



碳中和目标下的 中国钢铁零碳之路

执行摘要

2021.9



作者与鸣谢

作者

陈济
李抒苒
李相宜
李也

* 作者姓名按姓氏首字母顺序排列。除非另有说明，所有作者均来自落基山研究所。

其他作者

李婷
Adair Turner (全球能源转型委员会)

联系方式

李抒苒 sli@rmi.org

版权与引用

陈济, 李抒苒, 李相宜, 李也, **碳中和目标下的中国钢铁零碳之路**, 落基山研究所, 2021

鸣谢

本报告作者特别感谢冶金工业规划研究院对本报告撰写提供的洞见观点与宝贵建议。此外，团队也感谢能源转型委员会成员对本次工作的积极参与。

特别感谢Angela Wright Bennett Foundation、Bloomberg Philanthropies、ClimateWorks Foundation、Quadrature Climate Foundation和The William and Flora Hewlett Foundation对本报告的支持。

此外，我们也向为本研究提供意见和建议的来自企业和研究机构的专家们表示诚挚的感谢。

关于我们

落基山研究所 (RMI)



落基山研究所是一家于1982年创立的专业、独立的非盈利机构。我们致力于通过提供市场化解决方案推动全球能源系统转型，以实现1.5°C温升的气候目标，创造清洁、繁荣的零碳共享未来。我们在全球开展工作，与企业、政策制定者、社区和非政府机构合作，识别并规模化推广能源系统转型解决方案，旨在大幅降低温室气体排放。落基山研究所在中国北京、美国科罗拉多州巴索尔特和博尔德、纽约市、加州奥克兰及华盛顿特区设有办事处。

能源转型委员会 (Energy Transitions Commission)



能源转型委员会 (ETC) 汇集了全球能源领域中各行各业的领导者，其中包括能源生产商、能源密集型产业、设备供应商、金融机构和环保领域的非政府机构。我们的使命是打造一个既能够确保发展中国家达到发达世界生活水平，又能够将全球气温上升限制在 2°C 以内，并尽可能趋近1.5°C的全球经济。要实现这一目标，我们的世界需要在世纪中叶前后实现温室气体净零排放。

2020年9月22日，习近平主席提出了中国2030年前碳达峰和2060年前实现碳中和的战略目标（以下简称双碳目标），为中国全面开展脱碳行动提供了明确且强劲的政治动力。中国钢铁产量和消费量均占全球总量的一半以上，碳排放量占全国总量的17%，是中国第二大的碳排放部门。中国双碳目标提出后，钢铁行业积极响应，中央政府有关部门加紧制定钢铁行业达峰行动方案，行业协会和研究机构开展碳达峰和中和路线研究，《钢铁行业碳达峰及降碳行动方案》正在编制并已形成修改完善稿。宝武、河钢等头部企业宣布了2050年碳中和目标、碳达峰和中和时间表并制定行动路线。

落基山研究所（RMI）与能源转型委员会（ETC）早在2019年11月发布《中国2050：一个全面实现现代化国家的零碳图景》报告（以下简称中国零碳报告），对中国全经济体实现零碳进行了情景分析，力图为国家长远战略目标决策提供技术参考。报告初步分析了在全经济领域脱碳下，中国钢铁行业相应实现脱碳的图景，本报告在这一基础上对钢铁行业如何实现上述图景进行了具体路线图的分析 and 搭建。我们的分析表明，在双碳目标之下，中国钢铁需求将加速达峰并快速下降，产品结构、能耗结构和生产工艺将发生巨大变化；再生钢将取代初级钢ⁱ成为中国钢铁产能的主力；化石燃料和原料基本退出钢铁生产过程，基于氢的钢铁生产工艺将在初级钢生产中扮演重要角色；碳捕集与封存技术（CCS）将为剩下的高转炉长流程钢相关碳排放进行脱碳的末端处理。

值得强调的是，作为最大排放部门之一，钢铁行业脱碳的时间表和路线图对于全经济领域实现碳中和目标至关重要。在时间表上，我们认为，钢铁行业作为国民经济发展的重要支撑决定了下游产业是能够实现全生命周期脱碳，钢铁行业需要比全国提前实现完全脱碳。而相比深入地研究和确定脱碳时间表，本研究更聚焦于在假设时间框架下中国钢铁行业的零碳转型趋势、短中长期安排和技术经济路线图。



i 以下章节中会频繁出现初级钢和再生钢这两个较新的术语，分别与长流程钢和短流程钢对应。主要反映的是，在零碳情景下，随着直接还原和熔融还原等新工艺的普及，从铁矿石到粗钢的冶炼过程将不一定再是一个“长”流程。这也使得短流程的工艺更多样化，而并非只有电炉一种，因此再使用短流程钢将会引起歧义。我们因此使用再生钢突出强调其基于废钢冶炼的特点。

