析表明，在“一切照旧如常”（BAU）的情景下，由于钢铁需求减少、能源效率适度提升、技术转移更替（主要转向电炉钢生产路线）以及电网脱碳，在 2020 年至 2050 年期间，年二氧化碳排放量将减少 54%。在“一切照旧如常”（BAU）的情景下，中国钢铁产量同期下降 23%（图 ES1）。

“净零排放”情景实现在钢铁行业的年二氧化碳排放量减少幅度最大，因为其包括减少需求、采取能源效率措施、进行燃料转换、向低碳钢铁生产的技术转移，以及碳捕获、利用与封存（CCUS）等更具雄心的贡献。在“净零碳排放”情景下，到 2050 年，中国钢铁行业的二氧化碳排放总量将下降至每年约排放 7800 万吨二氧化碳，与 2020 年相比，排放水平下降 96%。

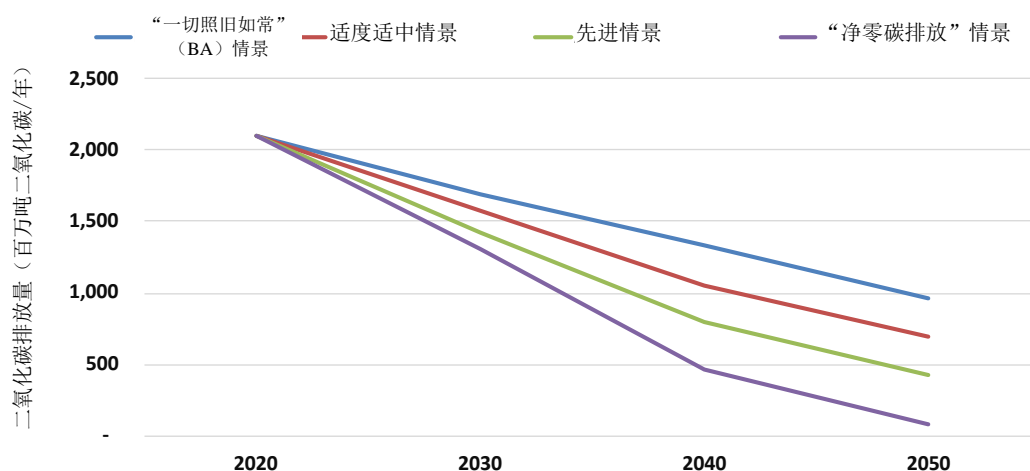


图 ES1：2020-2050 年各种不同减碳情景下中国钢铁行业的二氧化碳年排放总量（资料来源：本研究）

在 2050 年中国钢铁行业“净零碳排放”情景下，各项减碳路径对二氧化碳减排的贡献情况如图 ES2 所示。在这种情景下，技术转移更替（主要是转向基于废钢的电弧炉钢铁生产）对二氧化碳减排所作出的贡献最大，其次是需求减少和燃料转换、工艺热电气化和电网脱碳。

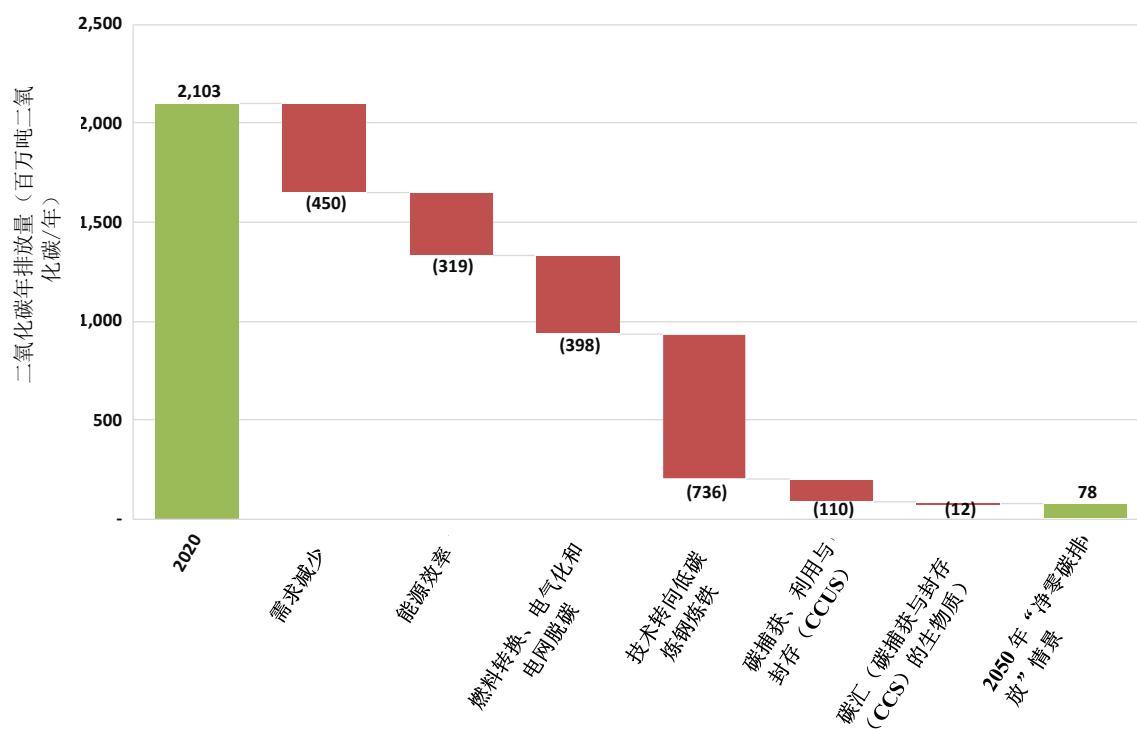


图 ES2：“净零碳排放”情景下各种二氧化碳减排方案对中国钢铁行业的影响（资料来源：本研究）

“接近净零碳排放”情景在技术上是可以通过大多数已经商业化的技术来实现的，如废钢铁电弧炉（scrap-EAF）和直接还原铁-电弧炉（DRI-EAF）技术，以及接近商业化的技术，如氢基直接还原铁炼钢技术。

要实现“净零排放”情景所示的成果，需要史无前例地采用低碳技术，其中包括积极提升能源效率，大规模采用商业化脱碳和低碳炼铁技术，转向二次炼钢，以及大幅增加中国钢铁行业低碳燃料的使用。

在短期内，本文建议中国政府不鼓励在中国新安装任何高炉设备。即使在短期内（到 2030 年），中国国内可用的废钢也将大幅增加，这可能会取代建设新高炉的需求。相反，建造新的电弧炉炼钢厂将成为需要。中国政府还应尽可能地劝阻重新砌筑高炉

（修整高炉炉壁耐火材料），并鼓励建设氢基直接还原铁（H₂-DRI）或者氢就绪直接还原铁工厂。重新砌筑高炉实质上是一项资本密集型投资，将使高炉的使用年限再延长 15 年以上，同时将其碳排放量保持在几乎相同的水平。重新砌筑高炉将导致资产搁浅，这与中国的碳达峰和碳中和目标不符。重新砌筑高炉的资本成本可能比建造一座新的“直接还原铁”工厂的资本成本还要高。此外，随着中国和世界其他国家地区在未来几年建设一些氢基直接还原铁（H₂-DRI）工厂，并在这种低碳炼铁技术上获得经验和信心，再加之未来几年中国兴建大型项目，执行激励措施，绿氢能源的价格随之下跌，转向使用氢直接还原铁（H₂-DRI）在未来几年可能会比重新砌衬高炉更具吸引力，这肯定会是一项更有利于改善气候的投资。

政府应继续通过标杆管理、翻新改型和激励措施来推动提升能源效率；同时还要改进钢铁产品的回收系统，以提高废料质量及其可用性。中国政府应该走在企业的前面，在钢铁产品碳排放标准和冶金行业氢应用方面提供标准和政策指导。钢铁企业在继续追求脱碳的同时，还需要考虑对其钢铁产品实施生命周期排放标准，并贴上排放标签。

在中期阶段，政府应规划并指导行业调整，特别是在逐步淘汰高炉，搬迁有潜力的钢厂以匹配当地可再生资源方面。中国政府还可以利用市场力量，制定钢铁“政府绿色采购”（GPP）计划，以激励进行低碳钢铁生产。从中期阶段来看，钢铁企业在采用低碳技术方面将面临更大的压力和竞争。本文建议钢铁企业加入行业组织集团，或建立政府与社会资本合作模式，以在技术（氢基直接还原铁，碳捕获、利用与封存，智能制造等）和政策方面跟进了解最新发展。我们还建议钢铁企业开发试点和示范项目，以使用、测试并进一步改进低碳炼钢炼铁技术。

本文建议中国政府为技术创新提供资金、监管和政策支持，涉及领域包括投资高风险和高回报的突破性技术，制定“技术推向市场”计划，鼓励技术试点、测试和验证等。

目录

执行摘要	ii
1. 介绍	1
2. 中国钢铁行业的生产和贸易状况	2
3. 全球钢铁行业的二氧化碳排放量	5
4. 中国钢铁行业能源消耗与碳排放概况	6
4.1. 中国钢铁行业能源消耗	6
4.2. 有关中国钢铁行业能源强度和二氧化碳排放强度的基准分析	6
5. 中国钢铁行业净零碳排放路线图	12
5.1. 脱碳情景	12
5.2. 中国钢铁行业的脱碳路径	12
6. 各个脱碳支柱对中国钢铁行业的影响	15
6.1. 需求减少	15
6.2. 能源效率	19
6.3. 燃料转换、电气化和电网脱碳	21
6.4. 转向低碳炼钢技术	23
6.5. 碳捕获、利用和封存	41
7. 行动计划和建议	47
参考资料	54
附录	63

1.介绍

钢铁制造业是全球范围内能源密集程度最高的行业之一。世界各地的钢铁生产主要使用煤炭作为燃料，这意味着在各个行业中，钢铁行业成为二氧化碳（CO₂）排放量最高的行业之一。钢铁行业约占全球制造业温室气体（GHG）排放量的四分之一（国际能源署，2019年）。

据估计，世界钢铁需求将从 2021 年的 19.51 亿吨增长到 2050 年的 25 亿吨（国际能源署，2020 年 a）。2021 年，中国钢铁产量占全球钢铁产量的 53%；印度预计将在产量增长方面取得领先地位。到 2050 年，非洲和中东预计将成为钢铁产量增长率最高的另外两个地区（国际能源署，2019 年）。在钢铁行业脱碳方面未能取得实质进展的情况下，预计随着钢铁消费量和产量的增长，该行业的能源绝对消耗量和二氧化碳排放量将大幅增加。

中国承诺在 2030 年之前实现二氧化碳排放量达峰，并在 2060 年之前实现碳中和。中国钢铁行业的二氧化碳排放量预计将在 2030 年之前达到峰值（中国工信部，2022 年）。中国政府的目标是在 2020 年到 2025 年的期间内，将综合能源强度降低 2%，并在钢铁行业实施能源效率“领跑者”计划（中国政府网站，2022 年）。预计到 2025 年，钢铁行业中电弧炉（EAF）炼钢厂的占比将从目前的 10.6% 增加到 15%，到 2030 年，该比例将增加到 20%。

此外，政府将严格限制任何新增钢铁产能。政府鼓励二次炼钢的“有序”发展，并通过优惠的产能置换政策，通过以废钢铁为主要原料的电弧炉炼钢来替代老式初次炼钢。政府还支持氢能炼钢技术的发展（中国工信部，2022 年）。

中国于 2021 年 7 月启动了全国碳排放交易体系。目前，该体系仅涵盖电力行业（Tan，2022 年），但钢铁行业有望很快加入该体系，政府支持开发全生命周期的碳排放数据管理系统（中国政府网站，2022 年）。

图1显示了使用高炉-转炉（BF-BOF）、直接还原铁-电弧炉（DRI-EAF）、以废钢铁为主要原料的电弧炉生产路线的钢铁生产简化流程图。在生产钢材的过程中，可通过以下任意一个工艺路线对铁矿石进行化学还原：高炉-转炉（BF-BOF）、熔融还原法或直接还原法。此外，还可以通过在电弧炉中直接熔化废钢来生产钢铁。当今最常见的钢铁生产路线包括使用高炉-转炉（BF-BOF）和电弧炉。2021年，采用高炉-转炉生产路线生产的钢铁约占全球粗钢产量的71%，采用电弧炉生产路线生产的钢铁约占29%（国际钢铁协会，2022年）。在中国，接近90%的钢铁是通过高炉-转炉初次炼钢路线生产的。

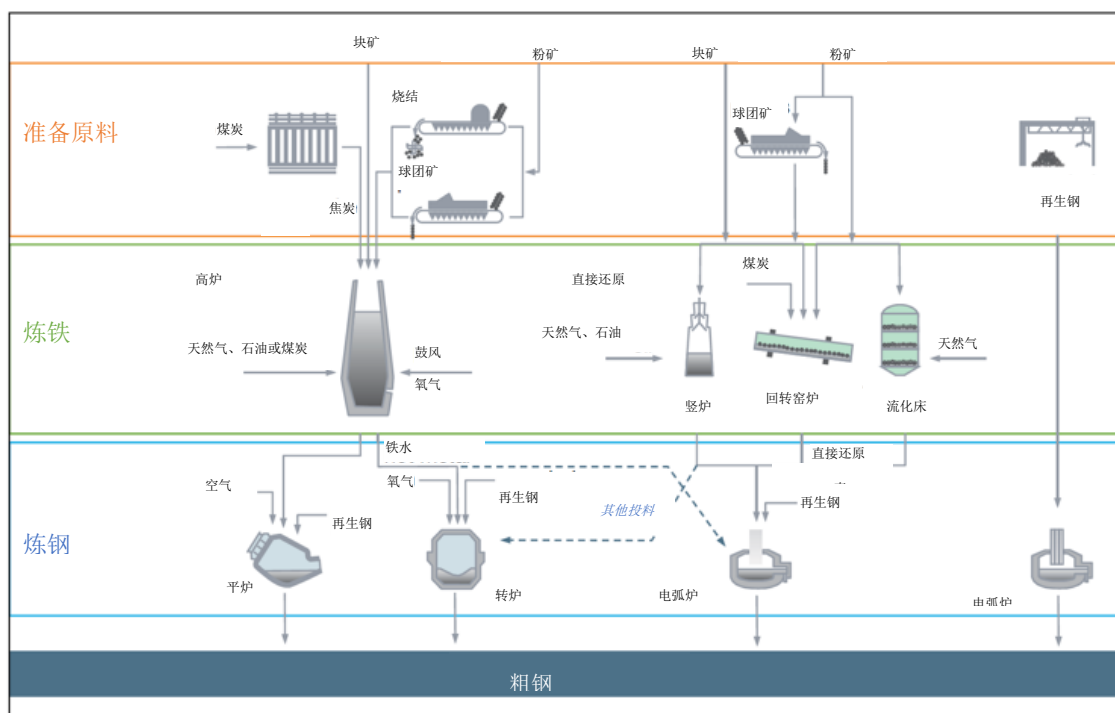


图 1：炼钢生产路线（国际钢铁协会，2020 年）

目前已出现一些新兴技术，能够降低钢铁行业的能源消耗和碳排放，例如国际能源署（2020年a）和Hasanbeigi等人（2013年）提及的技术。举例来说，正在试行的一项关键深度脱碳技术就是氢基直接还原铁电弧炉（H₂-DRI EAF）炼钢，在该技术中使用可再生电力并以电解方式生产氢气（H₂），然后使用氢气生产钢铁（SAAB，2021年），钢铁公司和政策制定者正在认真考虑该技术。本报告稍后将更详细地讨论这项技术以及其他新兴技术。

本报告还介绍了中国钢铁行业的生产、能源消耗和碳排放现状；并为中国钢铁行业制定了净零碳排放路线图，该路线图以数据为驱动，旨在本世纪中叶实现二氧化碳净零排放。此外，本报告还涵盖钢铁行业在各种情景下并分别于 2030 年、2040 年和 2050 年可能实现的里程碑。最后，本报告为中国政府、钢铁行业和其他主要利益相关者提供了简要的政策建议和行动计划。

2.中国钢铁行业的生产和贸易状况

2000 年至 2021 年间，世界钢铁产量翻了一番以上（参见图 2）。中国的钢铁产量取得大幅增长，2000 年，中国只占全球钢铁产量的 15%，而到 2021 年，中国在全球钢铁产量占比高达 53%（国际钢铁协会，2022 年）。根据下图显示，2008 年世界钢铁产量出现下降，原因是该年发生全球经济衰退；2014 年世界钢铁产量再次出现下降，主要原因是中国经济放缓和产能长期过剩，导致中国关闭非法感应炉和老旧钢铁厂。2020 年，由于全球爆发新冠疫情，世界粗钢产量下降约 1%。

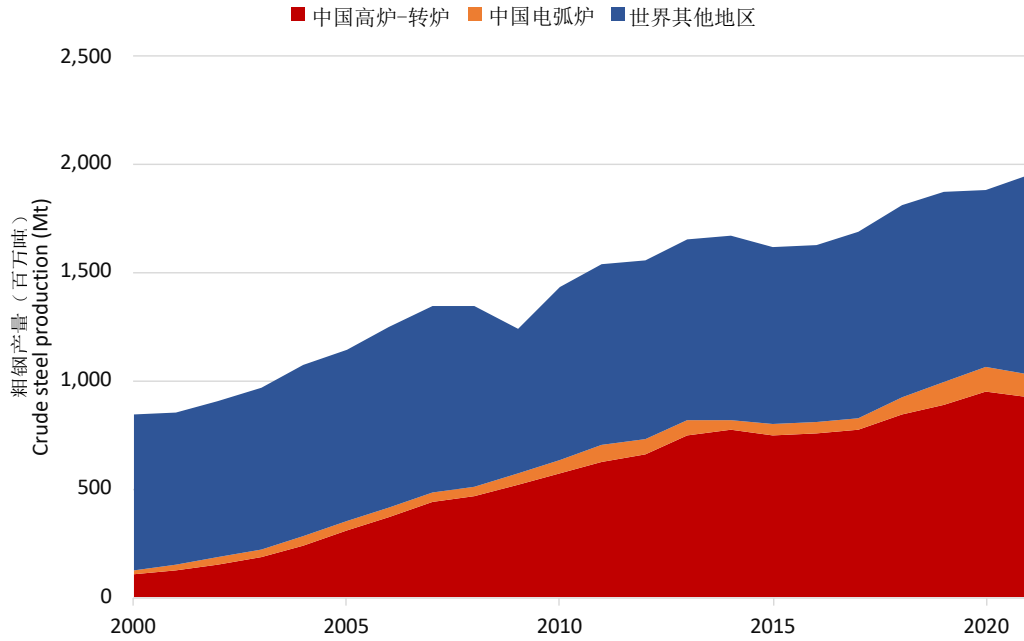


图 2: 2000-2021 年中国和世界其他地区的粗钢产量 (国际钢铁协会, 2021 年和 2022 年)

图 3 显示了世界前十大钢铁生产国。2021 年, 前十大生产国钢铁产量占世界钢铁产量的 83%, 迄今为止, 中国是最大的钢铁生产国 (国际钢铁协会, 2022 年)。

前 20 大钢铁出口国占世界钢铁出口总量的 90% 以上。根据国际钢铁协会 (2022 年) 的数据, 2021 年, 中国、日本、俄罗斯、印度和乌克兰是前五大净出口国 (即出口量减进口量的净额), 欧盟 27 国、美国、泰国、墨西哥和波兰是前五大净进口国 (即进口量减出口量的净额)。

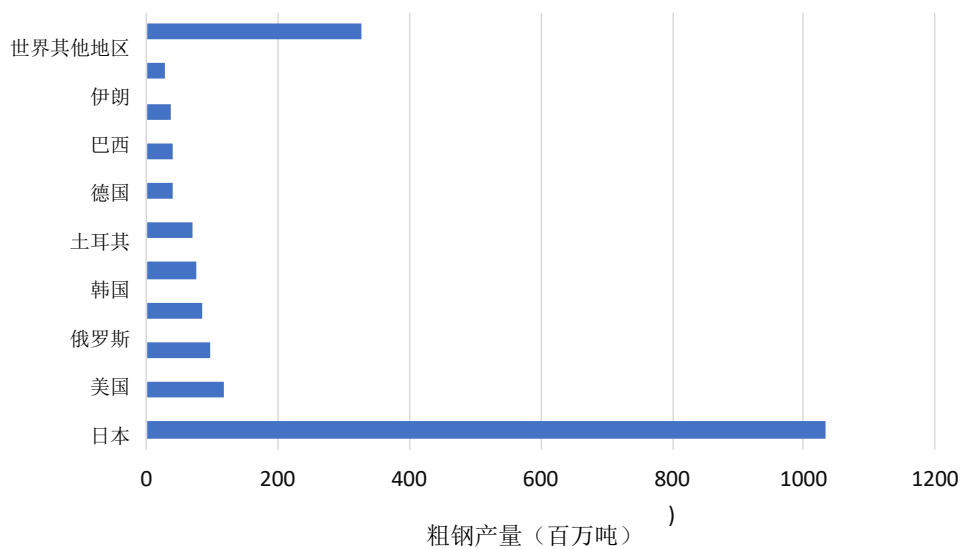


图 3: 2021 年, 前十大钢铁生产国 (国际钢铁协会, 2022 年)

2021年，中国钢铁行业粗钢产量为10.33亿吨，其中89.4%的钢铁由使用高炉-转炉（BF-BOF）工艺的初次炼钢厂生产，10.6%的钢铁由使用电弧炉（EAF）生产工艺的二次炼钢厂生产。2021年，中国进口2,780万吨钢铁产品，出口6,620万吨钢铁产品。这些数据表明，中国生产的钢材总量中，只有6%用于出口，其余94%的钢材用于满足国内需求。中国最大的五家钢铁公司分别是中国宝武集团、鞍钢集团、沙钢集团、河钢集团和建龙集团（国际钢铁协会，2022年）。

河北省钢铁产量占粗钢总产量的23%，其次分别是江苏省（11%）；山东省（8%）；辽宁省（7%）和山西省（6%）（参见图4）（中国钢铁工业年鉴编委会，2021年）。建筑行业 and 基础设施建设行业是中国最大的钢铁消费行业（59%），其次分别是机械行业（16%）、汽车行业（6%）、能源行业（4%）和其他钢铁产品（前瞻产业研究院，2020年；L. Guo和He，2021年）。

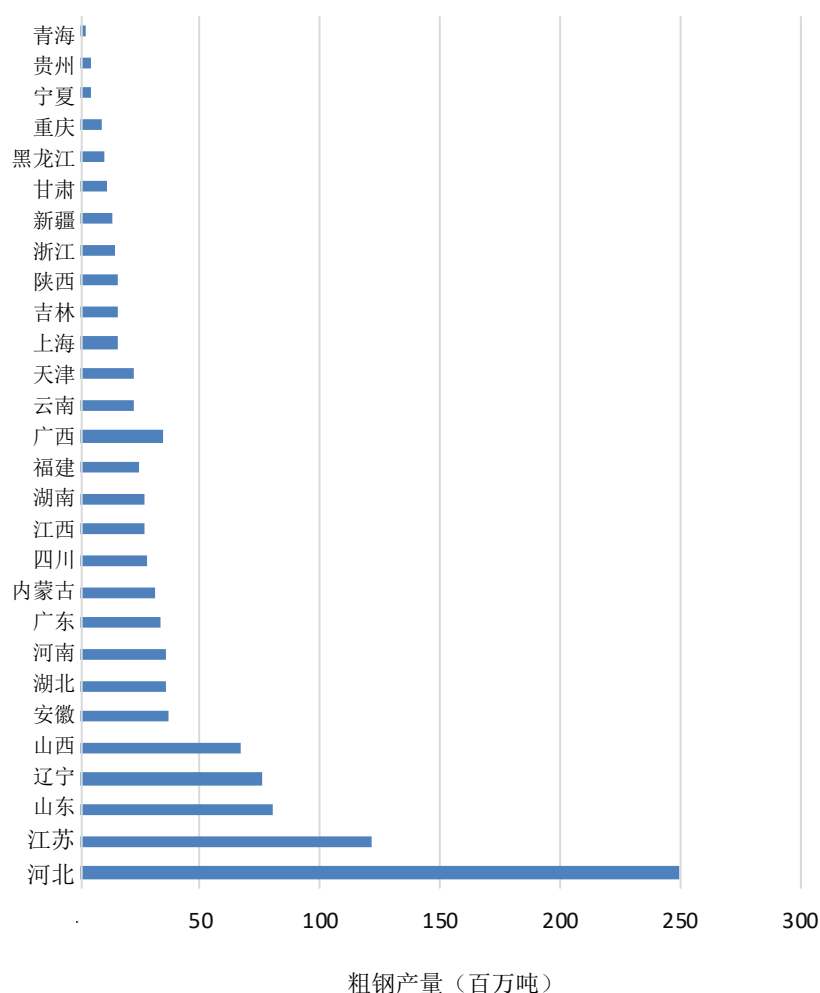


图4：2020年中国各省份粗钢产量（NBS，2021年）

3.全球钢铁行业的二氧化碳排放量

2019 年，全球钢铁行业排放的二氧化碳约为 36 亿吨（参见图 5）。2019 年，全球高炉-转炉钢炼钢排放的二氧化碳约为 31 亿吨，电弧炉炼钢排放的二氧化碳约为 5 亿吨。