零碳情景下，中国钢铁生产将于2024年加速达峰，随后年产量持续下降，至2050年达到6.21亿吨。

中国经济的结构性调整和变革，将为钢铁行业带来巨大变革。国内下游行业对钢铁的需求将很快达峰。另外到2050年，随着废钢回收率提高，再生钢产量占比将从15%增长到60%，与此同时，初级钢产量将下降至2050年的40%。

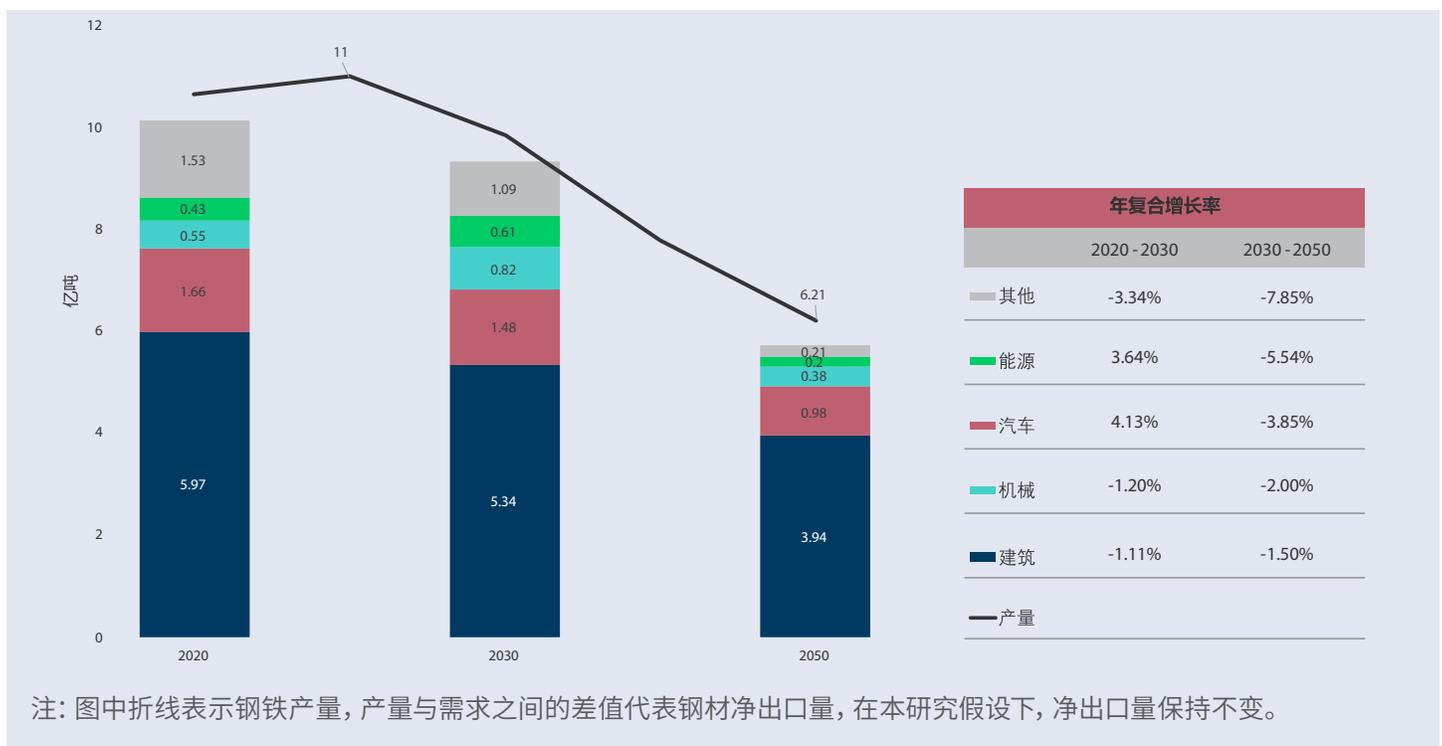
钢铁行业零碳转型发展的第一步是降低粗钢产量，只有产量尽快达峰，钢铁行业碳排放才有望尽早达峰。粗钢产量与下游行业需求量显著相关，也受进出口量及上游原材料价格影响。由于中国粗钢产量目前主要受国内需求拉动，且未来30年内钢材进出口量受多重因素影响，较难预测，因此本报告认为未来中国粗钢产量依旧主要受国内需求影响。根据RMI模型测算，中国钢铁产量将于2024年达到11亿吨的峰值，在2050年零碳情景下，总产量降至6.21亿吨，为2020年的58%左右（如图表ES-1）。结果与国际能源署《世界能源展望》可持续发展情景（Sustainable Development

Scenario)及麦肯锡等机构的预测近似，主要也是由未来30年内中国钢铁需求量下降导致。在更为激进的情景下，中国钢铁产量将在2050年降至4.75亿吨，为2020年水平的45%，这一结果与国际能源署低于2度情景（Beyond 2-Degree Scenario）近似。

工业化和城镇化发展新阶段是中国钢铁需求下降的主要原因，加入碳减排这一新的约束条件后，钢铁需求达峰和下降的进程进一步加速。工业化高质量发展及新型城镇化发展，促进产业转型、产品升级，城市增长速度放缓，对钢铁需求降低。另外，随着生态文明建设、可持续发展、数字化和智能化转型以及碳减排等目标及理念的推广，钢铁需求将加速达峰并下降。

主要用钢行业需求达峰时间和路线不同，2030年以后所有行业用钢量都将下降。用钢行业需求下降的原因有三方面：高质量发展和零碳转型导致整体新增需求降低，使用年限增加和循环利用率提高进一步降低对新钢材产品的需求，技术发展、新材料使用减少单位产品用钢量。分行业看，占一半以上需求的建筑行业达峰带动整体用钢需求达峰，汽车和能源行业需求短期持续增长，晚于钢材需求总量达峰时间，但长期都呈下降趋势。

图表ES-1: 中国钢铁产量、国内主要用钢领域钢材需求表现及年复合增长率（2020, 2030, 2050）



中国粗钢产量变化趋势与主要用钢行业钢铁需求变化相一致，也与进出口等因素相关，整体而言将加速达峰，助力碳达峰于碳中和目标实现。然而，仅降低产量并不足够支撑钢铁行业零碳发展目标实现。生产方式转变、能效提升，以及生产过程的脱碳，都是钢铁行业实现碳减排的重要手段。

废钢资源保障和成本利好双重驱动下，中国再生钢生产将完成从配角到主力的角色转变，到2050年占总钢铁产量比例将高达60%。

再生钢从配角到主力的角色转变，一方面得益于中国钢铁蓄积量的积累和废钢资源的保障。首先，随着中国新型工业化、城镇化发展，中国废钢资源的产出量将进一步增加，再生钢铁原料进口也已于2021年初放开。2025年、2030年可供钢铁行业的废钢资源总量分别为3.2亿吨、3.9亿吨，到2050年，预计钢铁行业废钢供给量5.0亿吨。其次，废钢回收的体系建设正不断完善，废钢回收产业正逐步规范，并向规模化发展。

另一方面，未来成本优势条件的具备也将驱动再生钢生产的扩张。电炉炼钢的钢铁料成本占比为83-88%，冶炼电耗成本占比3-6%。废钢和生铁的相对价格和电价水平，都将影响初级和再生钢成本的高低，从而影响不同钢铁生产路线的竞争格局。按中国进口的铁矿石约500元/吨的成本计，若要再生钢比初级钢更具有成本竞争力，在0.2元/千瓦时的低电价下，废钢成本需要在1600元/吨左右，大约是目前水平的60%。未来，保证废钢供给以压低成本以及较优的电价条件，将大大推动再生钢的发展。