中国和印度大量使用生铁或者煤基直接还原铁（而非废钢铁）作为原料，因此，两国电弧炉炼钢的二氧化碳强度更高，这也推高了全球电弧炉炼钢的二氧化碳排放量（Hasanbeigi, 2022 年）。

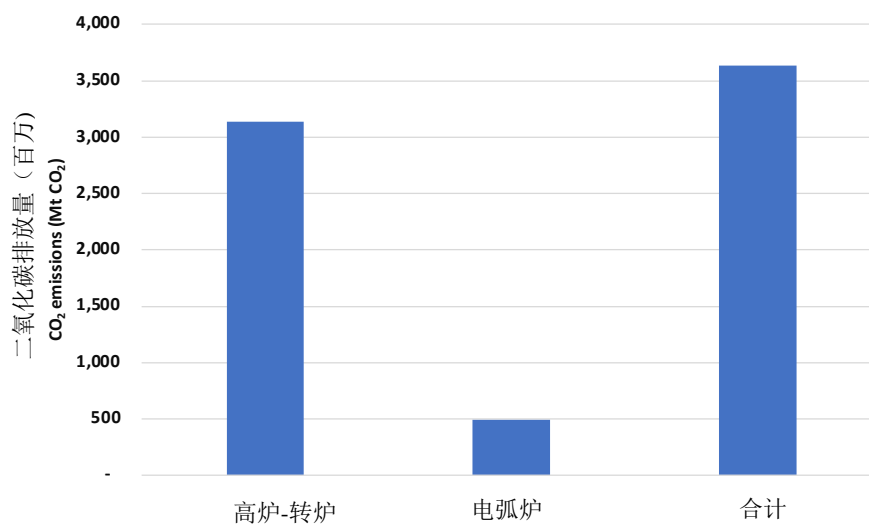


图 5：2019 年全球钢铁行业二氧化碳排放量（按工艺类型）（Hasanbeigi, 2022 年）

根据我们估计的每个国家/地区的高炉-转炉炼钢和电弧炉炼钢的二氧化碳强度以及钢铁产量，我们在此前的研究（Hasanbeigi, 2022 年）中估算了钢铁行业二氧化碳排放总量。图 6 显示了该项分析的结果，其中中国占 2019 年全球钢铁行业二氧化碳排放总量的 54%。

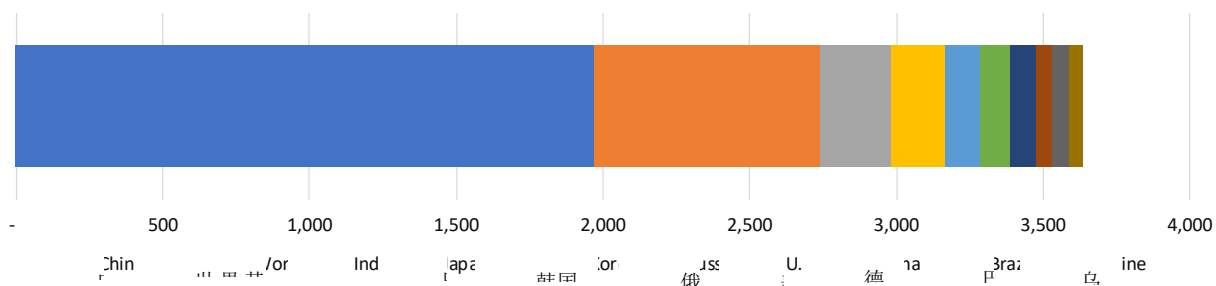


图 6：2019 年主要钢铁生产国因生产钢铁排放的二氧化碳总量（百万吨）（Hasanbeigi, 2022 年）

根据上图所示钢铁行业排放总量以及联合国环境规划署（2020 年）报告的 2019 年全球温室气体排放量（共计 520 亿吨二氧化碳当量，其中包括非二氧化碳温室气体排放量），全球钢铁行业温室气体排放量约占全球排放总量的 7%。根据上图所示钢铁行

业排放总量以及国际能源署（2020 年 b）报告的 2019 年全球二氧化碳排放量（共计 330 亿吨），全球钢铁行业二氧化碳排放量约占全球排放总量的 11%。

4.中国钢铁行业能源消耗与碳排放概况

4.1.中国钢铁行业能源消耗

中国钢铁行业约占中国制造业所消耗燃料总量的34%左右（国家统计局，2022年）。图7显示了中国钢铁行业投入的不同能源占比（左图）以及消耗的不同类型能源占比（右图）。左图显示了能源投入占比，右图更为详细地显示了终端能源消耗占比（同时考虑到废热回收情形）。根据图7所示，焦炭所占份额最大，占中国钢铁行业最终能源消耗的67%。在钢铁厂中，出于不同目的和能源的终端用途各有不同。在中国钢铁行业的终端能源消耗中，通过加热过程（特别是在高炉中）将铁矿石转化为生铁/铁水所需消耗的能源占比最高。

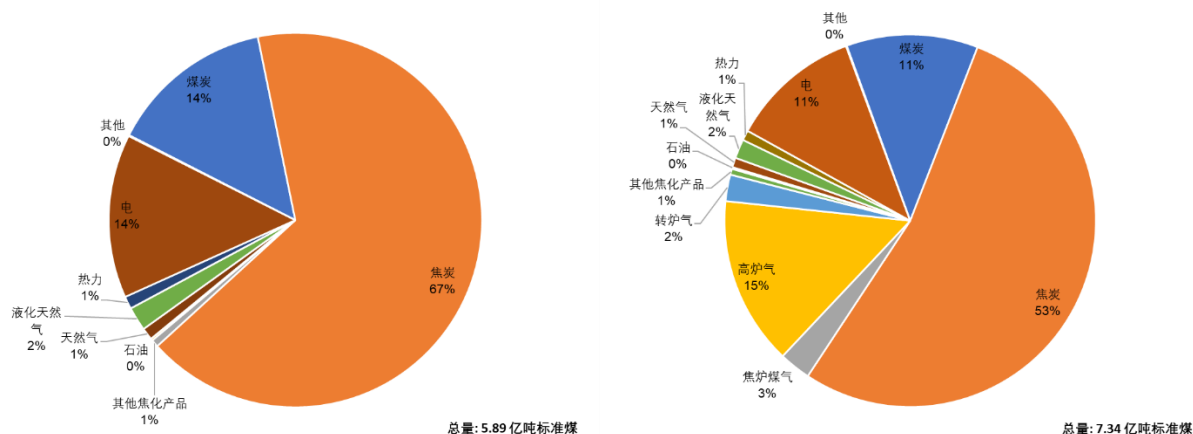


图 7：2020 年中国钢铁行业各种能源投入（左图）和能源消耗（右图）所占比例（国家统计局，2022 年）

备注：耗电量以最终能源形式显示，并未转换为一次能源。

4.2.有关中国钢铁行业能源强度和二氧化碳排放强度的对标分析

通过对能源强度和二氧化碳排放强度进行国际对标分析，可以提供一个参照点，将一个公司或行业的表现与其他国家的同类公司或行业的表现进行比较。针对采取的改善能源效率措施或者二氧化碳减排措施，可通过对标分析来评估该等措施可实现的降低能耗和排放的潜力。此外，在国家层面上，政策制定者可通过对标分析来确定节能和脱碳方案的优先顺序，并制定降低能耗和温室气体排放的政策。

在此前的研究中，我们对 15 个主要钢铁生产国和欧盟 27 国钢铁行业的能源强度和二氧化碳排放强度进行了对标分析（Hasanbeigi，2022 年）。我们开展这项研究得出的

一些主要结论列示如下，其中突出强调了在国际背景下中国钢铁行业的能源强度和二氧化碳排放强度。

4.2.1.有关钢铁行业总体的能源强度和二氧化碳排放强度的对标分析

就2019年15个主要钢铁生产国和欧盟27国整体钢铁行业的最终能源总强度而言，在Hasanbeigi（2022年）研究的各个国家中，意大利、土耳其、墨西哥和美国的能源强度最低（参见图8），其中的主要原因是这些国家使用电弧炉生产的钢铁量在钢铁总产量中所占比例要高得多。电弧炉属于二次钢铁生产工艺，它主要使用废钢铁作为原料，因此相比高炉-转炉工艺，使用电弧炉生产每吨钢铁所消耗的能源更少。换句话说，以废钢铁为主要原料的电弧炉炼钢所占份额越高，越有助于降低一个国家钢铁行业的整体能源强度。但是，应该指出的是，电弧炉也可以使用直接还原铁（甚或生铁）作为原料，而它们都属于可用于电弧炉炼钢的能源密集型原料。在印度等一些国家，电弧炉炼钢使用大量煤基直接还原铁，在中国，电弧炉炼钢使用大量通过能源密集型高炉生产的生铁，两者都导致这些国家的能源强度以及电弧炉炼钢排放强度大幅升高。此外，其他因素也会影响钢铁行业的能源强度和二氧化碳排放强度，具体如本章后文所述。

在所研究的国家中，乌克兰、中国、印度和巴西的能源强度最高（参见图8）。乌克兰、中国和巴西使用电弧炉生产的钢铁产量在钢铁总产量中所占份额也最低。在印度钢铁行业中，使用电弧炉生产的钢铁产量在钢铁总产量中所占份额很高（56%），但是，这种生产的能源强度相对较高，主要原因是不同于其他许多国家，印度使用大量直接还原铁作为电弧炉炼钢的原料（约占电弧炉炼钢原料总量的50%）。与再生废钢铁不同，直接还原铁是使用铁矿石并通过直接还原工艺生产出来的，这是一种能源和碳密集型工艺。此外，印度还是世界上为数不多的使用煤基直接还原铁技术（而非使用天然气作为还原剂还原铁矿石）的国家之一。这导致印度使用直接还原铁-电弧炉生产钢铁时的能源强度和排放量更高。

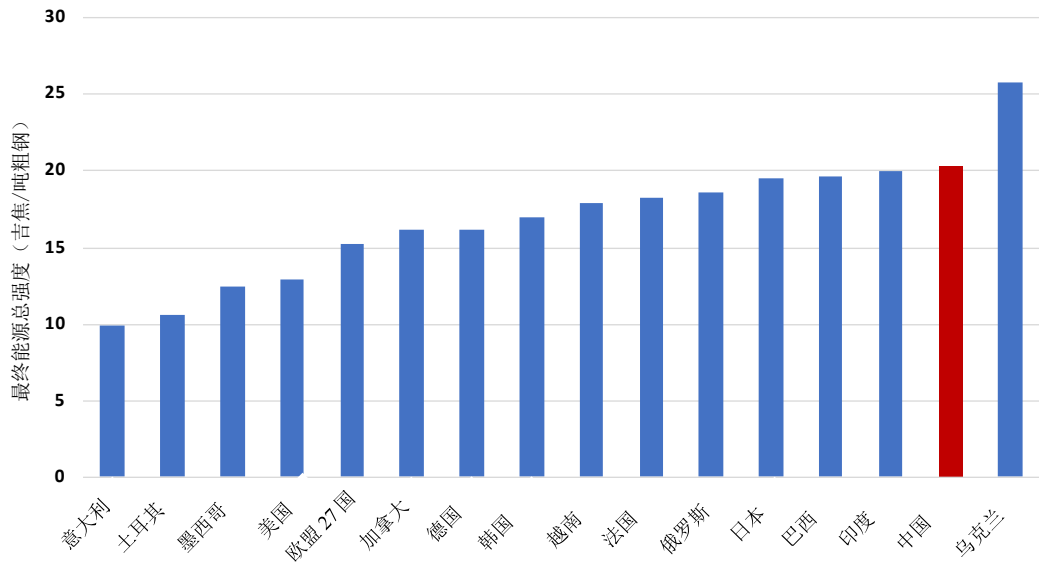


图 8：2019 年所研究国家/地区钢铁行业的最终能源总强度（Hasanbeigi，2022 年）。

Hasanbeigi 所研究国家/地区钢铁行业的二氧化碳排放强度排名（参见图 9）与能源强度排名略有不同。意大利、美国和土耳其的二氧化碳排放强度最低，乌克兰、印度和中国的二氧化碳排放强度最高。美国的二氧化碳排放强度很低，主要原因是该国以废钢铁为主要原料的电弧炉炼钢所占比例较高，还有部分原因是美国钢铁行业使用天然气的比例很高（占所用燃料总量的 54%）。与煤炭和焦炭相比，天然气的单位能源排放因子要低得多，而在中国和许多其他国家钢铁行业使用的主要能源类型是煤炭和焦炭。美国的二氧化碳电网排放因子也低于土耳其和墨西哥的水平。本章末尾讨论了影响钢铁行业二氧化碳排放强度的其他因素。

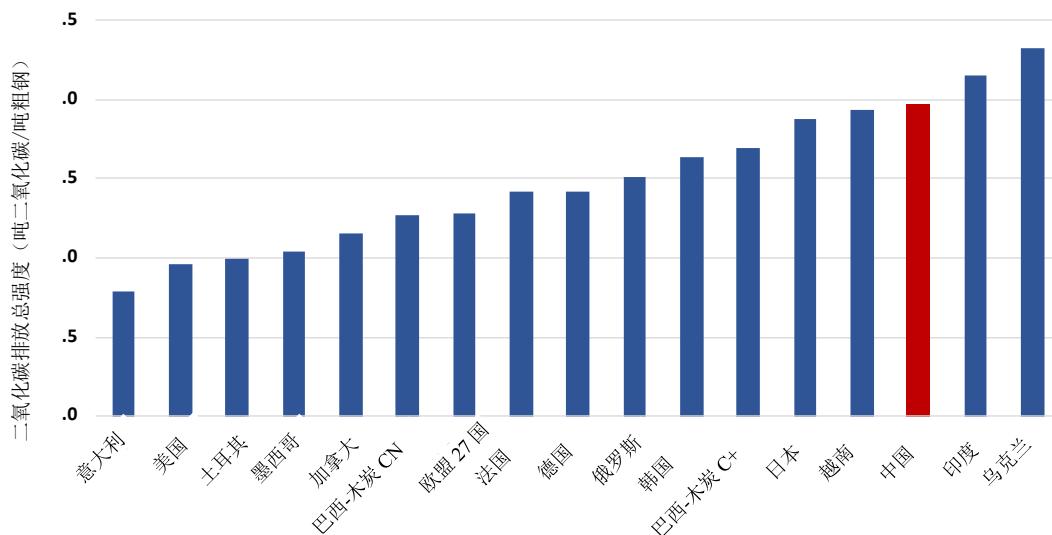


图 9：2019 年所研究国家/地区钢铁行业的二氧化碳排放总强度（Hasanbeigi，2022 年）。

备注：Brazil-木炭 CN 是指木炭被视为碳中性原料。巴西-木炭 C+是指由于人们对巴西钢铁工业所用生物质材料的可持续性存在疑问和担忧，未将木炭视为碳中和原料。

4.2.2.有关高炉-转炉初次钢铁生产的二氧化碳排放强度的对标分析

高炉-转炉和电弧炉这两种炼钢路线之间存在很大区别，因此，它们的二氧化碳排放强度也存在很大差异，为此，至关重要的是要深入研究，并基于每个生产路线对各个国家的钢铁生产进行基准分析，以提供有关各国钢铁生产的能源强度和碳排放强度的更加公允且准确的观点。

图 10 显示了 2019 年所研究国家/地区高炉-转炉初次钢铁生产的二氧化碳排放强度（Hasanbeigi, 2022 年）。值得强调的是，尽管在整个钢铁行业的二氧化碳排放强度中，中国排名第三（参见图 9），但如果仅以高炉-转炉钢铁生产路线的二氧化碳排放强度为基准，中国排名有所改善。中国电弧炉炼钢的份额很低，导致整个钢铁行业的二氧化碳排放总强度很高，但是，中国 80%以上的高炉-转炉钢铁产能是在 2000 年之后建成的，平均厂龄约为 15 年（国际能源署，2020 年）。这些新工厂中有许多正在采用更高效的生产技术。此外，过去十年间，中国一直在积极关停老旧和低效钢铁厂。印度的高炉-转炉炼钢的二氧化碳排放强度最高，主要原因是印度有许多老旧且低效的高炉-转炉炼钢厂仍在运营。但是，应该指出的是，印度一些新建钢铁厂的能效可达到世界最高水平。

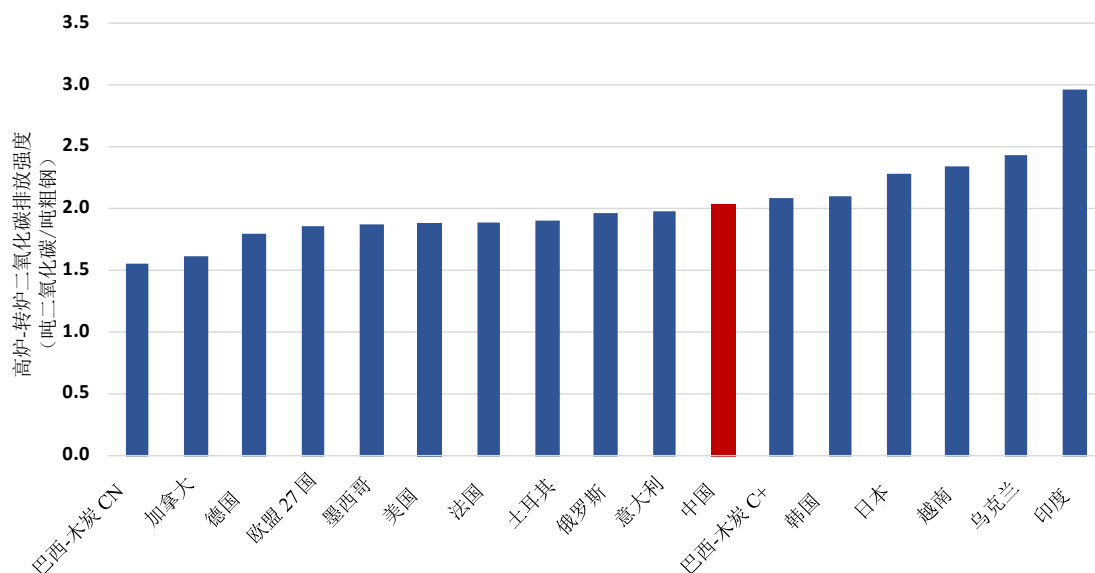


图 10：2019 年所研究的国家/地区高炉-转炉炼钢的二氧化碳排放强度（Hasanbeigi, 2022 年）。

备注：Brazil-木炭 CN 是指木炭被视为碳中性原料。巴西-木炭 C+是指由于人们对巴西钢铁工业所用生物质材料的可持续性存在疑问和担忧，未将木炭视为碳中和原料。

各国能源强度和二氧化碳排放强度存在差异，这无法通过任何单一因素作出解释。除了高炉-转炉钢铁厂的能源强度外，影响各个国家此类钢铁厂二氧化碳排放强度的另一个关键因素是所使用的燃料组合。基于各国钢铁行业所用燃料的加权平均二氧化碳排放因子，美国、墨西哥和加拿大的排放强度最低，而印度、越南和中国的排放强度最高。如果将木炭视为碳中性燃料，那么巴西拥有世界上最清洁的燃料组合，但如果未将木炭视为碳中性燃料，那么巴西钢铁行业燃料组合的碳密集程度最高。

4.2.3.有关电弧炉炼钢的二氧化碳排放强度的对标分析

电弧炉炼钢的能源强度和碳强度低于高炉-转炉炼钢的强度水平，尤其是电弧炉的全部或大部分原料都来自再生废钢铁¹。

图 11 显示了所研究的 15 个国家和欧盟 27 个地区电弧炉炼钢的二氧化碳排放强度（Hasanbeigi, 2022 年）。就电弧炉炼钢的二氧化碳排放强度而言，巴西和法国的强度最低，印度和中国的强度最高。印度、中国和墨西哥电弧炉炼钢的二氧化碳排放强度显著高于其他国家的水平，其中的关键原因是这三个国家电弧炉炼钢所使用的原料类型。在大多数国家，电弧炉炼钢使用的主要原料是废钢铁。然而，印度和墨西哥钢铁厂的电弧炉使用的大量原料是直接还原铁（印度约占 50%，墨西哥约占 40%）（世界钢铁协会，2021 年）。在中国，作为直接还原铁的替代品，电弧炉炼钢中使用的大量原料来自通过高炉生产的生铁（约占电弧炉炼钢原料的 50%）。直接还原铁和生铁生产都属于高度能源密集型工艺，如果将其用作电弧炉炼钢的原料，会导致电弧炉炼钢的能源强度和二氧化碳排放强度升高。越南电弧炉炼钢的二氧化碳排放强度很高，主要原因是该国的电网二氧化碳排放因子非常高。

¹备注：在计算电弧炉能源强度和碳排放强度时，通常不包含再生废钢铁中的隐含能源和碳强度。

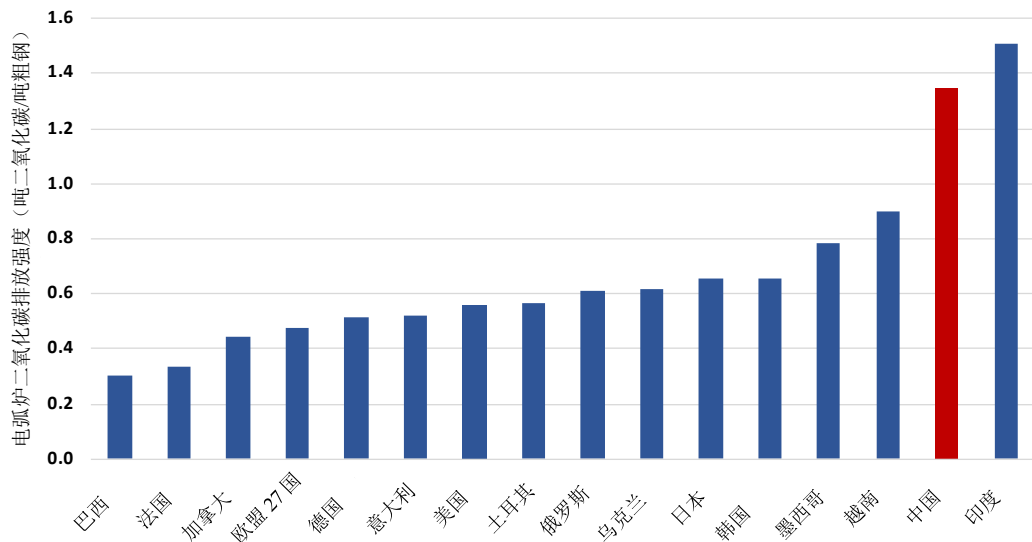


图 11：2019 年所研究的国家/地区电炉炼钢的二氧化碳排放强度（Hasanbeigi, 2022 年）。

影响电炉炼钢二氧化碳排放强度的另一个重要因素是电网二氧化碳排放因子。电炉炼钢（包括轧制和精加工）所用能源的一半以上来自电力。随着电炉炼钢中使用的直接还原铁的份额增加，电力在能源消耗总量中所占份额下降。因此，如果钢铁行业所用电力的排放因子下降，将显著降低电炉炼钢的二氧化碳排放强度。由于通过大型核电站（法国）和水电站（巴西和加拿大）发电，法国、巴西和加拿大的电网二氧化碳排放因子最低。在所研究的国家中，印度、越南和中国在发电时使用了大量煤炭，因此这三个国家的电网二氧化碳排放因子最高。

中国钢铁行业的能源强度和二氧化碳排放强度值不同于其他国家，造成这种状况所涉及的一些关键因素包括：

- 1) 电炉炼钢产量在该国钢铁总产量中所占比例很低
- 2) 钢铁行业使用的燃料组合包括高排放强度的煤炭和焦炭
- 3) 电网二氧化碳排放因子更高
- 4) 高炉-转炉和电炉炼钢中所用原料的类型
- 5) 节能技术的普及程度
- 6) 各国钢铁产品组合
- 7) 各国钢铁制造设备的机龄
- 8) 产能利用率
- 9) 环保法规

10) 能源和原材料的成本

11) 钢铁行业的边界确定

5.中国钢铁行业净零碳排放路线图

5.1.脱碳情景

在分析了中国钢铁行业的现状及其能源强度和二氧化碳排放强度之后，我们基于四种主要情景为中国行业制定了 2050 年脱碳路线图：

1. **“一切照旧如常”（BAU）情景：**该情景假设能源效率和燃料转换的改善速度很慢，并且碳捕获、利用与封存（CCUS）技术的采用速度也很慢，根据当前的商业实践以及政策和法规，可能发生这种情景。
2. **中等技术和政策（“适度适中”）情景：**该情景假设能源效率获得更大幅度的改善，将更多燃料转换为低碳燃料，以及稍多地采用电弧炉生产钢铁。在这一情景下，还假设碳捕获、利用与封存（CCUS）技术的采用率很低。
3. **先进技术与政策（“先进”）情景：**该情景假设使用商业可行技术显著提高能源效率，更积极地将所用燃料转换为低碳燃料，大幅转向以废钢铁为主要原料的电弧炉炼钢，以及少量采用氢基直接还原铁-电弧炉炼钢等变革性技术。
4. **“净零碳排放”情景：**该情景假设最积极地使用商用可行技术来提高能源效率，更积极地将所用燃料转换为低碳燃料，并以最快速度转向以废钢铁为主要原料的电弧炉炼钢，以及适度采用氢基直接还原铁-电弧炉炼钢。

5.2.中国钢铁行业的脱碳路径

我们在分析中谈到了五大脱碳支柱，即：1) 需求减少；2) 能源效率；3) 燃料转换、电气化和电网脱碳；4) 技术转向低碳炼钢（例如以废钢铁为主要原料的电弧炉炼钢、氢基直接还原铁-电弧炉炼钢等）；5) 碳捕获、利用与封存（CCUS）。以下各章节将更详细地讨论上述每个脱碳支柱及其对中国钢铁行业脱碳的影响。

我们在各个脱碳支柱项下设定不同水平，并在不同情景下预测到 2050 年中国钢铁行业的最终能源消耗总量和二氧化碳排放总量。我们的分析结果如图 12 所示。

在“一切照旧如常”（BAU）情景下，由于钢铁需求减少（导致钢铁产量下降 23%）、能源效率适度提升、技术转移更替（主要转向电弧炉炼钢）以及电网脱碳（到 2050 年），在 2020 年至 2050 年期间，年二氧化碳排放量将减少 54%。在“一切照旧如常”情景下，中国钢铁行业每年的二氧化碳排放总量将从 2020 年的 21.03 亿吨/年下降到 2050 年的 9.68 亿吨/年。

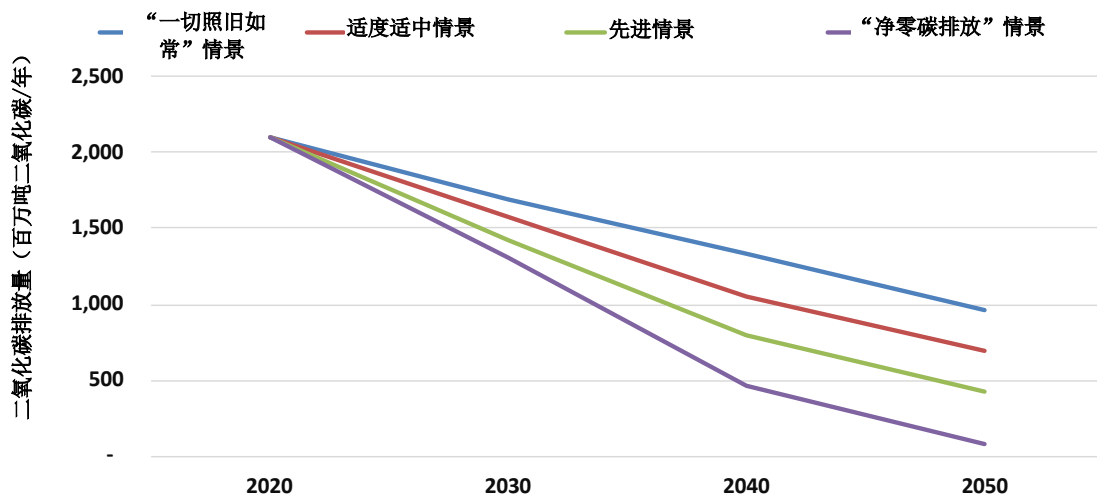


图 12：2020 至 2050 年各种不同减碳情景下中国钢铁行业的二氧化碳年排放总量（资料来源：本研究）

就钢铁行业的二氧化碳年排放量而言，在“净零碳排放”情景下减少幅度最大，相关驱动力包括减少需求（导致钢铁产量减少 38%）、采取能源效率措施、进行燃料转换、向低碳钢铁生产的技术转移，以及碳捕获、利用与封存（CCUS）等积极贡献。在“净零碳排放”情景下，到 2050 年，中国钢铁行业的二氧化碳排放总量将下降至每年约排放 7,800 万吨二氧化碳，与 2020 年相比，排放水平下降 96%（参见图 12）。

图 13-14 显示了 2050 年中国钢铁行业在“净零碳排放”情景下，各种脱碳支柱对二氧化碳减排的贡献情况。在这种情景下，技术转移更替（主要是转向以废钢铁为主要原料的电弧炉炼钢）对二氧化碳减排作出的贡献最大，其次是需求减少和燃料转换、工艺热电气化和电网脱碳。我们的分析表明，能源效率以及碳捕获、利用与封存（CCUS）的贡献度将低于其他脱碳方案。

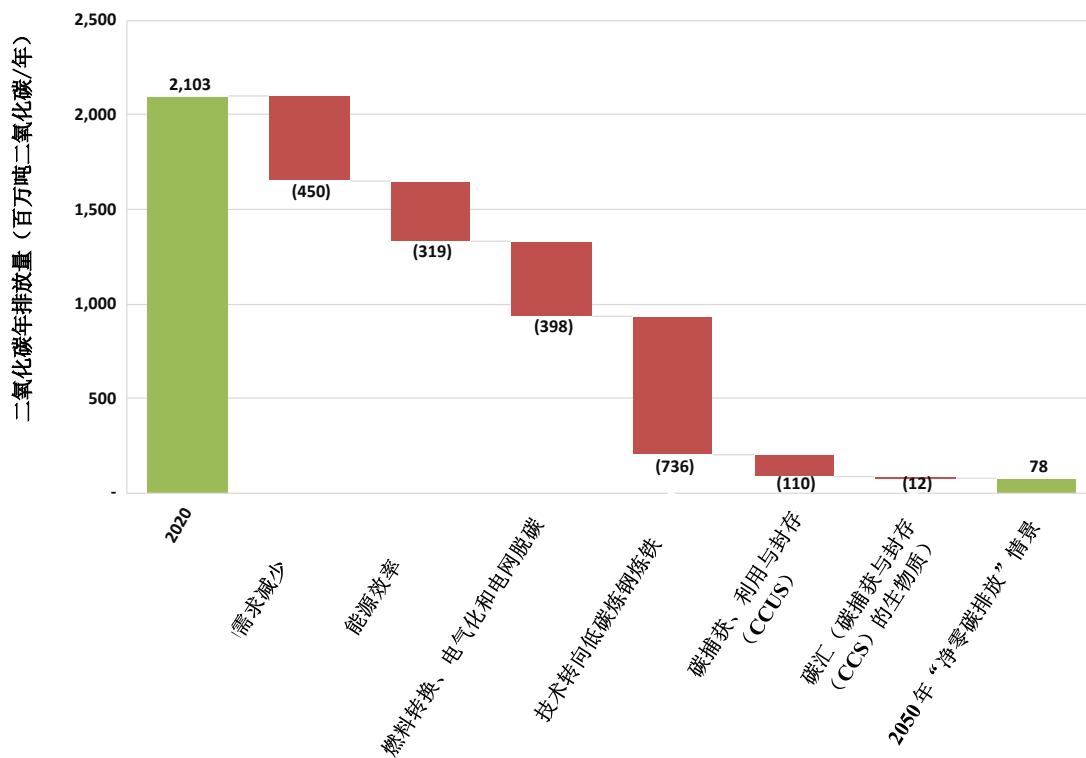


图 13: 在净零碳排放情景下脱碳支柱对中国钢铁行业二氧化碳排放的影响 (资料来源: 本研究)

图 14 显示了从“一切照旧如常”情景一直到净零碳排放情景, 各个脱碳支柱对中国钢铁行业二氧化碳排放的影响。该图中使用不同颜色代表各个脱碳支柱, 显示了 2020 年至 2050 年期间内每个脱碳支柱对中国钢铁行业总体脱碳的累计贡献。

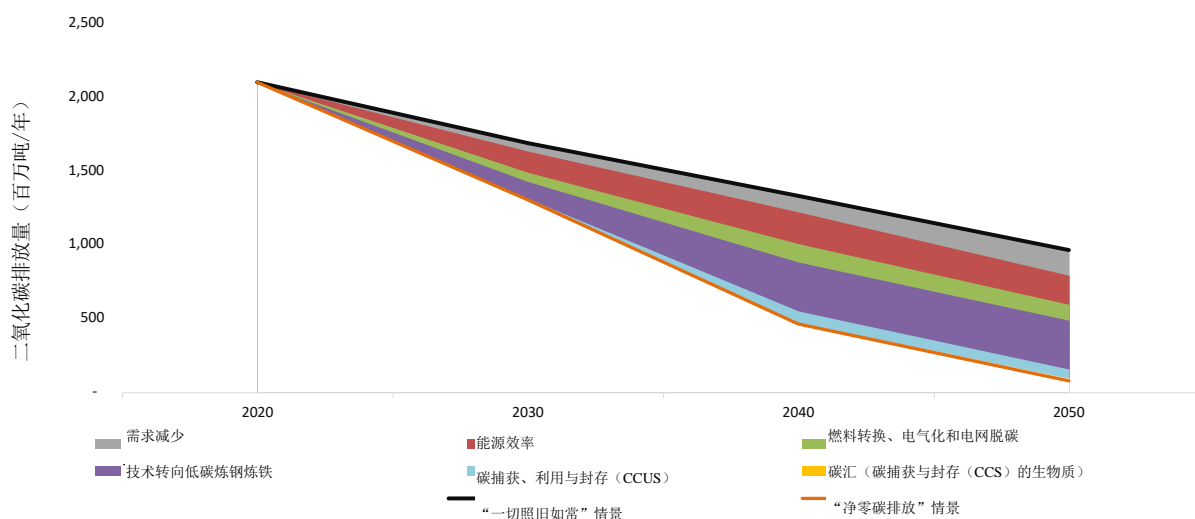


图 14: 从“一切照旧如常”情景一直到净零碳排放情景, 各个脱碳支柱对中国钢铁行业二氧化碳排放的影响 (资料来源: 本研究)

6.各个脱碳支柱对中国钢铁行业的影响

6.1.需求减少

制定中国钢铁行业脱碳路线图的第一步是预测 2020 年至 2050 年期间内中国钢铁产量。中国的钢铁需求和产量是该行业二氧化碳排放的主要驱动力。

根据多个消息来源，由于房地产行业的不确定性以及制成品出口增长放缓，中国钢铁需求已经见顶，或者将在未来数年内见顶。2021 年中国钢铁产量较 2020 年下降 2.8%，2022 年 1-11 月产量较去年同期下降 1.4%。预计中国钢铁行业的产量将呈下降趋势。根据国际能源署（2020 年）、Zhou 等人（2020 年）、中国钢铁工业协会（2022 年）、Chen 等人（2021 年）、MPP（2021 年）以及其他研究中作出的预测，我们对未来钢铁产量作出预测。大多数分析表明，截至 2050 年，中国的钢铁产量和需求将在未来几年和几十年（参见图 15）下降到 6.00-7.50 亿吨钢铁。

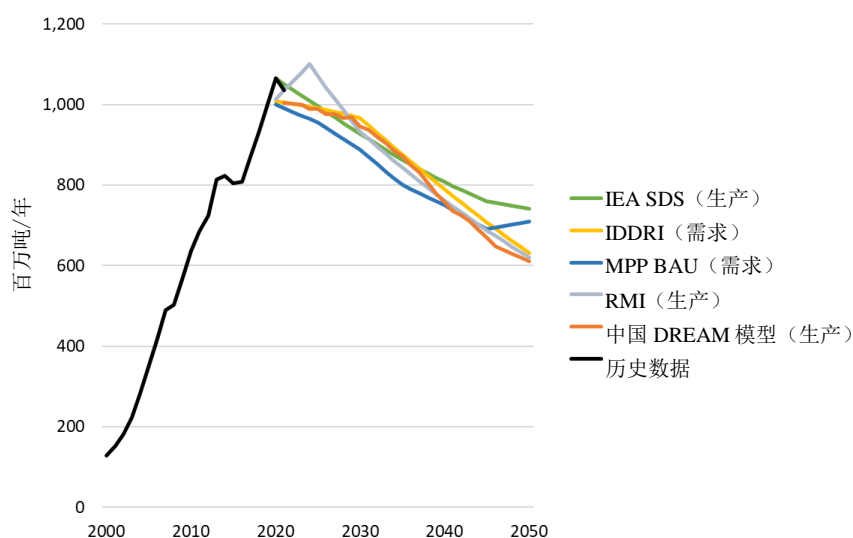


图 15：不同研究对中国钢铁产量和需求的预测（Mission Possible Partnership，2021 年；J. Chen、Li 和 Li，2021 年；国际能源署，2020 年；Bataille、Stiebert 和 Li，2021 年）

备注：STEPS=Stated Policies Scenario；SDS=可持续发展情景；IDDRI=可持续发展与国际关系研究所；MPP=可行使命伙伴关系；BAU=一切照旧如常；中国 DREAM=中国需求资源能源分析模型。

国际能源署（2020 年）指出，他们假设关键驱动因素来自政府主导的持续结构性变革，在国际能源署的可持续发展情景（SDS）下，预计到 2050 年中国钢铁产量将下降至约 7.40 亿吨。Bataille 等人（2021 年）采用重点国家和地区人均钢材消费长期增长收敛的方法测算中国钢材需求。中国目前的人均钢材消费量略低于 1,200 公斤/人，但由于该国的大部分能源、交通、水利和卫生基础设施业已开发完成，作者预计到 2050 年人均钢材消费量将大幅下降至约 250 公斤/人（Bataille，Stiebert 和 Li，2021 年）。RMI 预计未来几十年内中国城市化进程将会放缓，并导致整体钢铁需求下滑，尤其是

建筑行业 and 机械行业（J. Chen, Li 和 Li, 2021 年）。劳伦斯伯克利国家实验室创建的中国 DREAM 模型是一个自下而上的终端能源需求模型，它根据终端用途的实际钢材需求模型（例如建筑库存周转率）以及其他钢铁产品的附加值预测，估计中国钢铁产量到 2050 年将下降至约 6.1 亿吨（Zhou 等人, 2020 年）。

从价值链的角度来看，下游主要的钢材需求包括建筑、机械、汽车、能源系统、五金制品、钢木家具、家电、铁路、航运、集装箱等行业。

2020 年，约 59% 的钢材用于建设和建设项目，包括房地产行业的建筑物以及道路、高速公路、桥梁、机场和工业建设项目等基础设施（参见图 16）。建筑行业占钢铁总需求的 35%。开发建设项目还会拉动机械、五金制品、家电等行业对钢材的间接需求，这三个行业的需求分别占 2020 年中国钢材产量的 16%、3% 和 1%。汽车行业、能源行业和其他行业的钢铁需求分别占钢铁产量的 6%、4% 和 7%（前瞻产业研究院, 2020 年）。

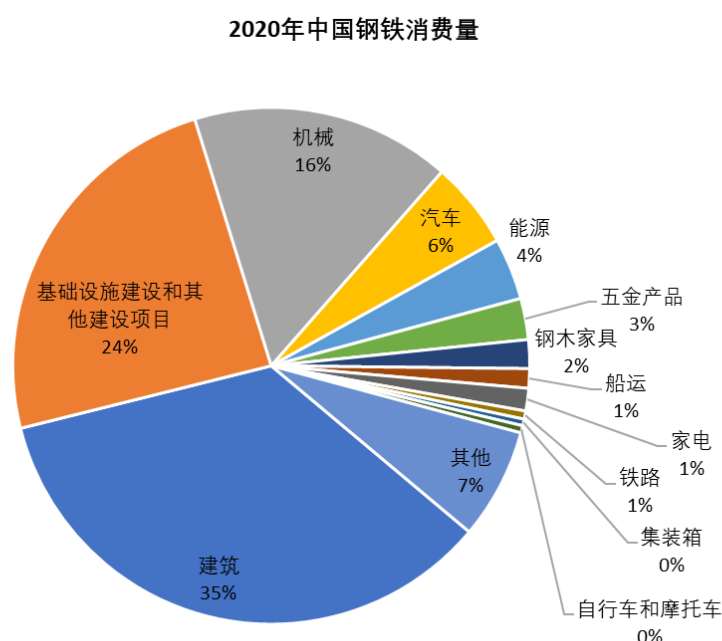


图 16: 2020 年中国终端钢铁需求（前瞻产业研究院, 2020 年; L. Guo 和 He, 2021 年）

在中国人口减少和建筑库存饱和的推动下，预计建筑行业未来的钢材需求将会下降。鉴于建筑行业一直是中国最大的钢铁终端消费来源，这将对中国的整体钢铁需求产生重大影响。中国对基础设施项目采取的最新刺激措施将增加钢铁需求，但鉴于全球经济疲软以及中国施加的新冠疫情限制措施，这些刺激无法抵消房地产行业钢铁需求下降。

在汽车（例如电动汽车）和能源行业（例如电网扩建、可再生能源发电、CCS 系统）等最新增长领域的推动下，未来的钢铁需求也可能得到提振。根据相关研究，预

计新增钢铁需求可能被智能制造、材料替代、回收和共享出行所抵消（Chen, Li 和 Li, 2021 年）。

根据中国未来钢铁需求的所有这些信息，图 17 显示了本研究中设定的四种不同情景下预测的 2050 年中国钢铁产量。2020 年中国钢铁产量为 10.65 亿吨，预计到 2050 年，在“一切照旧如常”情景和净零碳排放情景下，钢铁产量将分别下降到 8.20 亿吨和 6.60 亿吨。

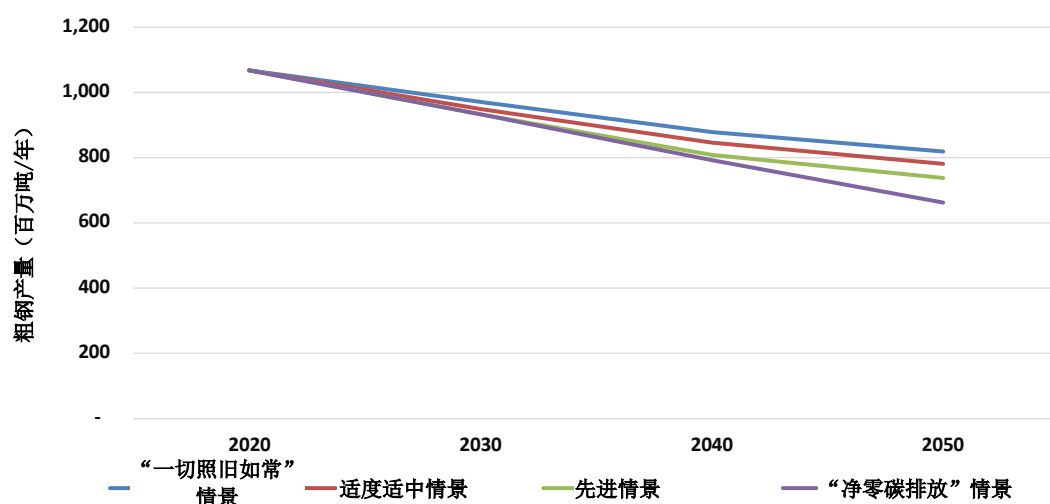


图 17：本研究中使用的 2020 至 2050 年中国每年钢铁产量预测（资料来源：本研究）。

提高材料效率的措施

材料效率是指使用较少的材料即可实现商品和服务的交付，这是对中国钢铁需求产生重要影响的另一项关键策略。如表 1 所示，在产品生命周期的每个阶段都存在提高材料效率的多种策略，从钢铁产品设计（例如，改进设计以减轻产品重量，通过优化以最大限度地减少材料使用量，通过设计来延长使用寿命、提高重复使用性以及促进高质量回收）、钢铁产品制造（例如，提高生产和制造工艺中的材料效率，提升材料回收率）、钢铁产品使用（例如，延长建筑物和产品寿命，强化产品用途，并转向其他低碳替代材料，例如在中低层建筑物中大量使用木材）一直到钢铁产品报废回收（例如，增加建筑构件的直接再利用，提高钢铁产品的回收率，以及推动钢铁产品再制造）。

表 1：减少钢铁需求的材料效率措施

价值链阶段	措施	节省材料的潜力 (%)	适用范围	参考资料
设计	改善钢铁产品设计 <ul style="list-style-type: none"> • 采用轻质材料 • 优化材料使用方式 • 基于可循环原则进行设计 	13	建筑物、车辆和钢铁产品	(Carruth, Allwood 和 Moynihan, 2011 年; Zhou 等人, 2019 年)
制造	提高半成品良率	7	所有领域均适用	(Mission Possible Partnership, 2021 年; Material Economics, 2019 年)
	提高产品制造良率	13	钢铁产品	(Mission Possible Partnership, 2021 年; Material Economics, 2019 年)
使用	延长建筑物和钢铁产品的使用寿命	25	建筑物、车辆和钢铁产品	(Hertwich 等人, 2019 年)
	使用大量木材	50	建筑物	(Y. Dong 等人, 2019 年; H. Guo 等人 2017 年)
回收	产品组件的直接再利用 (无需熔化)	15	建筑物和工业用钢	(Eberhardt, Birgisdóttir 和 Birkved, 2019 年)

此前已有文献指出，材料效率策略在节约材料和减少温室气体排放方面拥有巨大潜力，尤其对于建筑物和车辆所用钢材。如果实施这些策略，可大幅减少钢铁需求 (Hertwich 等人, 2019 年)。

材料效率策略与能源效率之间可能需要作出权衡取舍。举例来说，为了提高建筑物运行能效或者实现建筑物能耗脱碳而采取相关措施时 (例如加装额外保温层、构建热交换通风系统、被动式太阳能设计和储热)，可能会增加建筑物的材料使用量。如果旧建筑物的设计标准不太严格，为了在节省材料的同时又要延长建筑物寿命，可能会增加建筑物的运行能耗。若要利用木材资源，需要考虑其可持续性 (例如，从长期来看，会破坏和减少土壤碳储存) 和供应量，从而会限制在中国大量使用木材。因此，进行全面的生命周期分析以评估此类权衡问题非常重要。

现有文献很少探讨材料效率措施的成本问题。政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 第六次评估报告指出，工业部门所有材料效率策略项下每减少一吨二氧化碳当量，产生的总成本为 20-50 美元 (IPCC, 2022 年)。一项以英国为重点的研究估计，各种材料效率措施项下每减少一吨二氧化碳当量，产生的成本从负值到 874 英镑 (1206 美元

2) 左右不等（参见表 2）。一些材料效率措施产生的成本为负值，这表明投资于这些措施可以节省资金。

表 2: 为了节省钢材所采取各种材料效率措施的成本（Durant 等人，2019 年）

材料效率措施	终端用途所属行业	减少比例	成本（美元）
钢梁再利用	建筑业	减少 40%	385 至 1206 美元/吨二氧化碳
选用最佳轻质梁	建筑业	减少 36%	92 至 283 美元/吨二氧化碳
选择小型汽车	交通业	减少 20%	-1380 至 585 美元/吨二氧化碳
采用高强度钢制车身	交通业	减少 12%	-2946 至 -973 美元/吨二氧化碳

6.2. 能源效率

钢铁行业中，目前有多种能够以商业规模进行部署的能效技术。例如，不同工艺的废热回收、干法熄焦（CDQ）、高炉煤气余压透平发电装置（TRT）以及其他多种技术等，均可实现商业部署（JISF，2022 年 a, b）。此外，借助智能制造和物联网，可将尖端技术应用于能源管理系统；此类技术包括预测性维护、机器学习或者数字孪生³，以改进工艺控制（Hasanbeigi 等人，2013 年）。

提高能源效率还可带来其他益处，有助于节省能源成本，其中包括：

- 减少业务的不确定性，并降低能源成本波动风险
- 提高产品质量，并转向具有更高附加值的细分市场
- 提高生产率
- 在减少温室气体和常规空气污染物排放的过程中，降低相关的环境合规成本