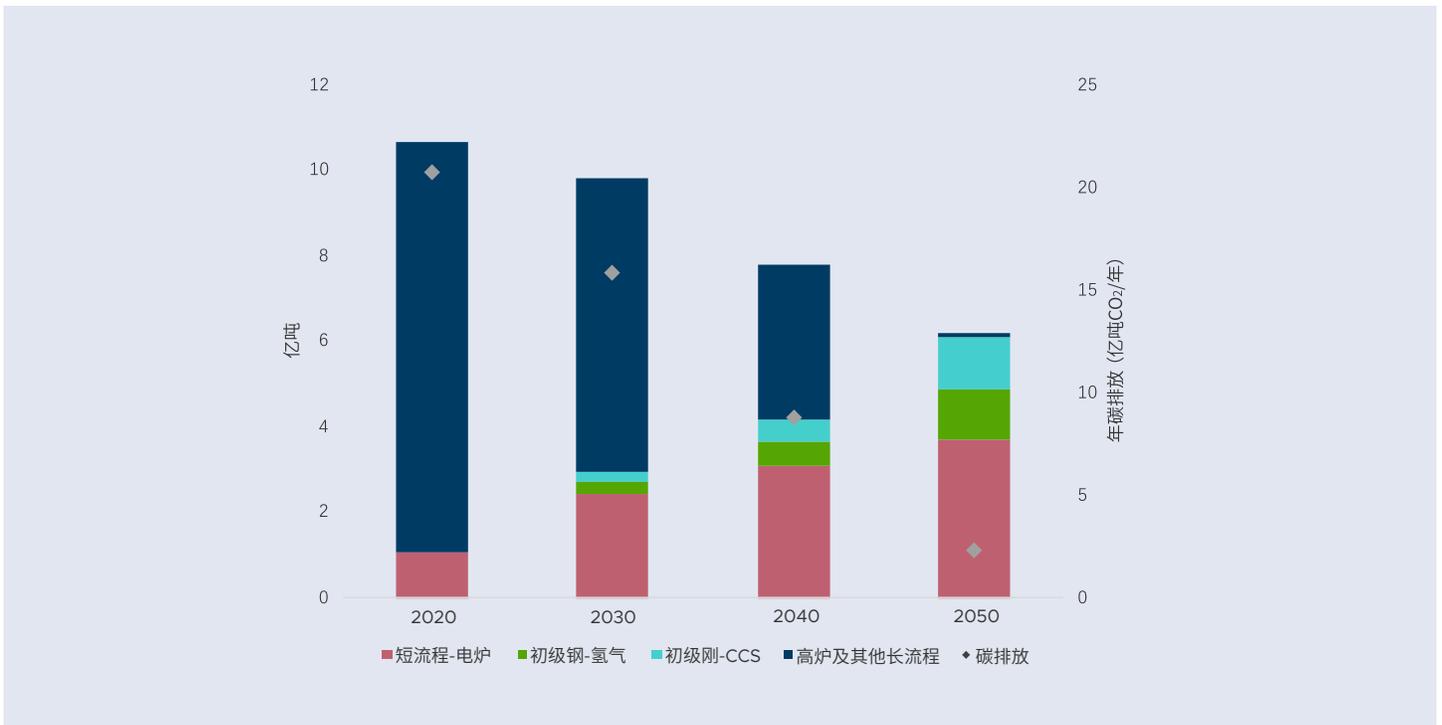
未来，中国短流程再生钢发展将经历逐渐回升、快速增长、趋于平衡三个阶段。到2025年，再生钢产量占总产量的比例达15%左右（1.6亿吨）。这一阶段，虽然电炉钢比例增长较少，但由于钢铁生产总量基数大，电炉钢的实际产能将会较快扩张。到2030年，再生钢占比提升到25%（2.5亿吨）。在这一阶段，电炉钢比例和产量均加速增长。到2050年，再生钢占比达到60%（3.7亿吨）。

随着技术加速成熟和成本急剧下降，基于颠覆性技术的零碳初级钢产能从无到有，规模达到近2.4亿吨。

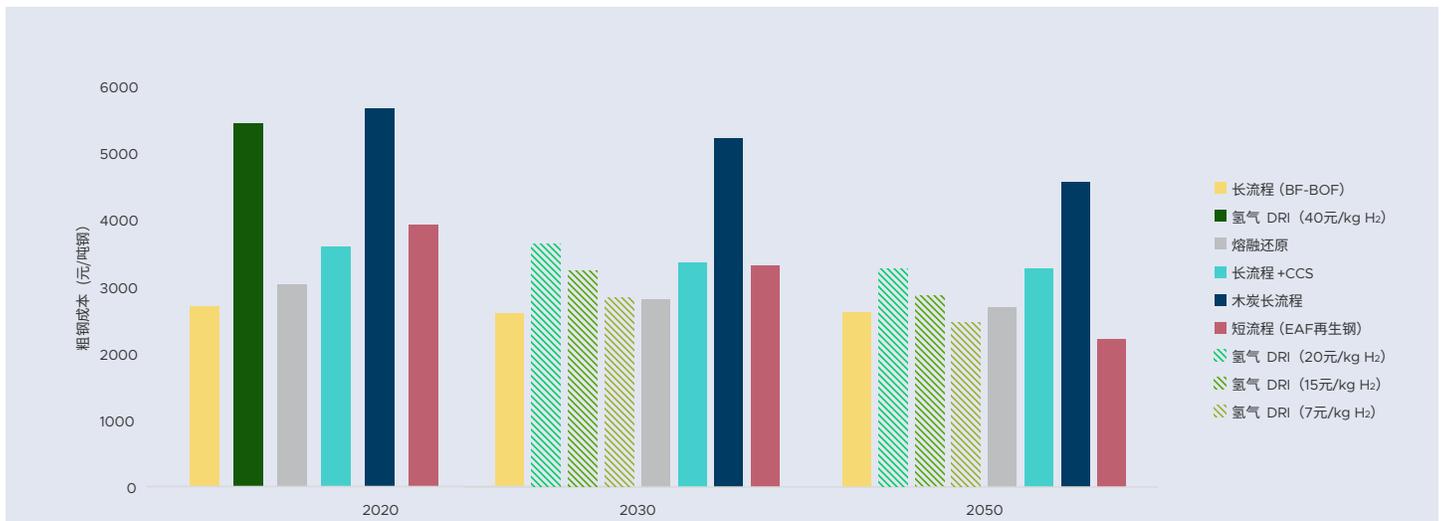
中国的钢铁生产仍然需要一部分初级钢生产来满足需求，初级钢的最终零碳化有多种技术路线选择：氢气直接还原铁、碳捕集与封存、熔融还原等。在零碳情景下，2030年零碳初级钢将贡献5000万吨产量，2050年将贡献近2.4亿吨。在这样的生产结构下，钢铁行业每年碳排放将下降到190亿吨，较2019年水平下降90%。