各个钢铁企业的经验表明，通过适度投资于节能技术和措施，可以节省能源和成本，同时缩短回收期（例如降至三年以下）。但是，对于一些重大能效技术，需要进行大量投资。这些大量资本投资可能很难仅通过节省能源成本而获得充分补偿；但是，这些投资能够提高生产率和产品质量，并有助于环境合规，从而改善该等投资的经济效益。每家工厂的情况各有不同，基于各自的独特状况，应该选择最有利的能源效率措施来解决工厂的特定情况和设计（Worrell 等人，2010 年）。表 3 列出了钢铁行业采取的一些商业化能效措施和技术。

²基于 2021 年平均汇率：1 英镑=1.38 美元。

³数字孪生是指预期或实际的现实世界实体产品、系统或工艺的数字映射，出于模拟、集成、测试、监测和维护等实际用途，它可以充当物理对象的有效且不可区分的数字对应物。

表 3：钢铁行业采取的商业化能效措施和技术示例（JISF，2022 年，a；Worrell 等人，2010 年）

编号	能效措施/技术	编号	能效措施/技术
	烧结	32	改进电弧炉工艺控制
1	从烧结冷却器回收热量	33	使用基于工程颗粒加工的耐火材料
2	减少空气泄漏	34	采用直流电（DC）电弧炉
3	增加底座深度	35	废钢铁预热
4	在烧结厂使用废燃料	36	向电弧炉投入废塑料和旧轮胎（新兴技术）
5	改进方式	37	密闭操作（新兴技术）
6	提高点火炉效率	38	底部搅拌/注气
		39	康迪克电炉（新兴技术）
	炼焦	40	Comelt 直流电炉（新兴技术）
7	煤炭水分控制		
8	焦炉程序加热		铸造和精炼
9	焦炉煤气压缩机变速驱动	41	铸造和轧制一体化（带钢连铸）
10	干法熄焦（CDQ）	42	高效钢包预热
11	下一代制焦技术（SCOPE21）（新兴技术）		
			成型
	炼铁-高炉	43	使用节能电机
12	高炉喷吹煤粉（达到 130 千克/吨铁水）	44	安装润滑系统
13	向高炉注入天然气		
14	向高炉注入石油		热轧
15	在高炉中投入废塑料	45	复热式或蓄热式燃烧器
16	高炉喷吹焦炉煤气	46	无焰纯氧燃烧器
17	余压透平发电装置（TRT）	47	控制助燃鼓风机的氧气水平和变速驱动
18	回收高炉煤气	48	再热炉的保温
19	改进高炉控制	49	采用热装工艺
20	炉渣热回收（新兴技术）	50	热带钢轧机的工艺控制
21	热风炉燃料预热	51	产品热回收
22	改进热风炉燃烧	52	冷却水余热回收
23	改进热风炉控制	53	步进式加热炉
	炼钢-氧气顶吹转炉（BOF）		冷轧
24	转炉煤气和显热	54	连续退火
25	通风机变速驱动	55	退火线上的热回收
26	转炉工艺供氧控制系统	56	减少酸洗线中使用的蒸汽

27	高效的程序化钢包加热	57	自动监控和定位系统
	电弧炉炼钢		交叉措施
28	转用超高功率（UHP）电弧炉	58	钢铁厂的预防性维护
29	烟气风机的可调速驱动（ASD）	59	钢铁厂能源监控管理系统
30	纯氧燃烧器/喷枪	60	电机系统和蒸汽系统优化
31	烟气二次燃烧	61	智能传感器和实时监控系统

6.3.燃料转换、电气化和电网脱碳

在燃料转换方面，有多种其他燃料可以替代煤炭或焦炭用作钢铁生产过程中所需的燃料或还原剂，例如天然气、生物质、沼气以及（在更长时间范围内）氢气。

在电气化方面，可以对加热炉实施电气化改造，并扩大感应电弧炉的应用规模。对钢包和中间包进行加热时，可以转而采用电阻加热、红外线加热或等离子加热方式。电弧炉炼钢也是实施电气化的一种方式，在我们的分析中，并未将其列在电气化支柱下，而是列在技术转移更替支柱下。在电网脱碳方面，就钢铁生产中使用电力的所有工艺程序，均可通过使用低碳电力实现脱碳。

在我们的分析中，基于中国转用低碳燃料，我们预测了中国钢铁行业使用的燃料组合（参见图 18）。例如，在净零碳排放情景下，我们假设到 2050 年中国钢铁行业的煤炭和焦炭消耗量将大幅减少，并且由于生产工艺路线转向电弧炉，电力的使用份额将会增加（具体如前所述）。我们还假设在 2040 年和 2050 年在加热工序中将使用一小部分可持续生物质和氢气（除了氢基直接还原铁工厂使用的氢气）。可持续生物质燃料被视为具有碳中和属性，它与碳捕获与封存（CCS）相结合，共同为该行业提供碳汇。

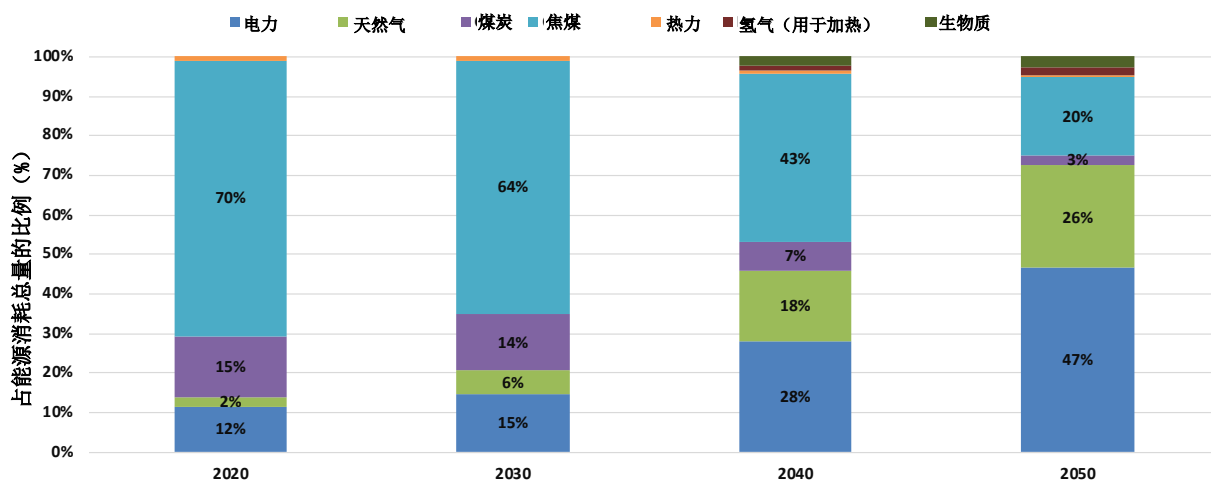


图 18：2020-2050 年在净零碳排放情景下中国钢铁行业能源组合预测（资料来源：本研究）。

备注：在本图中，为了生产氢气-直接还原铁工艺中用作还原剂的氢气所需的电力需求列在“电力”一项中。

在整体能源组合中，所占份额增幅最大的是电力。在净零碳排放情景下，电力所占份额将从 2020 年的 12% 增加到 2050 年的 47%，其中的主要原因是电弧炉炼钢在钢铁总产量中所占份额大幅增加（在净零碳排放情景下，从 2020 年的 10% 增加到 2050 年的 60%）。

在净零碳排放情景下，还假设 2020 年到 2050 年的期间内天然气所占份额将大幅增加。该等增长的部分动力来自以天然气为原料生产直接还原铁，另一部分动力来自整体燃料组合从煤炭转向碳强度较低的天然气。中国大部分天然气仍需通过进口获得。

中国钢铁行业脱碳的另一个关键因素是该行业所用电力的碳强度。由于严重依赖煤炭发电，中国电力行业的碳强度处于世界最高水平。图 19 显示了 2019 年主要钢铁生产国电力部门的二氧化碳排放因子。

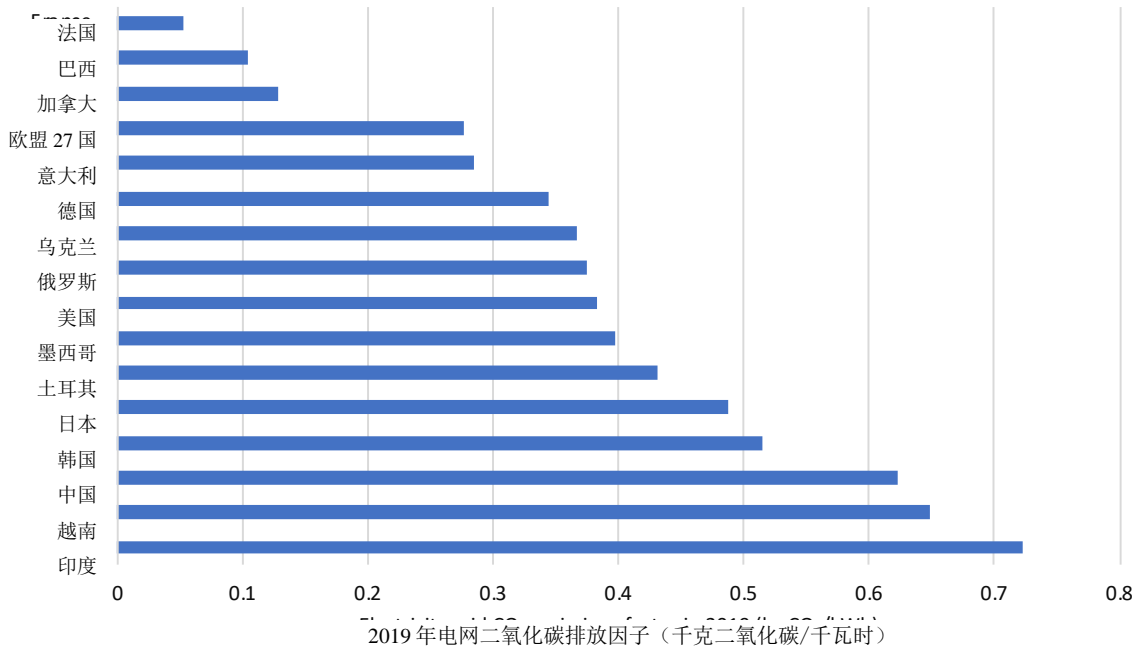


图 19：2019 年所研究国家的电网二氧化碳排放因子（国际能源署，2021 年）

就钢铁行业二氧化碳排放强度而言，随着中国更多地转向电弧炉炼钢，生产钢铁所用电力二氧化碳排放强度将变得越来越重要。图 20 显示了本研究设定的不同情景下中国电力行业的二氧化碳排放强度预测水平。我们假设在净零碳排放情景下，中国电力行业将在 2050 年实现碳中和。即使在“一切照旧如常”情景下，也假设中国电力行业的二氧化碳排放强度将在 2020 年至 2050 年期间下降 66%。

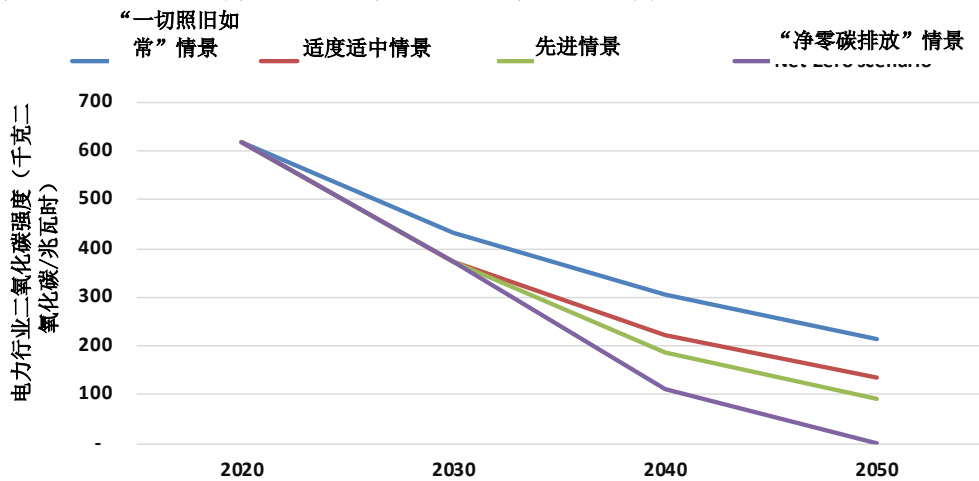


图 20：不同情景下中国电网二氧化碳排放强度预测（资料来源：本研究）

6.4. 转向低碳炼钢技术

影响二氧化碳排放量预测的另一个重要支柱是到 2050 年各种钢铁生产路线在中国钢铁总产量中所占份额。图 21 显示了到 2050 年在所有情景下各种生产路线在中国钢铁总产量中所占份额。

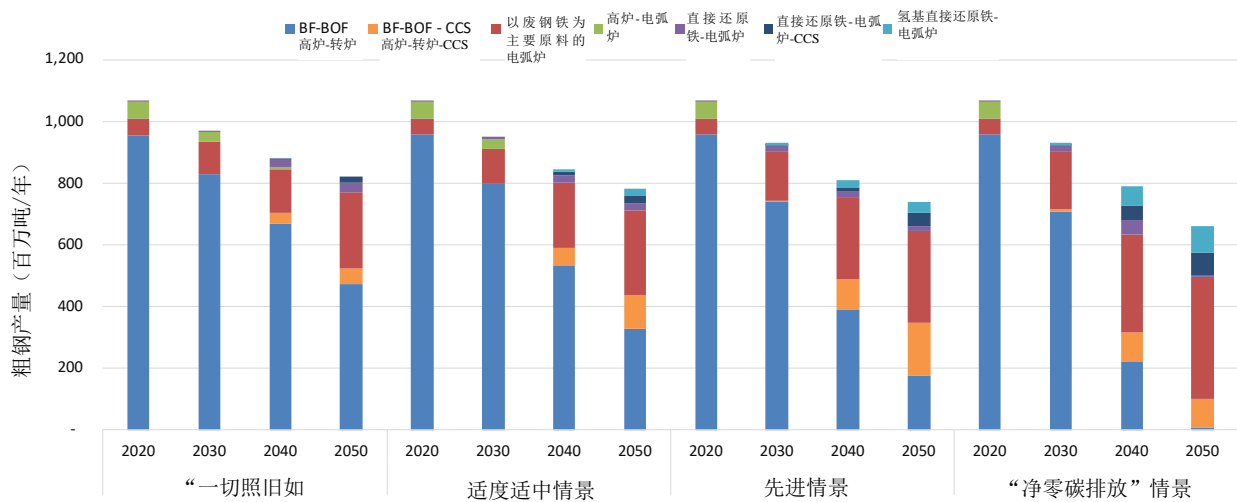


图 21: 2020-2050 年在每种情景下按技术类型划分的粗钢产量（资料来源：本研究）。

为了说明在净零碳排放情景下每种炼钢技术在钢铁总产量中所占份额，图 22 显示了 2050 年在净零碳排放情景下每种钢铁生产技术所占份额（%）。在此情景下，到 2050 年，以废钢铁为主要原料的电弧炉生产路线的钢铁产量将占中国钢铁总产量的 60%，其次分别是高炉-转炉+CCS（14%）、氢基直接还原铁电弧炉（13%）和直接还原铁-电弧炉+CCS（11%）。

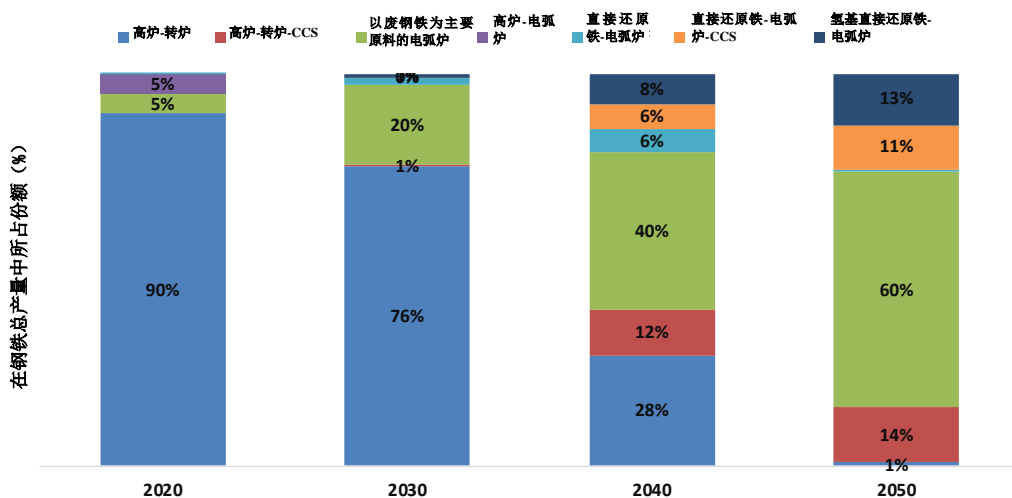


图 22: 2050 年在净零碳排放情景下每种钢铁生产技术所占份额（资料来源：本研究）。

在我们发布的路线图中，以下两项低碳技术最有助于中国钢铁行业减少温室气体排放：1) 以废钢铁为主要原料的电弧炉炼钢和 2) 氢基直接还原铁-电弧炉炼钢。我们将在下文中更详细地讨论每一项制造工艺。下面讨论的另一项技术是在鼓风机中注入富氢气体。鉴于中国新建了大量高炉设备，中国在中短期内可优先考虑这项技术，其次是在直接还原铁工艺中使用富氢气体。这有助于减少高炉炼钢所使用的煤炭和焦炭

的数量，从而降低中国高炉-转炉炼钢的二氧化碳排放强度。中国已将使用纯氢的氢基直接还原铁工艺视为中长期发展阶段内的关键技术（CISA，2022年）。

我们建议政府不鼓励在中国新安装任何高炉设备。即使在短期内（到2030年），中国国内可用的废钢铁也将大幅增加，这可能会取代建设新高炉的需求。与此同时，中国需要建造新的电弧炉炼钢厂。中国政府还应尽可能地阻止重新砌筑高炉，并鼓励建设氢基直接还原铁（H₂-DRI）或者氢就绪直接还原铁工厂。重新砌筑高炉实质上是一项资本密集型投资，将使高炉的使用年限再延长15年以上，同时将其碳排放量保持在几乎相同的水平。

重新砌筑高炉将导致资产闲置，这与中国的碳达峰和碳中和目标不符。重新砌筑高炉的资本成本可能比建造一座新的“直接还原铁”工厂的资本成本还要高。此外，随着中国和世界其他国家地区在未来几年建设一些氢基直接还原铁（H₂-DRI）工厂，并在这种低碳炼铁技术上获得经验和信心，再加之未来几年中国兴建大型项目，执行激励措施，绿氢能源的价格随之下跌，转向使用氢基直接还原铁在未来几年可能会比重新砌衬高炉更具吸引力，这会是一项更有利于改善气候的投资。

6.4.1. 电弧炉

电弧炉主要使用再生废钢铁作为原料生产钢铁。电弧炉也可以使用直接还原铁和生铁（作为废钢铁替代品）来生产钢铁。电弧炉配备碳电极，可通过炉顶进行升降，并利用电极电弧提供必要能量。电弧炉炼钢的能耗远低于高炉-转炉炼钢的能耗水平，原因是在初次生产钢铁时，能源密集型的铁矿石原料已在高炉（或者直接还原铁厂，或者熔融还原厂）中进行还原，然后回收废钢铁用于电弧炉炼钢。电弧炉炼钢可以使用各种类型的废钢铁、直接还原铁（DRI）、生铁和熔融铁（高达30%）作为进料。来自电弧炉的钢水通常被送到钢包冶金站（LMS）以提高钢铁质量。回收废钢铁炼钢可以节省原材料以及所需的能源，并降低生产钢铁的二氧化碳排放强度。

截至2021年，电弧炉炼钢仅占中国钢铁总产量的10.6%（国际钢铁协会，2022年），大大低于世界平均水平（28%），也低于工业发达国家水平（美国：70%；欧盟：42%；韩国：32%；日本：24%）（《中国钢铁新闻》，2020年）。中国使用电弧炉炼钢的比率较低，其中的一些关键因素包括中国大型高炉-转炉产能年限平均不到15年、可用的废钢铁数量有限，以及电弧炉生产工艺的成本较高。

根据假设的中国钢铁行业电弧炉渗透率以及不同情景下电弧炉和转炉所用废钢铁的比率，我们估算了2020-2050年间中国钢铁行业在每个情景下的废钢铁消耗量。在净零碳排放情景下，2050年的废钢需求量约为5亿吨。根据各种研究作出的废钢铁供应量预测，中国很可能满足这一需求量，具体如下所示。（图23）

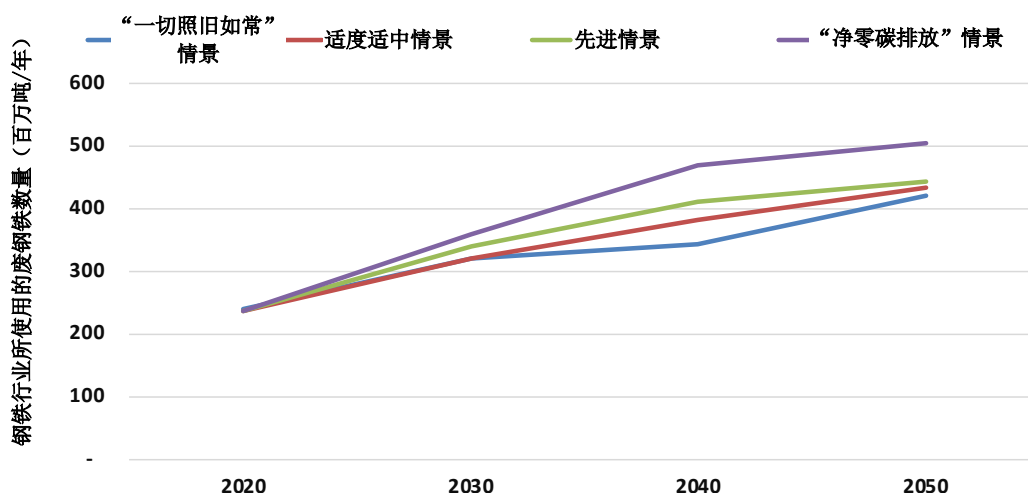


图 23: 2020-2050 年中国钢铁行业废钢铁消费量预测

废钢铁供应情况

在中国，目前以下述两种方式利用废钢铁：1）在转炉（BOF）中与铁水一起熔炼，以及 2）直接在电弧炉中熔炼。由于高炉-转炉的钢铁产量很大，目前中国约 70%的废钢铁用于转炉炼钢，而只有 30%的废钢铁用于电弧炉炼钢。截至 2021 年，中国钢铁行业废钢铁消费总量约为 2.52 亿吨（《中国冶金报》，2021 年）。

最近有多项研究预测了中国的废钢铁供应前景，具体如图 24 所示。中国钢铁工业协会（CISA）预测，到 2030 年，中国钢铁行业可供应的废钢铁约为 3.5 亿吨/年，到 2050 年将达到 5 亿吨/年（钢铁工业协会，2022 年）。2022 年初，中国工业和信息化部（MIIT）估计，到 2025 年，钢铁行业每年可供应 3 亿吨废钢铁（中国工信部，2022 年）。根据钢铁产品的使用寿命和回收率，Xuan 和 Yue 在 2016 年预计，到 2030 年中国废钢铁的供应量将达到 3.18 亿吨/年。Shangguan 等人在 2020 年使用两种方法估算中国的废钢铁供应量，包括估算钢铁产品库存和钢铁产品寿命，结果表明到 2030 年废钢铁供应量将达到 3.22-3.46 亿吨/年。

上述估算与其他国际研究结果相一致，其中包括可行使命伙伴关系（MPP）、RMI 和国际能源署，这些机构估计到 2030 年中国的废钢铁供应量将达到 2.79-3.90 亿吨/年（Mission Possible Partnership, 2021 年；J. Chen, Li 和 Li, 2021 年；国际能源署，2020 年）。到 2050 年，该等研究预计中国的废钢铁供应量将进一步增至 4.00-6.00 亿吨/年（Mission Possible Partnership 2021 年；J. Chen, Li 和 Li, 2021 年；国际能源署，2020 年）。

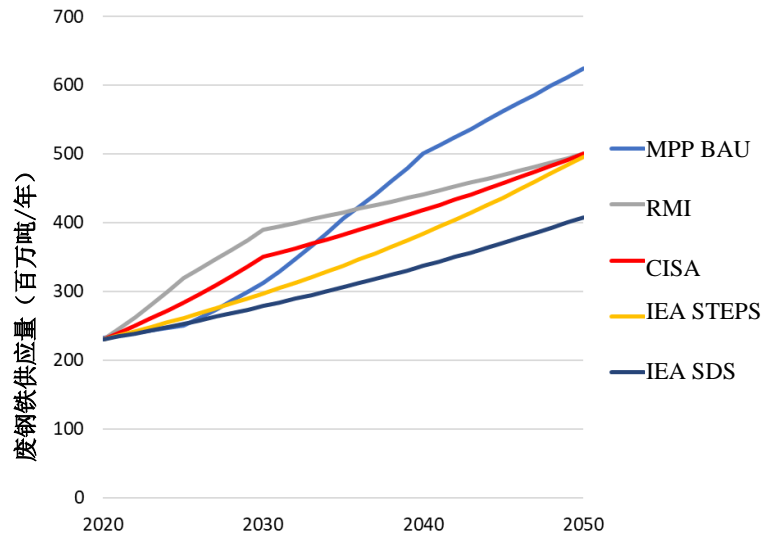


图 24：其他研究预测的中国钢铁行业废钢铁供应量前景（Mission Possible Partnership 2021; J. Chen, Li 和 Li, 2021 年; 国际能源署, 2020 年）。

备注：MPP=可行使命伙伴关系；BAU=“一切照旧如常”情景；CISA=中国钢铁工业协会；STEPS=Stated Policies Scenario；SDS=可持续发展情景；MIIT=中国工业和信息化部。

中国钢铁行业在提高废钢铁利用率方面面临多项挑战。首先，中国的电力成本和废钢铁价格很高，其降低了电弧炉炼钢的经济吸引力（《中国钢铁新闻》，2020 年）。自 2019 年 7 月 1 日起，中国将废钢铁列为禁止进口的固体废物之一。这限制了中国的废钢铁供应量。其次，中国的钢铁回收行业呈碎片化分布，同时还存在很多使用旧技术的小型低效回收设施（Xuan 和 Yue, 2016 年；Wübbecke 和 Heroth, 2014 年）。这会降低回收数量、效率和质量，导致废钢铁质量低下，并附有危险成分和污染物（Q. Zhao 和 Chen, 2011 年）。此外，中国的这些小型废钢铁回收设施在获得回收激励措施方面也存在一些挑战，例如难以获得退税，这间接增加了废钢铁的成本（D. Guo 和 Zhang, 2021 年）。最后，本研究发现在 2030 年之后，中国可能在全国范围内出现废钢铁供应高峰，但具体的废钢铁供应量因不同省份和地区而异。中国东部省份将在 2030 年左右出现废钢铁供过于求的情况，而中西部省份则在 2040 年后可能供应更多的废钢铁（Song 等人，2020 年）。

如果政府能够提供资金、技术和监管支持，则可改善当前的废钢铁供应体系，增加中国钢铁行业的废钢铁使用量。例如，政府可以考虑向废钢铁回收设施提供税收优惠（例如税收减免或退税），制定回收和管理标准，推广先进的回收技术以减少污染，允许进口废钢铁，以及向使用电弧炉炼钢的企业提供经济激励和/或差别电价。此外，政府还可以在全国和省级层面推行循环经济政策，例如废物本地化管理和跨省废钢资源循环。

6.4.2.直接还原铁（DRI）生产

目前，应用最广泛的直接还原（DR）工艺包括 MIDREX 和 HYL/Energiron，它们可替代高炉炼钢。这些工艺使用竖炉设备，并使用富氢气体（通常来自天然气）作为还原剂。如果将直接还原铁（DRI）与电弧炉结合起来进行炼钢，则相比高炉-转炉炼钢工艺，该工艺的二氧化碳排放量更低（Rechberger 等人，2020 年）。

氢基直接还原铁（H₂-DRI）生产

另一种进一步减少二氧化碳排放的替代途径是利用可再生能源产生的氢气（绿氢）作为生产直接还原铁（H₂-DRI）的能量来源和还原剂，采用这种工艺排放的废物是水，而非二氧化碳。

根据文献研究，氢基直接还原铁工艺的氢气需求量为 50-70 千克氢气/吨钢铁（Vogl 等人，2018 年）。目前，大部分氢气来自以化石燃料为主要原料的碳密集型工艺，例如天然气改质、甲烷部分氧化、甲烷改质，以及自动热气化或煤气化。以非化石燃料为原料的电解等工艺生产的氢气在全球氢气总产量的占比很小（Wang 等人，2021 年）。

目前，已有数个项目正在生产氢基直接还原铁，主要分布在欧洲。其中的几个主要项目如表 4 所示。

表 4：世界各地的氢基直接还原铁钢铁生产项目（SEI，2022 年）

公司名称	国家（项目/投资所在国家）	地点	项目规模	制氢类型	投产时间
SSAB	瑞典	吕勒奥	试点	绿色电解	2021
SSAB	瑞典	耶利瓦勒	示范	绿色电解	2026
安赛乐米塔尔	西班牙	希洪	全面展示 (full-scale)	绿色电解	2025
H2 Green Steel	瑞典	斯瓦特宾	全面展示 (full-scale)	暂不确定	2024
POSCO	韩国	暂不确定	全面展示 (full-scale)	暂不确定	暂不确定
LKAB	瑞典	基律纳、马姆贝杰、斯瓦帕瓦拉	全面展示 (full-scale)	绿色电解	2029
Fortescue Metals	澳大利亚	皮尔巴拉	全面展示 (full-scale)	绿色电解	2023
奥钢联	奥地利	多纳维茨	试点	暂不确定	2021
安赛乐米塔尔	法国	敦刻尔克	全面展示 (full-scale)	蓝氢	2021
安赛乐米塔尔	德国	艾森许滕施塔特	试点	绿色电解	2026
Tata Steel	荷兰	艾默伊登	全面展示 (full-scale)	暂不确定	2030

目前，中国开展的直接还原铁项目很少，并且其中大部分项目使用来自焦化或其他工业流程的富氢气体，具体如表 5 所示。例如，世界第七大钢铁生产企业河北钢铁集团（HBIS）于 2020 年与 Tenova 签订合同，使用浓缩焦炉煤气建设每年总产能达 60 万吨的直接还原铁工厂，该工厂使用氢浓度为 70% 气体作为还原原料（Tenova，2020 年；The International Energy Net，2021 年）。河北钢铁集团还计划建设二期直接还原铁工厂，年产能为 60 万吨，使用绿色氢气作为还原原料（The International Energy Net，2021 年）。宝武钢铁世界上最大的钢铁生产公司，它正在设在湛江的钢铁厂建设直接还原铁设施。该项目总投资额高达 18.9 亿元人民币（2.93 亿美元⁴），总产能为每年 100 万吨（NE21，2022 年）。

⁴ 本研究使用的汇率是 2021 年平均汇率，即 1 美元 = 6.45 人民币。资料来源：<https://www.macrotrends.net/2575/us-dollar-yuan-exchange-rate-historical-chart>

表 5：中国直接还原铁生产项目

项目名称	应用领域	钢铁公司名称	产能	项目状态	公司钢铁路线图
示范项目	焦炉煤气合成气直接还原铁，以及（将来实施）绿氢直接还原铁	河北钢铁集团（HBIS）	分两个阶段实施，每年生产 120 万吨钢铁。	计划到 2021 年第一阶段投产	承诺到 2022 年达到碳峰值，到 2050 年实现碳中和
零碳排放炼钢试点	氢基直接还原铁，以及工业规模生产氢气和焦炉煤气	宝武钢铁（湛江钢铁）	每年生产 100 万吨钢铁。	计划 2023 年底竣工	承诺到 2023 年达到碳峰值，到 2050 年实现碳中和
氢能冶金项目	工业副产品合成气直接还原铁	日照钢铁	每年生产 50 万吨直接还原铁	2020 年 5 月投产	不适用
建龙-内蒙古赛思普公司氢基直接还原铁项目	焦炉煤气合成气直接还原铁	建龙钢铁	每年生产 30 万吨钢铁	2021 年完成试点项目，产能 156 吨	承诺到 2025 年达到碳峰值，到 2060 年实现碳中和
绿氢零碳排放流化床	氢基流化床试点项目	鞍钢钢铁	每年生产 1 万多吨钢铁	计划 2023 年投入运营	承诺到 2025 年达到碳峰值，成为首批实现碳中和的公司之一
氢冶金研究院	氢能冶金应用项目	酒泉钢铁	研究机构-不从事钢铁生产，不适用	成立于 2019 年 9 月	不适用
低碳氢冶金研究院	氢能与低碳冶金研发	宝钢钢铁	研究机构-不从事钢铁生产，不适用	成立于 2021 年 7 月	承诺到 2023 年达到碳峰值，到 2050 年实现碳中和

山东省民营钢铁企业日照钢铁于 2020 年启动氢冶金项目。该项目使用了工业副产品合成气（以天然气为原料生产醋酸乙烯酯），目标是每年生产 50 万吨直接还原铁（Zhong, 2020 年）。

中国第五大民营钢铁公司建龙钢铁投资 10.9 亿元人民币（1.69 亿美元）建设直接还原铁项目，每年总产能高达 30 万吨。该项目所用氢气来自焦炉煤气。截至 2021 年 4 月，建龙钢铁已生产出首批 156 吨直接还原铁（CSteel News, 2021 年）。

除了直接还原铁试点项目外，宝武钢铁、酒钢宏兴、鞍钢和包钢等中国钢铁公司还设立研究院和/或达成联合协议，专注于氢冶金创新和技术的研发。

6.4.3.高炉中喷吹富氢气体

从全球来看，日本、德国、瑞典和中国等国家已开展相关试验，在高炉中喷吹富氢气体。在日本，根据 Cool Earth 50（COURSE50）项目中的二氧化碳终极还原系统，将副产品氢气（焦炉煤气）注入试验高炉（日本钢铁联合会，2021 年 b）。据报告，2021 年该等试验高炉能够使二氧化碳排放量减少 10%（日本钢铁联合会，2021 年 a）。

在日本钢铁联合会于 2020 年发起的 Super COURSE50 项目中，日本钢铁企业使用从外部购买的氢气，以进一步增加高炉氢气的使用量（日本钢铁联合会，2021 年 c）。

根据 COURSE50 项目，还在瑞典吕勒奥安装试验高炉（EBF）以开展实验，其中使用焦炉煤气（COG）和改质焦炉煤气。该等试验高炉（EBF）归瑞典矿业公司 LKAB 所有。试验结果表明，受限于可供应的焦炉煤气量，二氧化碳排放量仅减少 3%（Nishioka 等人，2016 年）。

蒂森克虏伯在德国杜伊斯堡安装的“9 号高炉”28 个风口之一中注入氢气，完成了第一阶段试验。注入的氢气来自液化空气，通过卡车运送，并已达到每小时 1000 立方米的设计量。蒂森克虏伯预计将于 2022 年启动该项目的第二阶段，并计划将相关测试扩大至所有 28 个风口。该项目还有望通过管道接收氢气（Thyssenkrupp，2021 年）。蒂森克虏伯最近承诺到 2025 年使用直接还原铁工厂和埋弧炉（SAF）取代已建高炉，以便在该工艺中使用高炉级别铁矿石。直接还原铁将首先在埋弧炉中熔化，然后将其投入蒂森克虏伯现有的转炉进行炼钢。安赛乐米塔尔也计划实施类似的直接还原铁-埋弧炉项目（Nicholas 和 Basirat，2022 年）。

中国钢铁企业也有意在高炉中应用富氢气体，以减少焦炭消耗，从而降低二氧化碳排放。2017 年初，位于河北省的邢台钢铁公司与中国钢铁研究总院合作开展富氢炼铁技术试点。富氢气体来自现场产生的焦炉煤气（邢台钢铁公司，2017 年）。

2020 年 10 月，作为全球最大的钢铁企业，宝武钢铁启动富氢碳循环高炉项目。据悉，该项目已完成第一期和第二期试验，达到利用富氢气体（合成气中的含氢量为 50%）生产钢铁的目标，并已实现将二氧化碳强度降低 15% 的减排目标（Wang，2022 年）。目前，该项目正处于第三阶段，旨在将高炉工艺中的二氧化碳排放强度降低 30%。

山西晋南钢铁与中国钢铁研究总院进行合作，于 2021 年 4 月对其两座高炉实施注氢操作。每座高炉容积为 1860 立方米。该项目是中国国内首次对大型高炉开展连续性工业试验。据悉，该项目中每生产一吨钢铁，能够使焦炭使用量减少 6.5 公斤，煤炭使用量减少 29.5 公斤（中国宝武新闻，2022 年）。

表 6 概述了世界范围内已完成和实施中的有关向高炉注入富氢气体的试点项目。

表 6: 高炉氢气应用试点项目

项目名称	氢能应用	钢铁公司/联合体名称	国家	项目状态
COURSE50	高炉喷吹焦炉煤气 (COG)	日本钢铁联合会 (JISF)	日本	2021 年已完成试验; 达到二氧化碳减排 10% 的目标
COURSE50	高炉喷吹焦炉煤气	LKAB 和 JISF	瑞典	2012 年已完成试验; 达到二氧化碳减排 3% 的目标
Super COURSE50	高炉喷吹外购氢气	日本钢铁联合会	日本	2020 年启动
H2Stahl 项目	高炉喷吹外购氢气 (卡车运输)	蒂森克虏伯	德国	2019 年开始测试; 现已完成第一阶段。
H2Stahl 项目	高炉喷吹外购氢气 (管道运输)	蒂森克虏伯	德国	计划 2022 年启动
低碳富氢炼铁	高炉喷吹焦炉煤气	邢台钢铁	中国	2017 年启动
高炉富氢碳循环	高炉喷吹焦炉煤气	宝武钢铁 (八一钢铁)	中国	从 2020 年启动, 已实现到 2021 年二氧化碳减排 15% 的目标
高炉喷吹氢气	高炉喷吹外购氢气	山西晋南钢铁厂	中国	2021 年启动; 实现二氧化碳减排 10%

资料来源: (日本钢铁联合会, 2021 年 a; 2021 年 b; Nishioka 等人, 2016 年; thyssenkrupp, 2021 年; 邢台钢铁公司, 2017 年; Wang, 2022 年; 中国宝武新闻, 2022 年)。

6.4.4. 中国钢铁行业的氢气需求

如前所述, 就高炉-转炉以及氢基直接还原铁的钢铁生产工艺而言, 在生产过程中需要耗费大量的氢气。图 25 显示了在不同情景下中国钢铁行业的氢气总需求。在净零碳排放情景下, 到 2030 年, 中国钢铁行业需要 60 万吨氢气。在这种情景下, 到 2040 年, 氢气需求将增加到 500 万吨左右, 到 2050 年, 相关需求将增加到 600 万吨。

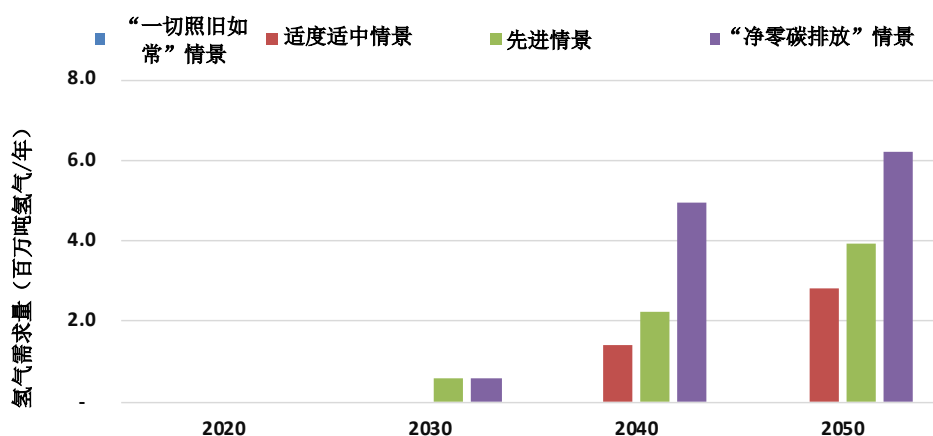


图 25: 不同情景下中国钢铁行业的额外氢气总需求 (资料来源: 本研究)

在我们的分析中, 假设中国钢铁行业将使用绿氢作为还原原料。使用绿氢能够减少二氧化碳排放, 但会相应地增加电力需求。图 26 显示了不同情景下中国钢铁行业绿色制氢的每年额外用电量。在净零碳排放情景下, 为了满足中国钢铁行业需求, 需要

生产额外数量的氢气，这将导致电力消耗到 2030 年、2040 年和 2050 年分别增加 32TWh/年、272TWh/年和 342TWh/年。在此情景下，这意味着中国到 2030 年、2040 年和 2050 年的电力负荷需求将分别增加 13 吉瓦、113 吉瓦和 143 吉瓦（参见图 27）。

相比之下，2021 年中国的发电量约为 2380 吉瓦。此外，2021 年中国可再生能源发电年装机容量达到 1200 吉瓦。仅在 2021 年，中国就新增 120 吉瓦的可再生能源装机容量（US EIA，2022 年）。在估算这些额外负荷时，我们假设所有额外负荷都来自清洁可再生能源。

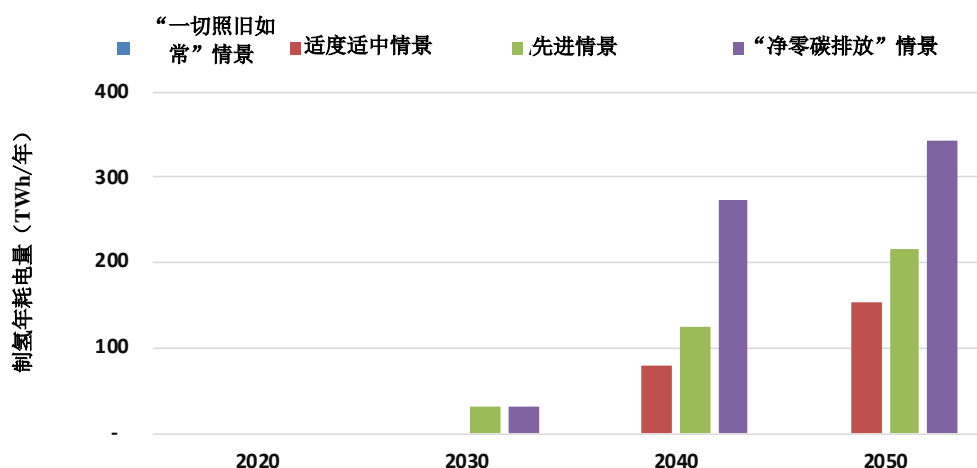


图 26: 在不同情景下中国钢铁行业绿色制氢的每年额外用电量（资料来源：本研究）

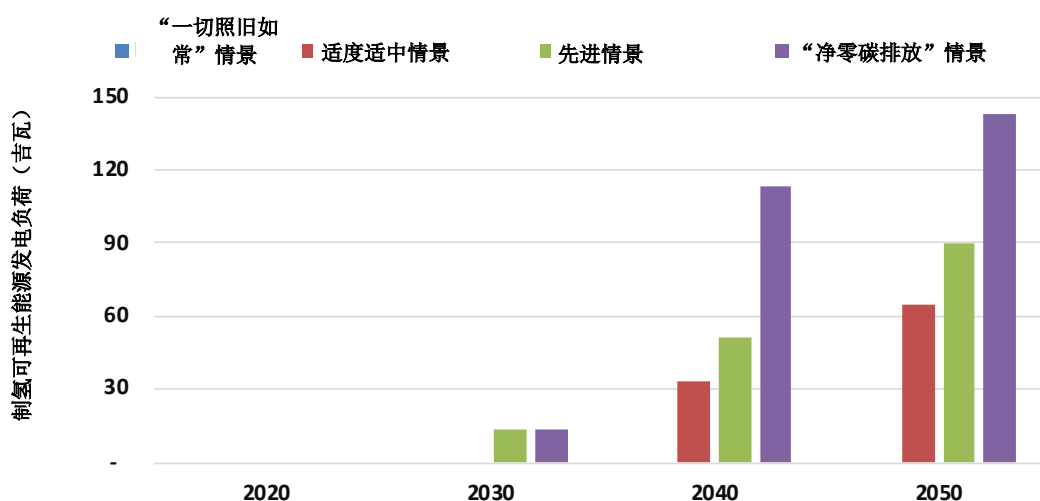


图 27: 在不同情景下中国钢铁行业绿色制氢所需的额外可再生能源发电量（资料来源：本研究）

除了投资于可再生能源发电和配电外，还需要投入大量资本以显著提高中国的氢气产能。图 28 显示了我们在不同情景下估算的中国钢铁行业 100 兆瓦制氢电解槽的数量。本报告稍后将讨论中国的制氢现状以及相关政策和计划。

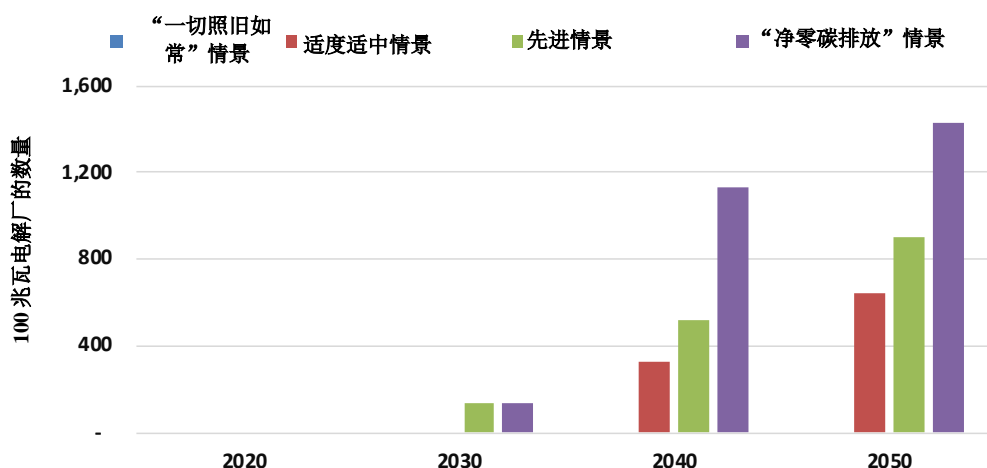


图 28：在不同情景下中国钢铁行业 100 兆瓦制氢电解槽的数量（资料来源：本研究）

如果在钢铁行业中使用绿氢，同时电网实现脱碳，则可减少二氧化碳排放，但是，基础设施状况以及对可再生电力资源的竞争需求将使中国在实现减排的过程中面临挑战。如果中国投资电网建设，并增加可再生能源在电力部门能源结构中的份额，将有助于加速绿氢的使用，并减少二氧化碳排放。

电网是一个相互关联的复杂系统，它将发电资源与具有不同和可变电力需求的客户联结起来。随着时间的推移，中国可再生资源发电量已取得大幅增长，但中国电网的碳排放强度仍然很高。

管理电网的资源、基础设施和能量流动是一项艰巨任务，随着发电资源和可再生资源越来越呈分散化，管理工作将变得愈加复杂。为了实现减排，交通、建筑和工业等多个行业开始转向电气化，并使用可再生资源，这使中国本已紧张的电网系统将进一步承压。为了实现电气化产业的规模发展，需要进行投资，以建设或者升级关键基础设施，包括可再生能源发电、电力传输、配电网络以及最终用户基础设施。

为了加快电力行业脱碳，在该行业制定一贯战略至关重要，这也是在工业生产中使用绿氢的先决条件。公用事业、政策制定者、行业及其他利益相关者应当关注可再生电力需求的潜在增长，以及各行各业对更多可再生能源发电、额外储能、需求响应计划、扩建输配电系统和电网现代化的相关需求。为了使中国工业能够实现平稳的能源转型、各个部门快速实现电气化，以及受益于绿色氢能，确保提供足够的可再生资源并将其与需求中心相联结至关重要。

6.4.4. 中国的氢气生产

中国在氢基直接还原铁生产领域面临的障碍是以经济实惠的价格大规模生产低碳氢气。中国需要加大力度设计相关解决方案，从而以低成本生产绿氢以及安全运输和储存氢气。

中国目前的氢气生产情况

中国目前的氢气年产量约为 3,300 万吨，是世界上最大的氢气生产国（Bai, 2022 年）。根据中国国家氢气质量标准（GB/T3634.1-2006），工业级（氢气纯度>99%）氢气产量约为 1,200 万吨（CNIS, 2020 年）。

中国目前的氢气生产严重依赖化石燃料，其中主要是煤炭。中国 62% 以上的氢气来自煤炭或煤炭产品，可再生（或绿色）氢气仅占 1-3%（H2weilai, 2021 年）。天然气制氢占比为 19%。这与全球氢气生产所用燃料组合截然不同，从全球来看，2018 年使用天然气并通过甲烷水蒸气重整工艺生产的氢气占总产量的 76%（国际能源署，2019 年）。