氢能、碳捕集等零碳炼钢技术在2050年前将大幅实现成本下降，并有望实现成本平价。如图表ES-3显示，目前，与传统的化石燃料炼钢相比，零碳钢铁路线有40-100%的成本溢价。但是未来，随着技术投资成本、氢气成本、碳捕集成本的下降和碳价的上升，零碳炼钢技术的成本竞争力将不断提高。根据RMI测算，到2050年，当氢气终端成本低于10元/千克时，基于氢气直接还原铁的新建项目粗钢成本可以低于传统长流程的成本。碳价、煤炭价格上升将进一步提高氢气直接还原铁的竞争优势。而对于改造项目来说，碳捕集路线则能够节省投资成本，在氢气的终端成本高于15元/千克时，是更具成本优势的零碳路线。

图表ES-2: 零碳情景下钢铁生产流程 (2020-2050)



图表ES-3: 不同技术路线的目前成本和未来成本



注: 假设: 1) 铁矿石价格= 650元/吨 (2020上半年价格). 2) 炼焦煤价格= 1200元/吨 (2020上半年价格) 3) 废钢价格: 2020年2900元/吨, 2030年2500元/吨, 2050年1600元/吨. 4) 电价= 2020年0.56元/千瓦时, 2030年0.35元/千瓦时, 2050年0.20元/千瓦时.

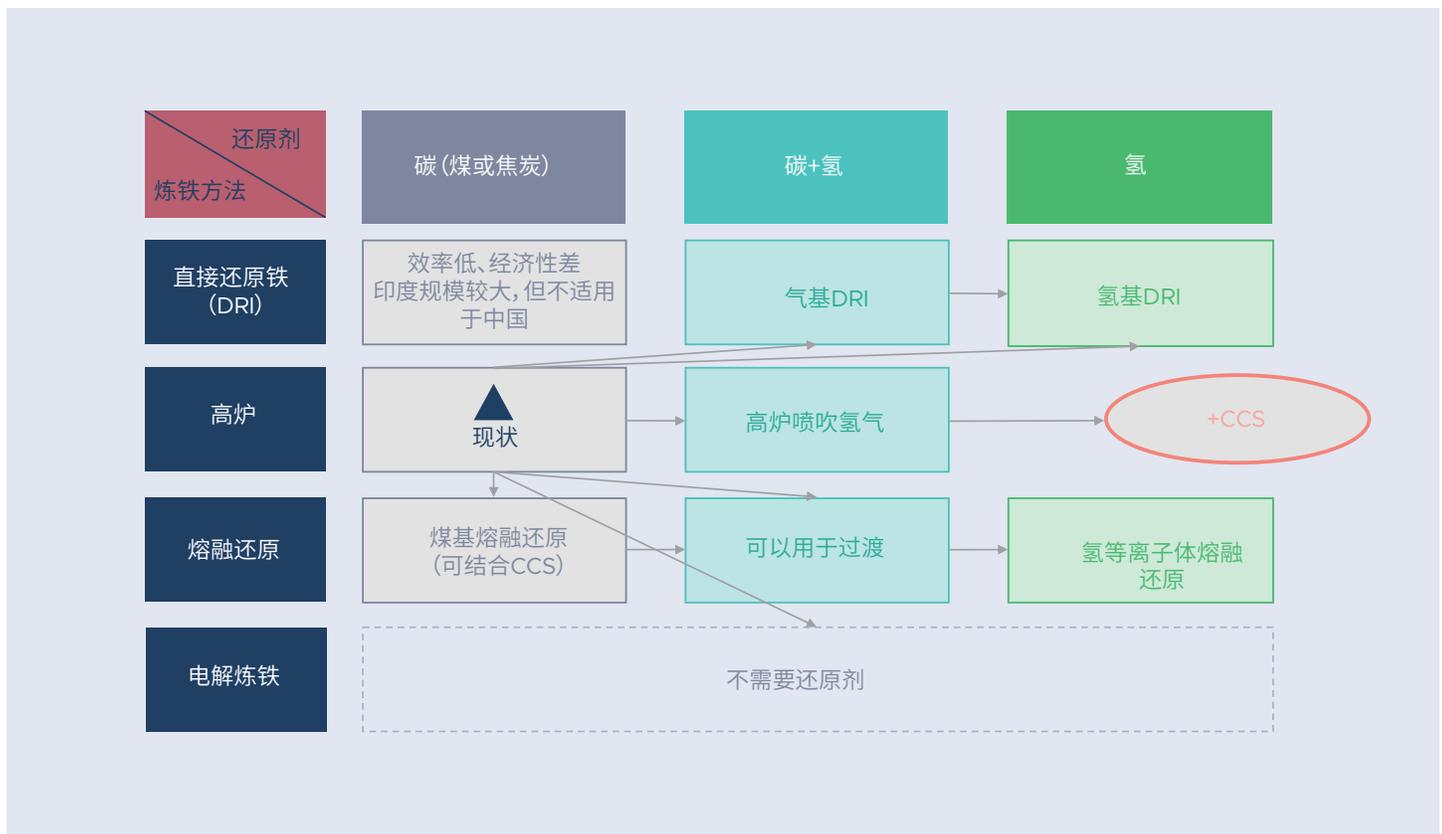
初级钢生产中, 炼铁过程可以按照成本由小到大的原则, 优化并逐步替代煤基还原剂和燃料, 逐渐实现完全零碳。