中国目前的大多数氢气生产商都来自重工业和能源行业。在中国氢气总产量中，约有 2,100 万吨氢气来自工业部门的专门制氢工艺，例如氨生产、炼油、甲醇生产以及其他化学和金属生产工艺（参见图 29）。这些工艺生产的氢气纯度很高，只有少量其他添加剂或污染物。在中国氢气总产量中，剩余的 1,200 万吨氢气来自工业副产品，通常属于氢气和其他气体（合成气）的混合物，主要来自钢铁工业、氯碱工业和其他化学流程（Deng 等人，2010 年；Verheul, 2019 年）。

焦化工艺流程是指将煤炭在无氧条件下加热生产出焦炭，这是初次炼钢的关键流程。通过焦化工艺流程，不仅在高炉中生产出炼铁用的还原剂，还生产出副产品焦炉煤气。一般来说，1 吨焦炭约可产生 400-426 立方米的焦炉煤气，其中主要含有氢气（54-69%）、甲烷（23-28%）、一氧化碳（5.5-7%）、二氧化碳（1.2-2.5%），以及其他不饱和烃（Deng 等人，2010 年；China EV100, 2020 年）。根据中国目前的焦炭生产水平，我们估计中国钢铁行业从焦化工艺流程大约能生产 600-700 万吨氢气，具体如图 30 所示。

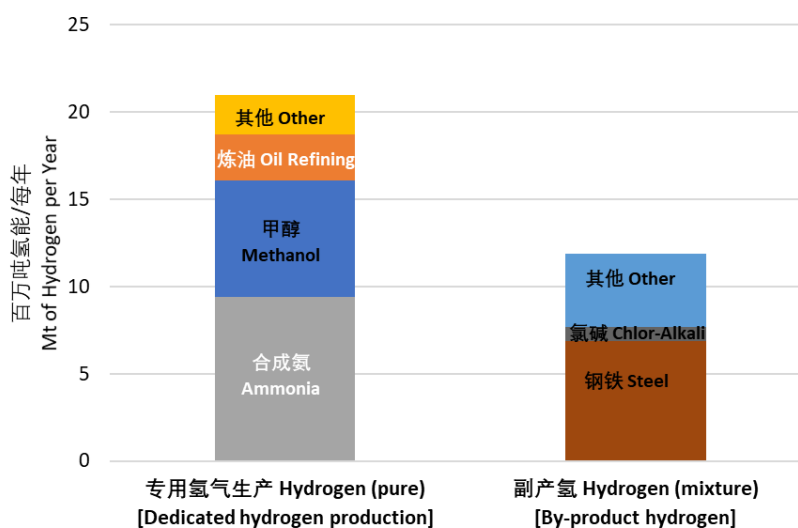


图 29：2018 年中国氢气生产量。

备注 1：焦炉煤气（COG）是焦化工艺的副产品，氢气（H₂）在其中的占比相对较大。但是，大多数焦炉煤气经燃烧后用于产生热力和电力。未来几年和几十年内，中国的高炉-转炉炼钢所占份额将大幅下降，焦炭需求量随之减少，焦炉煤气量也将大幅下降。因此，从焦炉煤气回收和纯化氢气已没有多大意义。

备注 2：其他来源包括：其他化学工艺流程、金属生产、电子、食品加工、制药、玻璃制造、实验室研究和航空航天

中国氢能产业发展规划

2022 年 3 月，中国发布了首个《氢能产业发展中长期规划（2021-2035 年）》（国家发改委和 NEA，2022 年）。该规划明确规定，氢能将成为中国能源供应体系的一部分，并强调氢能生产、储存、运输和利用的整个“供应链”协调发展，特别是在交通和工业领域。中国政府认为氢能将在提供清洁低碳能源方面发挥关键作用，并将氢能产业视为结构升级和经济增长的战略产业。根据该规划，到 2025 年，中国将基本掌握核心技术和生产工艺，燃料电池车辆保有量达到 5 万辆，部署一批加氢站，可再生能源制氢量达到 10-20 万吨/年。中国政府的目标是到 2030 年形成完备的氢能产业技术创新体系、清洁能源制氢及供应体系，以支撑中国碳达峰目标的实现。到 2035 年，政府希望形成氢能多元应用生态，可再生能源制氢的份额获得显著提升（NDRC 和 NEA，2022 年）。

根据中国行业组织氢能联盟的信息，到 2030 年，中国氢气需求量将达到 3500 万吨，为了满足这一需求，需要消耗中国最终能源的 5% 左右（中国氢能联盟，2019 年）。到 2050 年，这一比例将增加到 10%。到 2060 年，中国氢气总需求量将增加到 6,000 吨，其中工业部门消耗 3,400 吨，主要来自钢铁行业（中国氢能联盟，2019）。

中国正在建设世界上规模最大的氢气生产设施。经我们确认，截至 2022 年 7 月，中国已经开发或正在开发的制氢项目共达 40 个（参见图 30）。许多项目已于 2020 年或 2021 年开工建设，预计将于 2022 年底或 2023 年开始投入运营。大多数项目（34 个）通过太阳光伏、太阳热能、风能或者组合式可再生能源生产氢气。其他少数项目依靠水力发电生产氢气。在这 40 个项目中，有 4 个项目使用焦炉煤气、天然气或工业副产品生产氢气。

中国最大的制氢项目之一是位于新疆库车的光伏绿氢项目。该项目于 2021 年 11 月 30 日启动，总产能为 2 万吨/年。该项目总投资 30 亿元人民币（4.65 亿美元⁵），包括光伏发电、输配电、电解水制氢、氢气存储和氢气运输。该项目预计将于 2023 年 6 月

⁵根据 2021 年美元兑人民币（RMB）的平均汇率，1 美元=6.45 元人民币。<https://www.macrotrends.net/2575/us-dollar-yuan-exchange-rate-historical-chart>

投入运营，生产的绿色氢气将用于中石化塔河炼化分公司，以减少目前的天然气消耗量（新华网，2021年）。

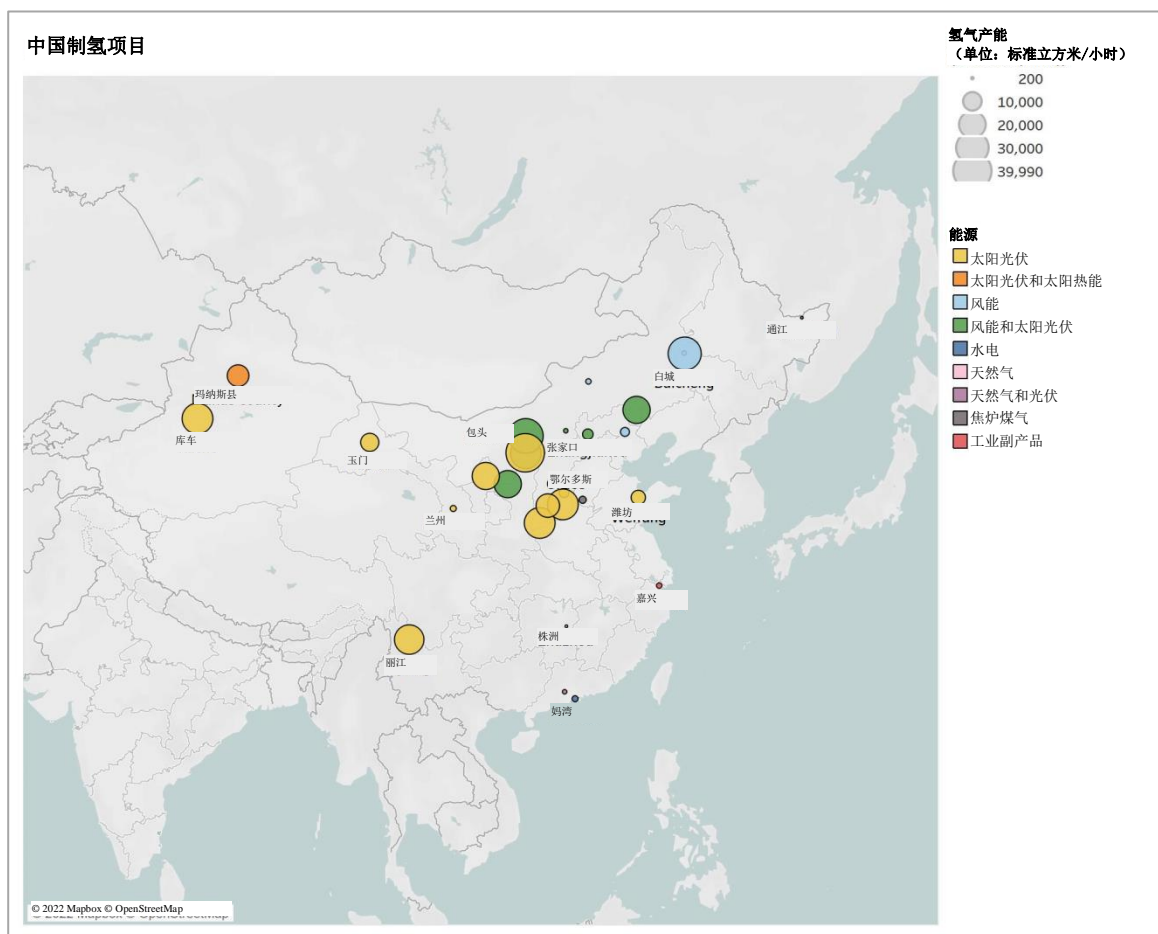


图 30：中国氢能项目（基于各种资料来源）

内蒙古的太阳能和风能资源丰富，因此中国约 40%的规划氢气产能和正在实施的氢气产能都集中在该省（表 7）。另有 30%的氢气产能位于山西和新疆。现阶段，沿海地区（例如广东、浙江等省）氢气产能开发规模很小。

表 7：中国各省份公布的氢气产能（基于各种资料来源）

Province/ Autonomous Region	Announced Hydrogen Production Capacity Nm ³ /hour	Share of Total (as of July 2022)
Inner Mongolia	139,625	40%
Shanxi	67,500	19%
Xinjiang	38,300	11%
Jilin	30,700	9%
Yunnan	23,500	7%
Ningxia	20,000	6%
Gansu	9,960	3%
Hebei	6,600	2%
Sichuan	6,000	2%
Shandong	5,600	2%
Guangdong	1,550	0.4%
Zhejiang	800	0.2%
Total	350,000	100

中国发展氢能的选址与中国发展清洁能源基地的规划非常吻合。“十四五”期间内，中央政府确定了九个陆上清洁能源基地（具体如图 31 所示），其中包括松辽清洁能源基地（黑龙江、吉林、辽宁）、冀北清洁能源基地（河北北部）、黄河几字弯清洁能源基地（宁夏、内蒙）、河西走廊清洁能源基地（甘肃）、黄河上游清洁能源基地（青海）、金沙江上游清洁能源基地（四川）、雅砻江清洁能源基地（贵州）、金沙江下游清洁能源基地（云南）。此外，沿海地区的氢能发展也符合中央政府在广东、福建、浙江、江苏和山东等地发展海上风电基地的规划。

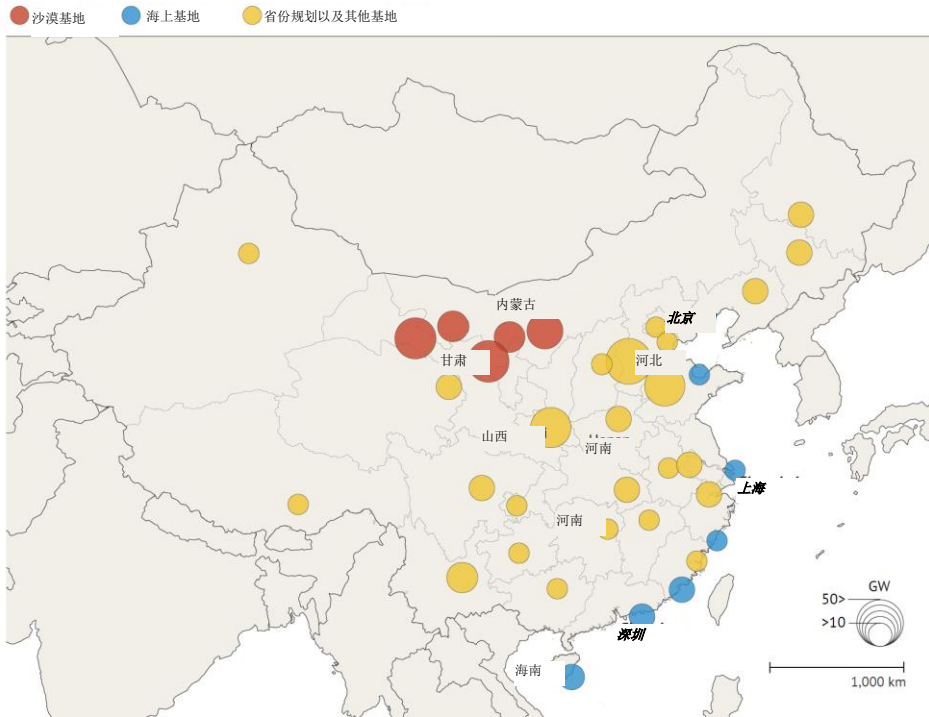


图 31: 中国清洁能源生产基地 (Myllyvirta、Zhang 和 Prater, 2022 年)

中国还正在推进电解槽的投资和建造项目。根据国际能源署 (IEA) 的数据, 中国占全球电解槽总量 (295 兆瓦) 的 8%, 占全球电解槽设备和部件总制造能力的 35% (国际能源署, 2021 年)。作为一个国家支持的行业组织, 中国氢能联盟呼吁到 2030 年可再生氢气产量达到 100 吉瓦 (Argus, 2021 年)。图 32 显示了中国钢铁厂和制氢项目的部署地点。

中国的钢铁厂和制氢项目



图 32：中国钢铁厂和制氢项目的部署地点（资料来源：Global Energy Monitor 以及作者分析。）

中国的氢气生产成本

如表 8 所示，中国的绿氢生产成本通常约为 20-40 元人民币（3.1-6.2 美元）/公斤，但也可能达到更高水平，约为 48.5 元人民币（7.5 美元）/公斤（X. Zhao, 2022 年；中国氢能联盟，2020 年；W. Chen, 2021 年）。在中国，使用煤炭生产氢气的成本约为 6-12 元人民币（1-1.9 美元）/公斤（W. Chen, 2021 年）；使用工业副产品生产氢气的成本为 10-27 元人民币（1.6-4.2 美元）/公斤（中国氢能联盟，2020 年；W. Chen, 2021 年）。

根据中国的多项研究（参见表 8），预计到 2025 年，绿氢生产成本将下降到 25 元人民币（3.9 美元）/公斤（中国氢能联盟，2021 年）。到 2030 年，绿氢生产成本预计将达到 15-22 元人民币（2.3-3.5 美元）/公斤，并会进一步下降到 10 元人民币（1.5 美元）/公斤以下（中国氢能联盟 2021 年；W. Chen, 2021 年）。

表 8：中国的氢气生产成本

年度	绿氢		煤制氢气		来自工业副产品的氢气		资料来源
	元人民币/公斤	美元/公斤	元人民币/公斤	美元/公斤	元人民币/公斤	美元/公斤	
2020	¥20-30	\$3.1-6.2	¥7-9	\$1.1-1.4			(X. Zhao, 2022 年)
2020	¥30-40	\$4.7-6.2	¥8.85	\$1.40	¥10-16	\$1.6-2.5	(中国氢能联盟, 2020 年)
2020	¥9.2-48.5	\$1.4-7.5	¥6-12	\$0.9-1.9	¥14.6-26.9	\$2.3-4.2	(W. Chen, 2021 年)
2025	¥25	\$3.90	-	-	-	-	(中国氢能联盟, 2021 年)
2030	¥15	\$2.30	-	-	-	-	(中国氢能联盟, 2021 年)
2030	¥21.56	\$3.30	¥13.33	\$2.10	-	-	(W. Chen, 2021 年)
2040	¥14.46	\$2.20	¥15.63	\$2.40	-	-	(W. Chen, 2021 年)
2050	¥<10	\$<1.6	-	-	-	-	(中国氢能联盟, 2020 年)
2050	¥9.7	\$1.50	¥18.32	\$2.80	-	-	(W. Chen, 2021 年)

6.5.碳捕获、利用和封存

各种钢铁生产路线均可使用碳捕获、利用和封存（CCUS）达到脱碳目标，例如高炉炉顶煤气循环利用 CCUS、直接还原铁燃烧后 CCUS 和富氧熔融还原 CCUS 等。这些碳捕获、利用和封存技术的商业化状况差异很大，目前大多数处于试点阶段。碳捕获、利用和封存技术面临的主要挑战是进一步降低成本，提高运营效率，以及建设合适的二氧化碳运输系统和封存场所。从钢铁生产中捕获的二氧化碳可以永久储存在地下（取决于地质情况），或者用于生产化学品、燃料、建筑材料等。

在我们的分析中，针对中国钢铁行业的高炉-转炉炼钢和传统直接还原铁工厂，假设在各种情景下以不同比率采用碳捕获、利用和封存技术。需要注意的是，燃烧后碳捕获技术的效率最高可达 95%，但由于钢铁厂所采用的工艺结构以及不同的碳排放点，包括碳捕获过程中发生的泄漏，导致钢铁厂很难达到最高捕获效率。图 33 显示了中国钢铁行业采用碳捕获、利用与封存技术捕获的二氧化碳排放量。

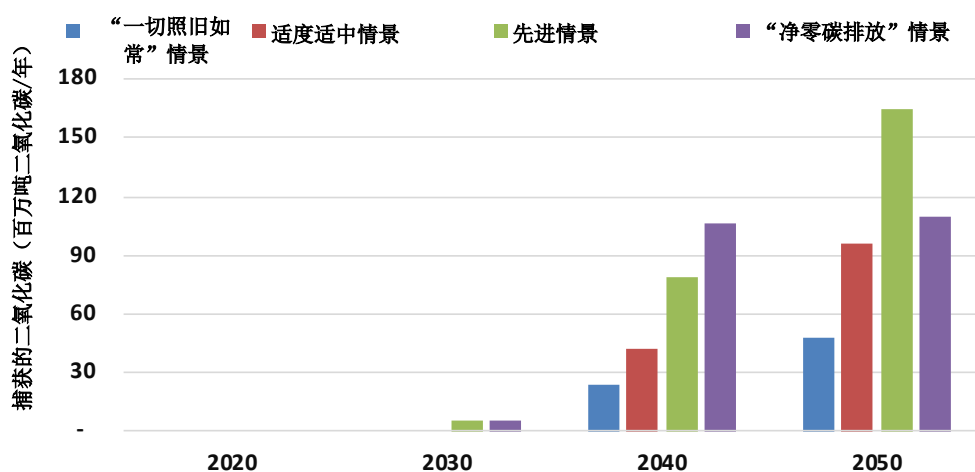


图 33：中国钢铁行业采用碳捕获、利用和封存技术捕获的二氧化碳排放量（在采用其他脱碳技术之后，再采用碳捕获、利用与封存技术）（资料来源：本研究）。

全球钢铁行业采用碳捕获、利用和封存技术的状况

从全球来说，阿联酋钢铁公司在阿拉伯联合酋长国姆萨法（Mussafah）开展的 Al Reyadah 项目是目前唯一实现商业化运营的钢铁业碳捕获项目。该项目的种子资本高达 150 亿美元，是阿布扎比未来能源公司（Masdar）和阿布扎比国家石油公司（ANDOC）共同开展的合资项目（MIT，2016 年）。该项目使用传统的单乙醇胺（MEA）吸收和回收系统，从直接还原铁工厂捕获排放的二氧化碳（Zahra，2015 年）。然后，对富含二氧化碳的废物流进行脱水、压缩，并通过管道输送 43 公里，以用于陆上油田强化采油（EOR）（“苏格兰碳捕捉与封存”，2022 年）。该项目自 2016 年开始运营，每年可捕获 80 万吨二氧化碳（ADNOC，2017 年）。

目前还在开展其他试点项目，以测试从钢铁制造流程中捕获二氧化碳的技术。日本（例如新日铁公司）和欧洲（例如安赛乐米塔尔和瑞典钢铁集团）的公司正在测试从高炉捕获二氧化碳的技术。这些碳捕获项目仍处于试点阶段，二氧化碳捕获能力很低，每天捕获 6 吨到 14 吨不等。

在二氧化碳封存方面，新日铁与 deepC Store 签署了一项联合研究协议，以评估捕获和运输液化二氧化碳的商业可行性。新日铁将供应二氧化碳，然后运往澳大利亚近海的二氧化碳浮式封存和注入（FSI）枢纽设施，最后注入 FSI 设施附近的地下层（新日铁，2022 年）。

钢铁公司还在探索将二氧化碳转化为化学品、塑料和燃料等产品的技术。例如，安赛乐米塔尔正在与 Lanza Tech 合作，以工业规模应用碳捕获和利用技术。该项目（即所谓的 Steelanol 项目）将使用钢铁厂（位于比利时根特）排放的富碳废气生产乙醇（ArcelorMittal，2021 年）。该项目预计 2022 年底投入运营，年产 8,000 万升乙醇，并将与汽油进行混合以用作运输燃料。安赛乐米塔尔预计该项目每年可减少二氧化碳排放量 125,000 吨（ArcelorMittal，2021 年）。

在德国，蒂森克虏伯联合 16 个合作伙伴启动了 Carbon2Chem 项目。在德国教育和研究部的资助下，2016 年开始启动该项目。到 2018 年，蒂森克虏伯已在其试点工厂利用炉顶煤气中的二氧化碳生产氨、甲醇和酒精（Thyssenkrupp，2020 年）。该项目目前处于第二阶段，并将利用其他行业排放的二氧化碳生产化学品，例如水泥和石灰生产厂以及垃圾焚烧厂（Thyssenkrupp，2020 年）。下表列有国际（不包括中国）钢铁行业现有的碳捕获、利用与封存项目清单。

图 9：全球钢铁行业碳捕获、利用与封存项目

项目名称	项目类型	二氧化碳捕获能力	钢铁公司名称	国家	项目状态
Al Reyadah	二氧化碳捕获和强化采油	单乙醇胺（MEA）吸附；每年 800,000 吨（21,918 吨/天）	阿联酋钢铁公司	阿联酋	商业运营（2016 年开始运营）
COURSE 50 在炼钢工艺流程中使用创新技术以最终减少二氧化碳排放	二氧化碳捕获	化学吸附；30 吨/天 物理吸附；6 吨/天	君津铁工所 福山铁工所	日本	试验和试点
DMX™示范项目	二氧化碳捕获	12 吨/天	安赛乐米塔尔	法国敦刻尔克	试点中（2022 年开始运营）
有关 SEWGS 技术的 STEPWISE 试点	二氧化碳捕获	固体吸附；14 吨/天	SSAB	瑞典吕勒奥	试点中（2017 年开始运营）
Steelanol 项目	二氧化碳捕获和利用	125,000 吨二氧化碳/年	安赛乐米塔尔（联合 LanzaTech 公司）	比利时根特	试点中（预计到 2022 年底投入运营）
Carbon2Chem 项目	二氧化碳捕获和利用	目标是到 2030 年减少 30% 的二氧化碳排放	蒂森克虏伯	德国杜伊斯堡	试点中（2016 年启动，到 2024 年获得资助）
海上二氧化碳封存	二氧化碳运输和封存	100-150 万吨液态碳	新日铁	日本/澳大利亚	可行性研究

资料来源：（全球碳捕捉与封存研究院，2022 年；新日铁，2022 年；安赛乐米塔尔，2021 年；蒂森克虏伯，2020 年）

中国钢铁行业采用碳捕获、利用和封存技术的状况

根据与数位中国钢铁专家进行的个人交流，相比二氧化碳封存，中国钢铁行业似乎更希望对二氧化碳加以利用。在炼钢工艺流程中，可以在高炉、转炉、电弧炉、连铸等工序中使用二氧化碳进行搅拌、控制温度、屏蔽、稀释等。

中国首钢京唐公司在转炉脱磷工艺中利用二氧化碳（顶吹二氧化碳）来控制反应温度，为脱磷工艺创造有利条件（K. Dong 和 Wang，2019 年）。与氩气（成本较高）和氮气（可能带来危害）等替代品相比，转炉中底吹二氧化碳的做法更为优越。作为河北省碳捕获、利用与封存试点项目之一，首钢京唐将开展试点（河北政府，2021 年）。据估计，该项目每年将捕获总计 5 万吨二氧化碳。

德龙钢铁也将开展碳捕获和利用项目试点，每年将捕获 14 万吨二氧化碳。该项目将捕获高炉热风炉产生的废气，并利用二氧化碳生产纳米碳酸钙（河北政府，2021 年）。

包钢集团正与哥伦比亚大学展开合作，以利用具有固碳能力的钢渣。通过化学工艺流程，可以将钢渣转化为有价值材料，并将该等材料应用于各个行业，同时，还可以通过此类工艺利用排放的二氧化碳。该项目始于 2015 年，是六个中美生态合作项目之一。根据该示范项目，每年可利用 42.4 万吨钢渣，每年封存的二氧化碳达到 10 万吨（科技部，2021 年）。

2022 年 6 月起，包钢集团开始建设碳捕获、利用与封存示范项目，目标为每年总计捕获 200 万吨二氧化碳。该项目的第一阶段将从工业废气中捕获 50 万吨二氧化碳。捕获的部分二氧化碳将通过管道进行输送，并作为投料用于钢渣资源化利用，其他二氧化碳经过压缩和液化后，通过卡车运输到附近油气田用于强化采油（包头钢铁，2022 年）。

中国钢铁行业开展了一项关于二氧化碳捕获和封存的可行性研究。首钢京唐公司与东芝、同方环境和全球碳捕捉与封存研究院进行合作，研究了采用燃烧后 CCS 技术以及在附近油田使用二氧化碳进行强化采油的可行性（东芝国际公司和同方环境，2015 年）。表 10 概述了迄今为止中国钢铁行业的碳捕获、利用与封存项目。

图 10：中国钢铁行业的碳捕获、利用与封存项目

项目名称	项目类型	二氧化碳捕获能力	钢铁公司名称	国家	项目状态
曹妃甸项目	二氧化碳捕获和强化采油	300 吨二氧化碳/天	首钢钢铁	中国	2015 年可行性研究
顶吹二氧化碳	二氧化碳利用	不适用	首钢京唐公司	中国	试点中
底吹二氧化碳	二氧化碳捕获和利用	5 万吨二氧化碳/年	首钢钢铁	中国	2022 年省级试点项目
二氧化碳利用	二氧化碳捕获和利用	14 万吨二氧化碳/年	德龙钢铁	中国	2022 年省级试点项目
钢渣利用与二氧化碳强化采油	二氧化碳利用	50 万吨二氧化碳/年（第一阶段），总捕获能力为 200 万吨二氧化碳/年	包钢集团	中国	2022 年 7 月启动示范

资料来源：（科技部，2021 年；首钢公司，2022 年；K. Dong 和 Wang，2019 年；东芝国际公司和同方环境，2015 年）

中国钢铁行业的碳捕获、利用与封存潜力

在理论上，中国拥有巨大的二氧化碳封存能力。Dahowski 等人（2009 年）估计，中国陆上盆地的二氧化碳封存潜力为 2.3 万亿吨，在相对较近的近海盆地还可封存 7800 亿吨二氧化碳。（Cai, Li 和 Zhang，2022 年）据估计，中国的二氧化碳封存能力在 1.21-4.13 万亿吨之间。

如图 34 所示，在预估的封存容量中，超过 99%位于深水成盐沉积盆地，包括 16 个陆上盆地和 9 个近海盆地。陆上封存量最大的三个盆地是松辽盆地、塔里木盆地和渤海湾盆地，它们占封存总量的一半以上。此外，苏北盆地和鄂尔多斯盆地也具有巨大的封存潜力（Cai, Li 和 Zhang, 2022 年）。据估计，枯竭的气田、油田和煤层中的二氧化碳封存容量要小得多。

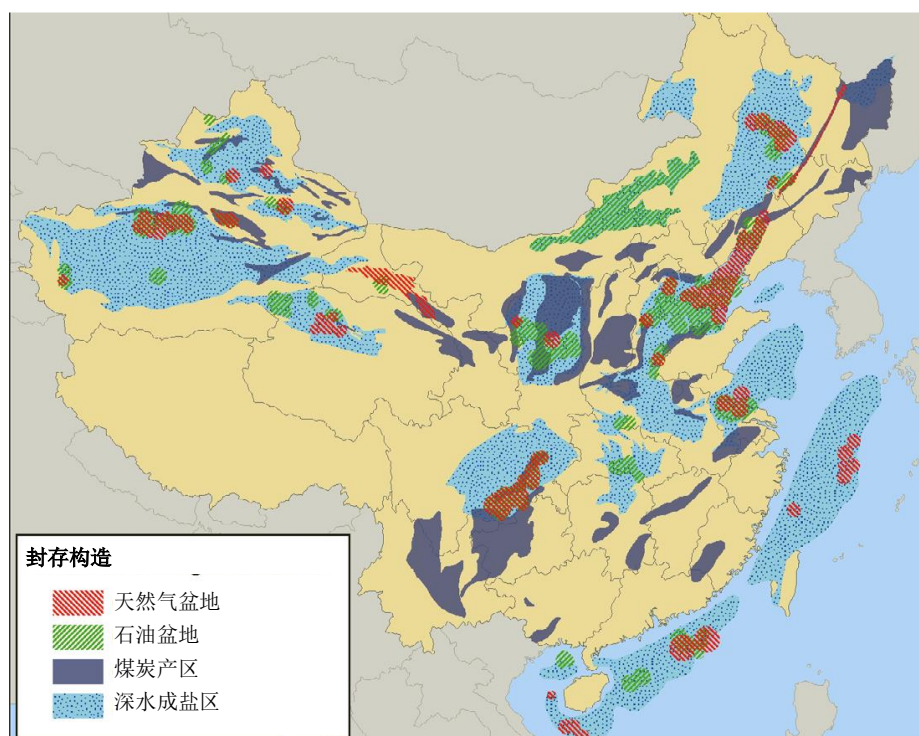


图 34：中国二氧化碳封存地质构造（Dahowski 等人，2009 年）

中国的钢铁厂大多分布在河北、辽宁、山西、内蒙古等铁矿石和煤炭资源丰富的省份，此外还分布在钢铁产品需求量较大的沿海地区。一项研究表明，截至 2020 年，中国约 79%的钢铁厂能够在其半径 250 公里以内找到合适的二氧化碳封存地点（Cai, Li 和 Zhang, 2022 年）。

如图 35 所示，渤海湾盆地、准噶尔盆地、江汉盆地、鄂尔多斯盆地附近钢铁厂的二氧化碳排放量较多，并且这些钢铁厂距离可用封存地点较近，与该等地点的匹配度较高。相比之下，中国南方和沿海地区钢铁厂的二氧化碳排放量相对较少，并且与封存地点之间的运输距离较远，相应的封存成本较高（Cai, Li 和 Zhang, 2021 年）。

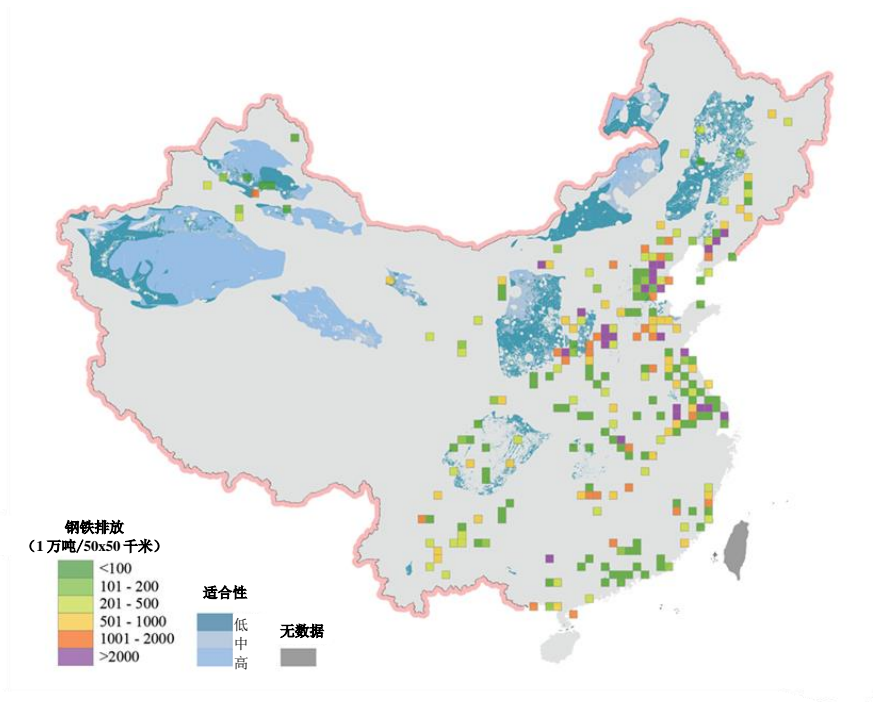


图 35：中国钢铁厂二氧化碳排放量与封存地点（基于（Cai, Li 和 Zhang, 2022 年）编制的图表）。

由于二氧化碳强化采油（EOR）的封存能力有限，以及与其他行业（水泥和化工行业）之间的竞争，钢铁行业仅靠二氧化碳强化采油无法实现深度减排，必须考虑其他碳捕获、利用与封存方法。

表 11 概述了随着时间推移预估的中国 CCS 成本，其中包括二氧化碳捕获、运输和封存。这表明，与 CCS 系统的其他组成部分相比，二氧化碳捕获占据了大部分成本。到 2025 年，使用燃烧后捕集技术捕获二氧化碳成本中位数约为 36-48 美元/吨二氧化碳，该技术是业内最成熟但尚未实现商业化应用的技术。

表 11：预估的中国 CCS 成本（Cai, Li 和 Zhang, 2021 年）。

CCS	技术	2025	2030	2035	2040	2050	单位
捕获成本	燃烧前	16-30	14-20	11-12	8-11	5-8	\$USD/t
	燃烧后	36-48	29-43	25-34	16-28	12-23	\$USD/t
	富氧燃烧	47-74	25-60	20-50	17-36	14-23	\$USD/t
运输成本	卡车	0.14-0.22	0.12-0.2	0.11-0.19	0.09-0.17	0.08-0.17	\$USD/t-km
	管道	0.12	0.11	0.09	0.08	0.07	\$USD/t-km
封存成本		7.8-9.3	6.2-7.8	5.4-6.2	4.7-5.4	3.9-4.7	\$USD/t

中国钢铁行业的碳捕获、利用与封存挑战

中国钢铁行业在碳捕获、利用与封存领域面临诸多挑战。截至 2021 年，中国正在运行或者建设中的碳捕获、利用与封存示范项目约有 36 个（Cai, Li 和 Zhang, 2021 年），其中大多数的碳捕获、利用与封存应用涉及强化采油、强化煤层气回收和电力行业。如前所述，钢铁行业应用碳捕获、利用与封存技术时，在利用范围和规模上受到限制。

从技术上讲，碳捕获、利用与封存项目可能需要额外能源来运行二氧化碳捕获和压缩系统。这些额外能源需求构成在现场集成 CCS 系统所面临的技术挑战，还成为采购或生产绿色能源方面的财务挑战。在通过 CCU 工艺将排放的二氧化碳转化为有价值产品时，通常需要使用绿氢进行化学转化。对于一些钢厂来说，可能很难获得绿氢（无论是生产、运输还是外购绿氢）。此外，一些钢厂，尤其是位于华南或华中地区的钢厂，可能需要将二氧化碳运输到很远的地方才能找到合适的封存地点。

从财务上讲，CCU 和 CCS 项目的当前成本都很高。如果政府未发出致力于碳减排的明确市场信号，钢铁公司就不愿投资碳捕获、利用与封存项目。

政府需要提供大量投资和政策支持，以加快碳捕获、利用与封存技术的研发，其中包括创新、试验、验证、试点以及扩大规模。政府还需要提供明确的市场激励措施，鼓励创新商业模式，以降低钢铁行业碳捕获、利用与封存项目的相关风险和成本。对于二氧化碳封存，需要选择可靠地点，以尽可能减少二氧化碳泄漏等环境风险（Cai 等人，2017 年）。

7.行动计划和建议

钢铁行业等重工业的脱碳工作是一项艰巨任务，可能需要投入大量资金。为了克服障碍，并避免将资金不适当地分配或锁定在无法满足未来气候、监管和市场环境需求的技术上，需要制定明确的行动计划。下文介绍了我们向政府、钢铁企业以及其他利益相关者提出的行动建议，从而面向突破性低碳钢生产路线进行投资。

建议中国政府采取的行动

为了支持钢铁行业实现净零碳排放，相关政策组合可能因不同国家和地区而异，但是，如果没有政府干预，则很难以必要速度实现该目标。下文简要讨论了中国政府可以采取的潜在行动，以促使钢铁行业加速转向净零碳排放。

短期：

- **不鼓励在中国新安装任何高炉设备。**即使在短期内（到 2030 年），中国国内可用的废钢铁也将大幅增加，这可能会取代建设新高炉的需求。与此同时，中国需要建造新的电弧炉炼钢厂。

- **尽可能地阻止重新砌筑高炉**，并鼓励建设氢基直接还原铁（H₂-DRI）或者氢就绪直接还原铁工厂。
- **提高能源效率，同时减少空气污染**：政府（国家发改委和生态环境部）可以制定政策，促进短期投资，从而提高能效，进行改造以实现超低排放，此类政策包括提供能效投资激励，提出改造现有设备的要求，以及制定加强钢铁行业能效的日落条款等（国际能源署，2022年）。
- **通过更好的回收系统来提高废钢铁质量和供应量**：为了鼓励和支持钢铁回收行业的发展，政府（国家发改委、工信部和财政部）可以推广回收技术、制定废钢铁回收标准，以及为回收设施收集和分类废钢铁提供税收优惠和激励。
- **制定氢冶金行动计划**：通过与中国钢铁工业协会（CISA）和钢铁企业展开合作，政府可以为钢铁行业制定明确的氢冶金行动计划，其中包括成立产业联盟或者氢工业应用联盟，以促进氢基直接还原铁的发展，鼓励钢铁行业使用氢气，确保钢铁行业的氢气供应和运输。
- **制定二氧化碳或温室气体排放标准**：政府（中国标准化研究院）可以为主要钢铁产品制定二氧化碳或温室气体排放标准。在排放标准中可以规定每单位钢铁产品的碳（或者二氧化碳当量）排放强度阈值。该等标准可以提供长期信号，激励钢铁行业突破技术以减少排放。
- **加速将低碳钢技术推向市场**：政府（国家发改委、工信部和财政部）可以为低碳钢生产提供补贴，以加强相关技术应用。
- **扩充排放交易体系**：政府（生态环境部和中国标准化研究院）可以将钢铁行业纳入当前的排放交易系统（ETS），以实施排放核算、报告和核查系统（国际能源署，2022年）。
- **构建开发和部署低碳炼铁炼钢技术的能力**。通过与中国钢铁行业密切合作，政府应当为国内低碳炼铁炼钢技术的开发和大规模部署提供支持，以开展相关研发与示范项目。目前，只有少数跨国公司掌握直接还原铁和氢基直接还原铁炼铁技术。中国需要在国内构建必要能力，从而大规模部署这些技术。
- **跨部门政策调整**：政府可以考虑协调和干预跨部门政策，以支持钢铁行业的能源转型。电力部门脱碳、氢气生产和供应，以及钢铁产品的设计和使用，都将对钢铁行业产生重大影响。为了贯彻综合政策框架，可以实施供应方政策工具（包括绿色采购协议（PPA）等），并选用需求端技术，例如储能、电制氢、液体燃料或化学品技术等（Wyns 等人，2019年）。

中长期：

- **搬迁综合钢铁厂：**中央政府（国家发改委、生态环境部和财政部）可以与地方政府合作，确定搬迁综合钢铁厂的优先区域，并提供激励和融资支持，以吸引综合钢铁厂迁到可再生资源丰富的地区。
- **2030年后鼓励跨省废钢铁流通：**2030-2040年之后，沿海地区废钢铁供应量将会增加，中央政府（MEE）也可以考虑鼓励东西部省份之间进行跨省废钢铁流通。
- **指导淘汰高炉：**政府（国家发改委和生态环境部）可以提供政策支持以指导中国综合钢铁厂的转型，例如要求淘汰高炉或者提供激励措施，开展就业培训和替代支持，以及向地方政府提供激励措施。
- **为低碳钢创造市场：**中央政府（国家发改委和中国标准化研究院）与中国钢铁工业协会（CISA）进行合作，制定“近零碳”排放指令、碳含量法规以及认证和产品管理等计划，从而为“近零碳”排放钢铁创造市场（国际能源署，2022年）。政府可以考虑为其资助的基础设施项目实施清洁/低碳钢绿色公共采购（GPP）等计划。
- **提高对材料效率的认识：**政府（国家发改委和工信部）可以通过与建筑公司、工程公司和设计公司等钢铁消费行业合作，开发和传播相关指南和最佳实践技术，以提高业界对材料效率战略的意识。
- **为提高材料效率采取激励措施：**政府（财政部）可以通过税收制度促使公司提高材料效率，例如提高对材料提取、使用或处置的税收（CLG Europe，2017年），或者制定有关材料效率和回收成分的强制性标准（CLG Europe，2017年）。
- **为创新和推出最新零碳技术提供资金支持：**政府（国家发改委、科技部和财政部）可以为建设试点工厂和实施创新脱碳技术示范项目提供资金支持。
- **试点、试验和验证行业规模的碳捕获、利用与封存项目：**政府可以在钢铁行业试点和验证碳捕获、利用与封存技术方面发挥重要作用，以介绍相关技术、展示减排效果，并为成功的商业案例提供范例。
- **建立技术市场合作伙伴关系：**政府可以建立和/或促进政府、工业界、研究机构和学术界之间的合作伙伴关系，以推动低碳钢生产技术领域的研究，并支持最终材料用户、技术供应商和工会之间的利益相关者合作，从而推广低碳技术（国际能源署，2022年）。
- **刺激对低碳技术的投资：**为了刺激对低碳技术的投资，政府可以直接提供公共资金（国际能源署，2022年）；提供有关能源脱碳创新的公共和私营部门资金

（CLG Europe，2017 年）；建立低息贷款或混合融资等机制，鼓励私营部门在突破性低碳钢生产路线上进行投资；提供可持续投资计划和分类系统（国际能源署，2022 年）。

建议钢铁企业采取的行动

除了政府为加快钢铁生产脱碳付出的努力之外，钢铁制造业可以发挥补充作用。行业利益相关者（供应商和购买方）可以采用多种策略来促进转向低碳钢生产。

短期：

- **持续提高能源效率：**钢铁企业可通过余热回收和智能制造技术等技术，持续提高能源效率，尤其是在烧结/球团化、炼钢、铸钢和轧钢工艺流程中。
- **实施钢铁产品全生命周期排放标准：**钢铁公司可以与行业协会（中国钢铁工业协会）和中国标准化研究院（CNIS）合作，使用中国的国家和/或行业标准来跟踪和记录主要钢铁产品的生命周期排放情况。这可以为钢铁企业在将来纳入中国碳排放交易体系做好准备，也将为细化和提高排放标准提供经验和必要投入。
- **考虑对主要钢铁产品采用排放标签：**钢铁企业可以考虑采用国际认可的排放标签，例如环境产品声明（EPD）。2022 年 5 月，中钢协和宝武钢铁共同推出的中国“钢铁行业环境产品声明（EPD）平台”上线启动。在该平台上，宝武钢铁、山西太钢和马鞍山钢铁等数家钢铁公司已经发布了他们的产品环境产品声明。更多钢铁企业可以考虑在短期内加入该平台。该平台还可帮助下游企业了解所采购钢铁产品的环境影响，以支持公共和私人绿色采购。

中长期：

- **成立氢冶金产业联盟：**氢冶金产业联盟可以支持关键技术的研发、试点、试验和验证，从而降低风险，展示技术效果，加快技术商业化进程。
- **采用智能制造和数字技术：**钢铁企业可以投资和采用传感器和控制系统等智能制造和数字技术，以提高运营效率、升级生产流程、提高产量，并减少材料和能源损失。
- **投资产品创新和升级：**钢铁公司可以投资开发低碳、高强度的钢铁产品，以延长产品使用寿命，提高产品性能，最终提高终端应用中的材料效率。
- **开展碳捕获、利用和封存（CCUS）试点项目：**钢铁公司可以考虑在钢铁行业内开发碳捕获、利用和封存试点项目，尤其是碳捕获与利用，以确定潜在应用，测试技术效果，并更好地了解其扩展性和成本。

- **建立合作伙伴关系和发起合作研究项目：**钢铁公司可以与研究机构、学术界、智囊团和其他利益相关者建立合作伙伴关系，以开发脱碳技术的商业案例（CLG Europe，2017 年），探索近期内跨领域可选脱碳技术的潜力（Hasanbeigi 等人，2017 年），通过与研究机构和学术界合作，对当前商业可行的新兴脱碳技术进行技术经济分析，建立试点工厂以示范低碳技术，并研究脱碳技术的多重效益（Hasanbeigi 等人，2017 年）。
- **跟踪和监测新兴技术：**钢铁公司可以密切跟踪和监测新技术的发展，例如通过液态工艺或熔融氧化物电解的方式电解铁矿石。
- **与其他行业共同探索碳捕获、利用和封存（CCUS）的商业和技术案例：**钢铁企业可以在碳捕获、利用和封存领域探索潜在的商业和技术机会，特别是与其他行业合作利用此类机会，例如探索钢铁与化工、钢铁与建材等行业之间的协同效应。

建议钢铁消费群体采取的行动

中国生产的大部分钢铁用于建筑业、汽车制造业以及电气和光学设备制造业（ADB，2022 年）。来自这些行业的钢铁消费群体可以利用他们的购买力来促进钢铁制造业的低碳转型。

政府通常是钢铁的主要消费群体之一。政府可以通过实施绿色采购政策（GPP），利用其购买力支持钢铁制造向低碳钢转型（Hasanbeigi 等人，2021 年和 2022 年）。

短期：

- 政府可以设定明确的目标、标准和时间表，以减少基础设施项目所采购钢材中的碳排放水平，然后通过公开或限定招标程序来确定供应商。
- 作为进入基础设施项目招标流程的先决条件，政府可以强制要求提交环境产品声明（EPD）。

中长期：

- 政府可以鼓励发布有关钢铁生命周期成本的信息。
- 政府可通过设置监测和审查机制来确保逐步实现相关目标。

中国工业部门中的建筑公司、汽车公司、电子和电气设备制造公司可通过培育低碳钢产品市场为低碳钢转型做出重大贡献。企业可以制定绿色采购政策并发出需求信号，促使向低碳钢制造转型。

短期：

- 公司可以设定自愿减排目标（行业目标、项目目标或产品目标），以鼓励全行业的碳排放监测。

- 钢铁消费群体可以使用 EPD 等工具跟踪隐含碳数据，并鼓励供应商使用此类工具。
- 直接需求信号——钢铁供应商和买方之间可以签署协议，为供应商投资突破性生产路线以生产低碳钢提供必要确定性。

中长期：

- 钢铁消费群体可以制定财务或非财务激励计划以鼓励生产低碳钢。
- 购买方的未来采购承诺——尽管该信号并不能保证向特定供应商采购产品，但它表明钢铁购买方愿意投资低碳钢，从而鼓励供应商生产低碳钢。此外，购买方应该公开发布这些承诺，最好与生产者的承诺相结合。
- 间接需求信号包括投资者、基金或终端使用市场等更广泛组织发出的减少碳排放间接承诺（ETC，2021 年）。

建议其他利益相关者采取的行动

技术/设备供应商和公共事业等其他利益相关者也可以支持钢铁制造的低碳转型。

短期：

- 技术制造商可以与政府机构合作，向钢铁制造商传播技术经济信息。
- 技术供应商可以与学术界、智库和钢铁制造商合作，开发节能和低碳的钢铁生产技术。

中长期：

- 技术制造商可以建设试点工厂来展示创新低碳技术，并传播相关成果。

总之，我们的分析表明，在净零碳排放情景下，到本世纪中叶，中国钢铁行业的二氧化碳排放量可以大幅减少，2050 年排放水平将比 2020 年水平减少 96%。通过采用各种技术能够实现这一情景，其中主要包括商业化技术，例如以废钢铁为主要原料的电弧炉（scrap-EAF）炼钢技术和直接还原铁-电弧炉（DRI-EAF）炼钢技术，以及接近商业化的技术，如氢基直接还原铁炼钢技术。我们的研究表明，从高炉-转炉炼钢转向以废钢铁为主要原料的电弧炉炼钢对二氧化碳减排作出的贡献最大，其次是需求减少和燃料转换、工艺热电气化和电网脱碳。

要实现“净零碳排放”情景所示的成果，需要史无前例地采用低碳技术，其中包括积极提升能源效率，大规模采用商业化技术，转向二次炼钢，以及大幅增加中国钢铁行业低碳燃料的使用。

在近期内，我们建议中国政府继续通过标杆管理、翻新改型和激励措施来推动提升能源效率；同时还要改进钢铁产品的回收系统，以提高废钢铁质量及其可用性。中

国政府应该走在企业的前面，在钢铁产品碳排放标准和冶金行业氢应用方面提供标准和政策指导。钢铁企业在继续追求提升能效的同时，还需要考虑对其钢铁产品实施生命周期排放标准，并贴上排放标签。