中国钢铁行业的脱碳面对着机组平均寿命较短、转型投资体量大等挑战, 不是能够一蹴而就的。但是需要从短期内开始采取行动, 按照成本由小到大、技术改进性到颠覆性的方向, 逐步实现完全零碳。

帮助初级钢实现零碳的关键在于, 改变炼铁的还原剂, 减少焦炭使用以降低过程的碳强度, 并改变过程

的供能方式, 更多地与电炉炼钢过程相匹配, 各种改进性和颠覆性的零碳初级钢技术即是在不断帮助实现这个目标 (图表ES-4)。高炉喷吹氢气、纯氧高炉等改进性低碳炼钢技术, 仍然利用高炉-转炉流程, 减小零碳转型的投资压力, 但进一步减碳仍然需要与碳捕集技术相结合。直接还原铁、熔融还原等新型炼铁方式也可以在短期内进行试点, 一方面减少煤炭燃料的使用, 另一方面, 从煤基向氢基过渡, 实现炼铁的零碳化。所有这些路线都可以被高炉炼钢企业所采用, 并不断完善技术、降低成本, 逐步扩大零碳初级钢技术的应用规模。

图表ES-4: 长流程钢铁生产零碳化的技术路线选择



以可再生能源和碳封存容量为主的零碳资源将形成强大引力场，推动零碳钢铁产能布局重构。

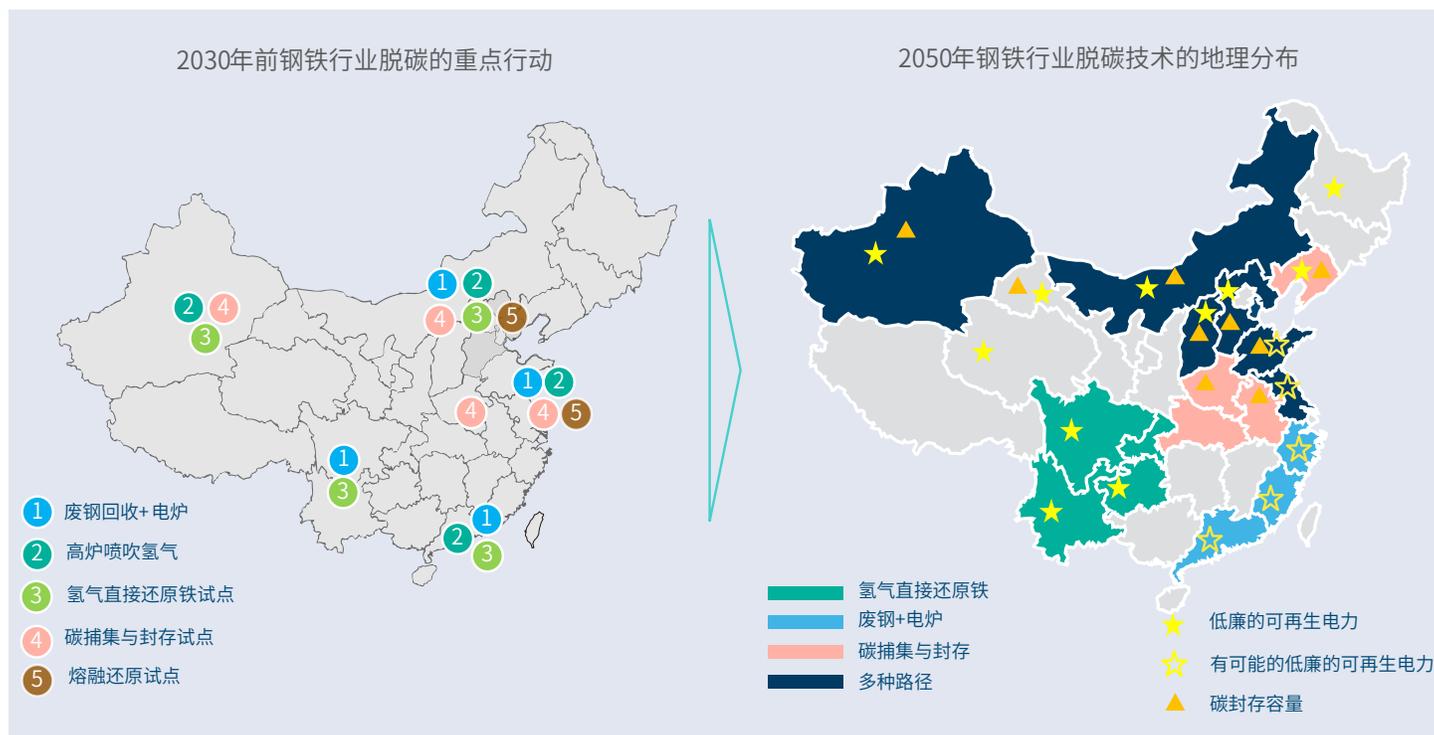
碳中和目标下，零碳炼钢流程的选择将受到既有产能路线、废钢供应、可再生能源资源、碳封存容量等因素影响，产生新的生产逻辑，在地理分布上形成分化，并可能带来全新的业态。

零碳情景下，在2030年前，针对不同区域，有选择性地采取五大关键行动，向零碳钢铁进行过渡（图表ES-5左）：1) 废钢供应充足的沿海省份和电炉技术路线基础较好的华北、西南地区，不断扩大电炉短流程炼钢规模；2) 应用高炉喷吹氢气炼钢技术以减少高炉煤炭用量；3) 可再生能源成本低的中国西南和华北地区，开展以氢气为基础的直接还原铁试点；4) 环渤海地区、华中地区 and 新疆等地，开展钢铁行业碳捕集和封存；5) 在华北地区进行熔融还原试点。