在中期阶段，政府应规划并指导行业调整，特别是在逐步淘汰高炉，并搬迁钢铁厂以匹配当地可再生资源方面。中国政府还可以利用市场力量，制定钢铁“政府绿色采购”（GPP）计划，以激励进行低碳钢铁生产。从中期阶段来看，钢铁企业在采用低碳技术方面将面临更大的压力和竞争。本文建议钢铁企业加入行业组织集团，或者建立政府与社会资本合作模式，以在技术（氢基直接还原铁、碳捕获及利用与封存、智能制造等）和政策方面跟进了解最新发展。我们还建议钢铁企业开发试点和示范项目，以使用、测试并进一步改进低碳炼钢炼铁技术。

本文建议中国政府为技术创新提供资金、监管和政策支持，涉及领域包括投资高风险和高回报的突破性技术，制定“技术推向市场”计划，鼓励技术试点、测试和验证等。

参考文献

- Abu Dhabi National Oil Company (ADNOC). 2017. “ADNOC and Masdar’s Carbon Capture Facility Holds Key to Limiting Industrial CO₂ Emissions.” 2017. <https://www.adnoc.ae:443/en/news-and-media/press-releases/2017/adnoc-and-masdar-carbon-capture-facility-holds-key-to-limiting-industrial-co2-emissions>.
- Abdul Q., Shamsuddin A., DawalS.Z., Nukman Y. “Present needs, recent progress and future trends of energy-efficient Ultra-Low Carbon Dioxide (CO₂) Steelmaking (ULCOS) program”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.*, 2016.
- ArcelorMittal, 2022. Low-carbon emissions steel standards.
- ArcelorMittal. 2021. “ArcelorMittal Expands Partnership with Carbon Capture and Re-Use Specialist LanzaTech through US\$30 Million Investment |.” December 9, 2021. <https://corporate.arcelormittal.com/media/press-releases/arcelormittal-expands-partnership-with-carbon-capture-and-re-use-specialist-lanzatech-through-us-30-million-investment/>.
- Argus. 2021. “China Hydrogen Alliance Seeks 100 GW Renewable Capacity.” 2021. <https://bit.ly/3mYhOfh>.
- Asian Development Bank (ADB), 2022. People’s Republic of China: Input-Output Economic Indicators. <https://data.adb.org/dataset/peoples-republic-china-input-output-economic-indicators>
- Bai, Yujie. 2022. “First National Hydrogen Development Plan Announced.” *Caixin*. 2022. <https://www.caixin.com/2022-03-23/101859866.html>.
- Bataille, C, Seton Stiebert, and Francis G.N. Li. 2021. “Global Facility Level Net-Zero Steel Pathways.” *The Institute for Sustainable Development and International Relations*. http://netzerosteel.org/wp-content/uploads/pdf/net_zero_steel_report.pdf.
- Cai, Bofeng, Qi Li, and Xian Zhang. 2021. “China Carbon Dioxide Capture, Utilization, and Storage (CCUS) Annual Report (2021).”
- Cai, Bofeng, Qi Li, Guizhen Liu, Lancui Liu, Taotao Jin, and Hui Shi. 2017. “Environmental Concern-Based Site Screening of Carbon Dioxide Geological Storage in China.” *Scientific Reports* 7 (1): 7598. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-07881-7>.
- Carruth, Mark A., Julian M. Allwood, and Muiris C. Moynihan. 2011. “The Technical Potential for Reducing Metal Requirements through Lightweight Product Design.” *Resources, Conservation and Recycling* 57 (December): 48–60. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.09.018>.
- Chen, Ji, Shuyi Li, and Agnes Li. 2021. “Pursuing Zero-Carbon Steel in China.” RMI. 2021. <https://rmi.org/insight/pursuing-zero-carbon-steel-in-china/>.

China Baowu News. 2022. “Breakthrough in Injecting Hydrogen in Blast Furnaces from China Iron and Steel Research Institute.” February 8, 2022. <https://i.xpaper.net/baowu/news/6763/41616/205441-1.shtml>.

China EV100. 2020. “China Hydrogen Industry Development Report 2020.”

China Government Website. 2021. “The 14th Five-Year Plan for Economic and Social Development and Long-Range Objectives through the Year 2035.” March 13, 2021. http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm.

China Government Website. 2022. “Industry Sector Carbon Peaking Action Plan.” 2022. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-08/01/content_5703910.htm.

China Hydrogen Alliance. 2019. “China Hydrogen Energy and Fuel Cell Industry White Paper.”

China Iron and Steel Association (CISA). 2022. China Iron and Steel Industry “Dual Carbon” Vision and Technological Roadmap. August 15.

China Metallurgical News. 2021. “Scrap Plays a Significant Role in Achieving “Dual Carbon” Goals.” December 31, 2021. http://www.csteelnews.com/xwzx/djbd/202112/t20211231_58318.html.

China Steel News. 2020. “Representative Feng Shuling Suggested Reducing High Cost Is a First Priority for EAF Steel Development.” June 2, 2020. http://www.csteelnews.com/xwzx/djbd/202006/t20200602_32784.html.

CLG Europe, Cambridge University. 2017. Forging a carbon-neutral heavy industry by 2050: How Europe can seize the opportunity.

China National Institute of Standardization (CNIS). 2020. “Overview of National Standards on Hydrogen Quality in China.” 2020. https://www.cnis.ac.cn/bydt/kydt/202001/t20200102_49207.html.

COURSE50. 2021a. “Message | COURSE50.” COURSE50 |. February 25, 2021. <https://www.course50.com/en/message/>.

COURSE50. 2021b. “Technologies to reduce CO₂ emissions. February 25, 2021. <https://www.course50.com/en/technology/technology01/>.

CSteel News. 2021. “Jianlong DRI Project.” April 13, 2021. http://www.csteelnews.com/xwzx/hydt/202104/t20210413_49101.html.

Dahowski, R. T., X. Li, C. L. Davidson, N. Wei, J. J. Dooley, and R. H. Gentile. 2009. “A Preliminary Cost Curve Assessment of Carbon Dioxide Capture and Storage Potential in China.” *Energy Procedia* 1 (1): 2849–56. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2009.02.058>.

Deng, Xue, Hewu Wang, Haiyan Huang, and Minggao Ouyang. 2010. “Hydrogen Flow Chart in China.” *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.03.051>.

- Dong, Kai, and Xueliang Wang. 2019. "CO₂ Utilization in the Ironmaking and Steelmaking Process." *Metals* 9 (3): 273. <https://doi.org/10.3390/met9030273>.
- Dong, Yu, Xue Cui, Xunzhi Yin, Yang Chen, and Haibo Guo. 2019. "Assessment of Energy Saving Potential by Replacing Conventional Materials by Cross Laminated Timber (CLT)—A Case Study of Office Buildings in China." *Applied Sciences* 9 (5): 858. <https://doi.org/10.3390/app9050858>.
- Duncan Kushnir, Teis Hansen Valentin Vogl Max Åhman. "Adopting hydrogen direct reduction for the Swedish steel industry: A technological innovation system (TIS) study". *Journal of Cleaner Production*, 2020.
- Durant, C.F., Skelton, A.C.H., Drewniok, M.P., Cullen, J.M., and Allwood, J.M. 2019. "A marginal abatement cost curve for material efficiency accounting for uncertainty". *Resources, Conservation & Recycling* 144: 39-47, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.01.020>
- Eberhardt, Leonora Charlotte Malabi, Harpa Birgisdóttir, and Morten Birkved. 2019. "Life Cycle Assessment of a Danish Office Building Designed for Disassembly." *Building Research & Information* 47 (6): 666–80. <https://doi.org/10.1080/09613218.2018.1517458>.
- Editorial Board of China Iron and Steel Industry Yearbook National Bureau of Statistics (NBS). 2021. *China Iron and Steel Yearbook 2021*.
- Energy Transition Commission (ETC). 2018. *Reaching zero carbon emissions from steel*.
- Energy Transition Commission (ETC). 2021. *Steeling Demand: Mobilizing buyers to bring net-zero steel to market before 2030*.
- European Commission, 2016. *Buying Green! A handbook on green public procurement*.
- Global CCS Institute. 2022. "Facilities - Global CCS Institute." 2022. <https://co2re.co/FacilityData>.
- Global Steel Plant Tracker, Global Energy Monitor, March 2022 release.
- Guo, Daqing, and Yao Zhang. 2021. "How to Solve Scrap Industry's Taxation Challenge?" *MySteel*. December 16, 2021. <https://news.mysteel.com/21/1216/07/22293A10F35B4B23.html>.
- Guo, Haibo, Ying Liu, Wen-Shao Chang, Yu Shao, and Cheng Sun. 2017. "Energy Saving and Carbon Reduction in the Operation Stage of Cross Laminated Timber Residential Buildings in China." *Sustainability* 9 (2): 292. <https://doi.org/10.3390/su9020292>.
- H2weilai. 2021. "2021 China Green Hydrogen Industry Current Status and Development Prospect."
- Hasanbeigi, Ali (2022). *Steel Climate Impact - An International Benchmarking of Energy and CO₂ Intensities*. Global Efficiency Intelligence, LLC.

Hasanbeigi, Ali; Shi, Dinah; Bhadbhade, Navdeep (2022). Advancing Buy Clean Policy in Canada. Global Efficiency Intelligence, LLC.

Hasanbeigi, Ali; Astrid Nilsson, Gökce Mete, Germain Fontenit; Shi, Dinah (2021). Fostering Industry Transition through Green Public Procurement: A "How to" Guide for the Cement & Steel Sectors.

Hasanbeigi A., Kirshbaum L.A., Collison B., Gardiner D. 2021. Electrifying U.S. Industry: A technology and process-based approach to decarbonization. Global Efficiency Intelligence. David Gardiner & Associates.

Hasanbeigi, A.; Arens, M.; Price, L. (2013). Emerging Energy Efficiency and CO₂ Emissions Reduction Technologies for the Iron and Steel Industry. Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory BNL-6106E.

Hebei Government. 2021. "The Notice on the First List of CCUS Pilot Projects in Hebei Province."

<http://hbepb.hebei.gov.cn/hbhjt/zwgk/fdzdgnr/zdlyxxgk/ydqhbh/tanshichang/101620801516065.html>.

Hertwich, Edgar G., Saleem Ali, Luca Ciacci, Tomer Fishman, Niko Heeren, Eric Masanet, Farnaz Nojavan Asghari, et al. 2019. "Material Efficiency Strategies to Reducing Greenhouse Gas Emissions Associated with Buildings, Vehicles, and Electronics—a Review." *Environmental Research Letters* 14 (4): 043004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab0fe3>.

International Energy Agency (IEA). 2019. "The Future of Hydrogen: Seizing Today's Opportunities." [https://doi.org/10.1016/S1464-2859\(12\)70027-5](https://doi.org/10.1016/S1464-2859(12)70027-5).

International Energy Agency (IEA). 2020a. "Iron and Steel Technology Roadmap." October 2020. <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap>.

International Energy Agency (IEA). 2020b. Energy technology Perspectives 2020.

International Energy Agency (IEA). 2020c. Global CO₂ emissions in 2019. Available at <https://www.iea.org/articles/global-co2-emissions-in-2019>

International Energy Agency (IEA). 2021. "Global Hydrogen Review 2021." <https://doi.org/10.1787/39351842-en>.

International Energy Agency (IEA). 2022. Achieving Net Zero Heavy Industry Sectors in G7 Members.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2022. "Summary for Policymakers. In: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change." <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-3/>.

International Energy Net. 2021. “The First Hydrogen Metallurgy Demonstration Project in the World Began Construction.” May 14, 2021. <https://www.in-en.com/article/html/energy-2304270.shtml>.

Japan Iron and Steel. 2021c. “Vision | Carbon Neutrality.” Carbon Neutrality. March 2, 2021. <https://www.zero-carbon-steel.com/en/vision/>.

Japan Iron and Steel Federation (JISF). 2022a. Recommended technologies for energy-saving, environmental protection and recycling in Indian iron and steel industry- Part 1: BF-BOF.

Japan Iron and Steel Federation (JISF). 2022b. Recommended technologies for energy-saving, environmental protection and recycling in Indian iron and steel industry- Part 2: EAF

Katharina Rechberger, Andreas Spanlang, Amaia Sasiain Conde, Hermann Wolfmeir. “Green Hydrogen-Based Direct Reduction for Low-Carbon Steelmaking”. Steel Research International. 2020.

Kuramochi, Takeshi. 2016. “Assessment of Midterm CO₂ Emissions Reduction Potential in the Iron and Steel Industry: A Case of Japan.” Journal of Cleaner Production, Absolute Reductions in Material Throughput, Energy Use and Emissions, 132 (September): 81–97. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.055>.

Massachusetts Institute of Technology (MIT). 2016. “Carbon Capture and Sequestration Technologies @ MIT.” 2016. https://sequestration.mit.edu/tools/projects/esi_ccs.html.

Material Economics. 2019. “Industrial Transformation 2050 - Pathways to Net-Zero Emissions from EU Heavy Industry.” <https://materialeconomics.com/publications/industrial-transformation-2050>.

McKinsey and Company, 2019. How should steelmakers adapt at the dawn of the EAF mini-mill era in China?

Midrex, 2017. Ultimate Low CO₂ Ironmaking and its place in the new Hydrogen Economy. <https://www.midrex.com/tech-article/midrex-h2-ultimate-low-co2-ironmaking-and-its-place-in-the-new-hydrogen-economy/>

Ministry of Industry and Information Technology. 2022. “Guiding Opinions on Promoting High Quality Development of China’s Steel Industry.” 2022. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-02/08/content_5672513.htm.

Ministry of Industry and Information Technology. 2022. “Guiding Opinions on Promoting High Quality Development of China’s Steel Industry.” 2022. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-02/08/content_5672513.htm.

Ministry of Science and Technology. 2021. “100,000 Tonnes Steel Slag Utilization and Carbon Sequestration Demonstration Project Implemented in Baotou.” June 8, 2021. https://www.most.gov.cn/dfkj/nmg/zxdt/202106/t20210608_175104.html.

Mission Possible Partnership. 2021. “Net-Zero Steel Sector Transition Strategy.” https://missionpossiblepartnership.org/wp-content/uploads/2021/10/MPP-Steel_Transition-Strategy-Oct19-2021.pdf.

Myllyvirta, Lauri, Xing Zhang, and Tom Prater. 2022. “Analysis: What Do China’s Gigantic Wind and Solar Bases Mean for Its Climate Goals?” Carbon Brief. May 3, 2022. <https://www.carbonbrief.org/analysis-what-do-chinas-gigantic-wind-and-solar-bases-mean-for-its-climate-goals/>.

National Bureau of Statistics (NBS). 2022. China Energy Statistical Yearbook 2021. China Statistics Press. Beijing, China.

National Development and Reform Commission (NDRC) and National Energy Administration (NEA). 2022. “Hydrogen Industry Development Mid-Long Term Plan (2021-2035).”

NE21. 2022. “Baowu Steel Zhanjiang Steel Began Constructing the First Million Tonne-Level Hydrogen Shaft Furnace.” February 18, 2022. <https://www.ne21.com/news/show-168307.html>.

Nicholas, S. and Basirat, S. 2022. Solving Iron Ore Quality Issues for Low-Carbon Steel-Technology Solutions Are Under Development.

Nippon Steel. 2022. “Execution of Joint Study Agreement Regarding Capturing and Transporting Liquefied Carbon Dioxide (CO₂) to Offshore Floating CO₂ Capture and Storage Hub Project.” 2022. https://www.nipponsteel.com/en/news/20220214_100.html.

Nishioka, Koki, Yutaka Ujisawa, Shigeaki Tonomura, Natsuo Ishiwata, and Peter Sikstrom. 2016. “Sustainable Aspects of CO₂ Ultimate Reduction in the Steelmaking Process (COURSE Project), Part 1: Hydrogen Reduction in the Blast Furnace.” *Journal of Sustainable Metallurgy* 2 (3): 200–208. <https://doi.org/10.1007/s40831-016-0061-9>.

Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) (2021), Government at a Glance 2021, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/1c258f55-en>.

Rissman, J., C. Bataille, E. Masanet, N. Aden, W. Morrow, N. Zhou, N. Elliott, R. Dell, N. Heeren, B. Huckestein, J. Cresko, S. Miller, J. Roy, P. Fennel, B. Cremmins, T. Blank, D. Hone, E. Williams, S. de la Rue du Can, B. Sisson, M. Williams, J. Katzenberger, D. Burtraw, G. Sethi, H. Ping, D. Danielson, H.Y. Lu, T. Lorber, J. Dinkel, and J. Helseth. 2020. “Technologies and Policies to Decarbonize Global Industry”. *Applied Energy*, Vol 26, May, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114848>

Scottish Carbon Capture & Storage. 2022. “Al Reyadah Details.” 2022. <https://www.geos.ed.ac.uk/sccs/project-info/622>.

Shangguan, Fangqin, Xiuping Li, Jicheng Zhou, Fangjie Wang, Qingcai Bu, and Chunxia Zhang. 2020. “Strategic research on development of steel scrap resources in China.” *Iron and Steel* 55 (6): 8–14. <https://doi.org/10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20190427>.

- Shougang Group. 2022. “Overview of Green and Low-Carbon Development of Shougang Jingtang.” June 27, 2022. <https://www.shougang.com.cn/sgweb/wap/sgyw/20220627/8091.html>.
- Sina Finance. 2022. “The Development of Secondary Steelmaking Is Important for the Steel Industry to Achieve Carbon Peaking.” August 9, 2022. <https://finance.sina.com.cn/money/future/roll/2022-08-09/doc-imizmscv5496089.shtml>.
- Stockholm Environment Institute (SEI). 2022. Green Steel Tracker. <https://www.sei.org/projects-and-tools/tools/green-steel-tracker/>
- Stockholm Environmental Institute (SEI). 2018. Hydrogen steelmaking for a low-carbon economy. <https://cdn.sei.org/wp-content/uploads/2018/09/hydrogen-steelmaking-for-a-low-carbon-economy.pdf>
- Tan, L. 2022. “First year highlights of the national carbon market”, Feb 18. <https://chinadialogue.net/zh/3/75074/>
- Tenova. 2020. “First Hydrogen Based ENERGIRON DRI Plant for Tenova in China.” 2020. <https://tenova.com/newsroom/press-releases/first-hydrogen-based-energiron-dri-plant-tenova-china>.
- Thyssenkrupp. 2020. “Carbon2Chem®: First Project Phase Successfully Completed and Notice of Funding Received from Federal Government for Second Phase.” Thyssenkrupp. 2020.
- Thyssenkrupp. 2021. “Injection of Hydrogen into Blast Furnace: Thyssenkrupp Steel Concludes First Test Phase Successfully.” Thyssenkrupp. February 3, 2021. <https://www.thyssenkrupp-steel.com/en/newsroom/press-releases/thyssenkrupp-steel-concludes-first-test-phase-successfully.html>.
- Toshiba International Corp, and Tongfang Environment. 2015. “Applying Carbon Capture and Storage to a Chinese Steel Plant: Feasibility Study on a CCS Facility for Shougang Jingtang United Iron & Steel Company’s Caofeidian Steel Plant, China.” <https://www.globalccsinstitute.com/archive/hub/publications/195933/Applying%20carbon%20capture%20and%20storage%20to%20a%20Chinese%20steel%20plant.pdf>.
- US Energy Information Administration (US EIA). 2022. Energy consumption in China. <https://www.eia.gov/international/analysis/country/CHN>
- United Nations Environmental Program (UNEP). 2020. Emissions Gap Report 2020.
- Verheul, Bente. 2019. “Overview of Hydrogen and Fuel Cell Developments in China.” Holland Innovation Network in China, no. January.
- Vog, V., Åhman, M. J.Nilsson, L.2018. “Assessment of hydrogen direct reduction for fossil-free steelmaking”. Journal of Cleaner Production.
- Wang, W. 2017. 2019 China Steel Association unit steelmaking Technical review

- Wang, Y.Q. Zhao, A. Babich, D. Senk, X.Y. Fan. “Hydrogen direct reduction (H-DR) in steel industry—An overview of challenges and opportunities”. *Journal of Cleaner Production*. 2021.
- Wang, Zhenbang. 2022. “Initiating Ceremony of Hydrogen-Rich Carbon Circulation Blast Furnace Test Was Held in Bagang Steel.” 2022. https://www.ts.cn/zxpd/zl/bygt/202207/t20220708_7878456.shtml.
- Worldsteel Association. 2020. Steel production process.
- World Steel Association (worldsteel). 2021. Steel statistical yearbook 2020. chrome-extension://efaidnbmninnibpcajpcgclclefindmkaj/<https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Steel-Statistical-Yearbook-2020-concise-version.pdf>
- World Steel Association (worldsteel). 2022. World steel in figures. <https://worldsteel.org/steel-topics/statistics/world-steel-in-figures/>
- Worrell, E. et al. 2010. Energy efficiency improvement and Cost Saving Opportunities for the U.S. Iron and Steel Industry. An ENERGY STAR. ®. Guide for Energy and Plant Managers.
- Wübbecke, Jost, and Timo Heroth. 2014. “Challenges and Political Solutions for Steel Recycling in China.” *Resources, Conservation and Recycling* 87 (June): 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.03.004>.
- Wyns et. al., (2019), Industrial Transformation 2050 – Towards an Industrial Strategy for a Climate Neutral Europe, IES. Available at ies.be.
- Xingtai Iron and Steel Company. 2017. “Launching Low-Carbon Hydrogen-Rich Ironmaking Technology Retrofit Project.” 2017. http://www.xingtai.gov.cn/ywdt/jrxt/xtyw/201705/t20170523_239531.html.
- Xinhua Net. 2021. “The Largest PV-Green Hydrogen Project of the World Is in Kuqa, Xinjiang.” November 30, 2021. <http://www.xinhuanet.com/energy/20211130/7d7a74eff26a4641ad692f3e9a2e73a7/c.html>
- Xuan, Yanni, and Qiang Yue. 2016. “Forecast of Steel Demand and the Availability of Depreciated Steel Scrap in China.” *Resources, Conservation and Recycling* 109 (May): 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.02.003>.
- Zahra, Dr Mohammad Abu. 2015. “Perspective from Emirates Steel Project/UAE.”
- Zhang, Shaohui, Ernst Worrell, Wina Crijns-Graus, Fabian Wagner, and Janusz Cofala. 2014. “Co-Benefits of Energy Efficiency Improvement and Air Pollution Abatement in the Chinese Iron and Steel Industry.” *Energy* 78 (December): 333–45. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.10.018>.
- Zhao, Qinghua, and Ming Chen. 2011. “A Comparison of ELV Recycling System in China and Japan and China’s Strategies.” *Resources, Conservation and Recycling* 57 (December): 15–21. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.09.010>.

Zhao, Xuan. 2022. "The Role of Hydrogen Energy Storage." Caixin. 2022. <https://www.caixin.com/2022-04-20/101873665.html>.

Zhong Shaoliang. 2020. "Hydrogen in China's Steel industry." worldsteel.org (blog). September 16, 2020. <https://worldsteel.org/zh-hans/media-centre/blog/2020/hydrogen-technology-momentum-chinese-steel-industry/>.

Zhou, Nan, Hongyou Lu, Nina Khanna, Xu Liu, David Fridley, Lynn Price, Bo Shen, et al. 2020. "China Energy Outlook: Understanding China's Energy and Emissions Trends."

Zhou, Nan, Lynn Price, Dai Yande, Jon Creyts, Nina Khanna, David Fridley, Hongyou Lu, et al. 2019. "A Roadmap for China to Peak Carbon Dioxide Emissions and Achieve a 20% Share of Non-Fossil Fuels in Primary Energy by 2030." *Applied Energy* 239 (April): 793–819. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.154>.

Chen, Wenguang. 2021. "2021 Research on hydrogen Industry Chain in China", LeadLeo Research Institute, July.

附录

附录 1: 首字母缩略词列表

BF	高炉
BOF	转炉
CDQ	干法熄焦
CISA	中国钢铁工业协会
CNIS	中国标准化研究院
CO ₂	二氧化碳
DRI	直接还原铁
EAF	电弧炉
EIA	能源信息署 (美国能源部)
GHG	温室气体
GJ	十亿焦耳
IEA	国际能源署
IPCC	政府间气候变化专门委员会
kton	千吨 (1000 公吨)
MJ	兆焦耳
MEE	生态环境部
MIIT	工业和信息化部
MOF	财政部
MOST	科技部
Mt	百万吨
NDRC	国家发改委
TRT	余压透平发电装置