这些试点将有助于进一步推动技术发展，成本降低，和规模化生产。

零碳情景下，在2050年前，这些技术路线将在不同地区共同支持钢铁行业实现碳中和目标（图表ES-5右）。考虑到我国西南地区丰富的水力资源和短流程经验，氢气-直接还原铁技术路线将是其优先考虑的路线之一。沿海地区废钢供应充足但缺乏低成本的可再生能源，重点关注废钢回收利用和短流程炼钢。华中地区的钢铁行业的零碳化将主要采用碳捕集路线。而华北地区具有多种有利条件，钢铁企业将会根据具体项目从众多技术路线中进行综合选择。

零碳情景下的钢铁市场可能会形成新的业态。一方面，西部和北部丰富的零碳资源可能吸引钢铁企业将产能转移过去，这将有利于充分利用可再生能源资源和提高零碳钢铁的经济竞争力。另一方面，直接还原铁等技术可以帮助实现炼铁和炼钢过程的分离，在可再生能源低廉的地区炼铁，并选择在综合成本低的地区炼钢。在形成直接还原铁（或海绵铁）全球市场的情景下，从产业链安全、成本等多个维度考虑进口直接还原铁（或海绵铁）的必要性和规模。

图表ES-5: 中国钢铁行业零碳路线的地理分布图景



政策建议

推动中国钢铁行业全面脱碳涉及钢铁生产和消费。在钢铁生产方面，政策的制定既要重点关注脱碳领域，也要兼顾协同产业其他政策目标，并从行业脱碳的视角重新定义中国钢铁对外贸易和投资策略；从钢铁消费的角度，应该有更多的政策支持形成一定规模的绿色零碳钢铁的需求市场，为拉动零碳钢铁生产创造可持续动力。具体政策建议如下：

以终为始，量化定义碳中和目标，倒逼高质量达峰，定期动态调整后达峰时期的碳中和实施路线。考虑到本轮钢铁产业转型将以碳中和为核心驱动力和终极目标，应确定全国实现碳中和时钢铁行业的绝对排放量（零排放、近零排放或负排放），并基于此明确行业分阶段脱碳的绝对量化目标。在达峰前，政策应该倒逼行业的高质量达峰，避免出现以达峰为由抢上高碳产能的风潮；达峰后，应综合定期评估行业脱碳行动的进展和相关工艺技术发展趋势，动态调整行业脱碳目标、时间表和实施路线。

在碳达峰前和达峰后的5-10年，可持续挖掘基于传统高碳炼钢工艺的能效提升潜力。进一步提升高-转钢铁资产的能效可以缓解钢铁行业碳达峰前由于钢产量可能小幅增长所带来的碳排放上升压力，降低全行业峰值，并在达峰后为碳排放尽早结束“平台期”，尽快形成碳排放下降趋势做出关键贡献。在行业碳达峰5-10年后，随着高碳炼钢资产逐步退出，基于相关资产的能效提升碳减排效益也将逐步减小。

在碳达峰前和达峰后的5-10年，应推动再生钢产能快速替代，并在全行业实现完全脱碳前，合理分配政策资源，更多关注短流程钢与零碳长流程钢的协调发展。在行业碳达峰前及达峰后的5-10年，通过产能置换以及从废钢产业生态培育、电弧炉钢电价等方面的政策为再生钢创造加速发展的条件。此外，通过强有力的监管，推动汽车、家电、建筑等方面的废钢最大程度回收，并制定量化的回收目标。在行业脱碳的中后期，政策宜更多注重再生钢与零碳长流程钢的协调，避免由于政策的干预，产生偏袒某一种技术路线的情况。

按照燃料/原料和工艺设备替代成本由小到大的原则，循序渐进推动初级钢生产的脱碳。初期，应尽量减少颠覆式替代既有工艺设备，鼓励高炉提高焦化环节副产氢的利用水平，对钢铁企业制氢和用氢予以财政支持，培育钢铁行业氢气消费需求和习惯，并充分利用以高炉为主体的既有资产。同时，积极推动熔融还原、直接还原等未来可适用于氢炼铁的技术工艺路线的研发和示范，加快CCUS的试验示范以及规模化，鼓励通过跨行业合作推动碳捕集后的资源化利用；后期，可转为加速推动对新资产的投入，包括逐步完善针对钢铁行业的氢气供应体系和CCUS产业，持续推动氢和CCUS成本的下降，根据各地不同的资源条件推动熔融还原、直接还原等技术工艺的规模化投产和运行。

注重碳达峰和碳中和目标与其他产业发展目标的协同，将碳减排全面纳入到产业政策制定过程。淘汰落后产能、提高产业集中度以及发展智能制造和推动服务型制造。在制定产业政策时，进一步将碳减排量作为落实相关政策和考核政策实施进展的重要量化指标。

积极应对全球碳关税形势带来的相关风险，把握好钢铁行业对外贸易和对外投资的节奏，助力全球钢铁脱碳。应做好合理应对碳边境调节税压力的准备，并加快推进钢铁行业加入碳市场的进程，在碳价格机制上实现与发达国家同步，减少碳边境调节税可能给钢铁出口带来的影响。在相关脱碳技术实现产业化前，应慎重考虑海外的钢铁项目投资，并合理控制钢铁出口规模；之后，可加速零碳钢铁项目的大规模投资和出口规模。

建立绿色零碳钢铁产品标准认证体系，培育绿色零碳钢铁的消费市场。制定国家级钢铁产品碳排放核算认证体系，并基于此体系率先在重大公共设施建设工程项目的招投标过程中引入用钢的碳排放强制标准，逐步扩大标准的应用范围，鼓励各级政府和央企在更多的建设工程项目中采用标准，在适当时机将绿钢消费与地方和企业的碳减排考核指标挂钩，最大限度的培育绿钢消费市场。

陈济, 李抒苡, 李相宜, 李也, 碳中和目标下的中国钢铁零碳之路, 2021



除特别标注, 图片均来自istock和freepik.



北京市朝阳区景华南街5号远洋光华国际C座16层
06、07、08A单元

www.rmi.org

© September 2021 RMI. 版权所有。Rocky Mountain Institute® 和RMI® 都是注册商标