ENERGY FOUNDATION
能源基金会

2021 全球能源基础设施碳排放及锁定效应

张强 同丹 主编

《全球能源基础设施排放数据库》工作组



清华大学碳中和研究院
Institute for Carbon Neutrality, Tsinghua University

2021年12月

全球能源基础设施
碳排放及锁定效应 2021



清華大學 碳中和研究院
Institute for Carbon Neutrality, Tsinghua University

全球能源基础设施碳排放及锁定效应 2021

作者列表：
张强，清华大学地球系统科学系教授
同丹，清华大学地球系统科学系助理教授
Steven J Davis，加州大学欧文分校地球系统科学系教授
关大博，清华大学地球系统科学系教授
徐若翀，清华大学地球系统科学系博士生
覃馨莹，清华大学地球系统科学系博士生
闫柳，清华大学环境学院博士后
陈翠红，清华大学地球系统科学系博士生

编　　辑：蔡慈澜 王肖阳 孙茹
装订设计：王义强

引用方式：《全球能源基础设施排放数据库》工作组（2021）.“全球能源基础设施碳排放及锁定效应 2021”， 清华大学碳中和研究院，北京，中国
文中部分图片来自 pixabay / unsplash

ICCN 清华大学碳中和研究院 Institute for Carbon Neutrality, Tsinghua University
清华大学全球变化研究院 Institute for Global Change Studies, Tsinghua University
ENERGY FOUNDATION 能源基金会

Table of Contents

目 录



执行摘要 4

第一章 引言 10

第二章 全球主要能源基础设施发展现状 14

2.1 电力行业 15

2.2 钢铁行业 20

2.3 水泥行业 25

2.4 道路交通 30

第三章 全球能源基础设施碳排放及驱动因素 32

3.1 电力行业 33

3.2 钢铁行业 38

3.3 水泥行业 43

3.4 道路交通 49

第四章 能源基础设施碳锁定效应及绿色转型 50

4.1 能源基础设施碳锁定效应及对全球气候目标的影响 51

4.2 能源基础设施低碳转型挑战 56

4.3 疫情影响及绿色复苏机遇 58

4.4 能源基础设施绿色转型 60

附录 62

参考文献 66



执行摘要

当前全球经济发展高度依赖化石能源，电力、钢铁、水泥、石化、油田、煤矿、交通运输等开采、生产和消耗能源的基础设施（以下简称“能源基础设施”）排放大量温室气体和大气污染物，对气候、环境和健康造成严重影响。能源基础设施的寿命往往长达几十年，当前新建的基础设施在未来会产生大量碳排放，产生碳排放锁定效应，对低碳能源转型和《巴黎协定》目标造成严重威胁。在应对气候变化背景下，全球能源基础设施在未来几十年内将面临剧烈转型挑战，其转型路径及转型过程中的气候环境影响是科学家和决策者共同关心的重大问题。

在这一背景下，由清华大学碳中和研究院、清华大学全球变化研究院和能源基金会支持，全球能源基础设施排放数据库工作组发起并组织相关专家学者完成了《全球能源基础设施碳排放及锁定效应》研究报告，旨在以单个设施为研究对象，建立从设施层面追踪全球能源基础设施排放的新方法，进而识别能源基础设施在低碳转型过程中面临的主要挑战并提出治理思路，为推动全球化石能源低碳转型贡献中国智慧。

报告以全球能源基础设施排放数据库（Global Energy Infrastructure Emissions Database，简称GID，http://gidmodel.org.cn）中超过十万个产耗能基础设施信息为基础，追踪全球火电、钢铁、水泥行业和机动车等主要能源基础设施在过去三十年的发展历程，分析全球及主要新兴经济体能源基础设施碳排放变化及驱动因素，并在此基础上探究其碳排放锁定效应和对实现全球气候目标的影响，识别全球能源基础设施在绿色转型进程中面临的挑战并提出政策建议。

全球主要能源基础设施发展现状

火电、钢铁、水泥和陆地交通运输均是支撑全球社会经济发展的基础行业和部门，近三十年得到快速发展。除全球水泥行业产能自 2015 年以来基本保持稳定以外，全球火电和钢铁行业近年来依然保持增长态势，机动车保有量快速增加。新兴经济体国家是上述主要能源基础设施增长的最大驱动力，贡献了全球大部分新建产能。能源基础设施的快速增长有力推动了行业技术进步，但大量新建基础设施导致全球火电、钢铁、水泥行业当前设备服役年限均偏低，对未来低碳转型带来压力和挑战。

近三十年来全球火电行业总体发展迅速，全球火电总装机容量从 1990 年的 1774 GW 增加到 2020 年的 4229 GW，机组数量从 3.7 万个增加到 8.4 万个。在火电迅速增加的背景下，当前全球火电机组年龄结构偏年轻，2020 年火电机组平均服役年限约为 24 年，其中服役年限在 10 年以内的新机组占比达到 33%，而服役年限在 40 年以上的老旧机组占比只有 16%。煤电依然是全球火电行业主力，2020 年全球煤电装机容量约占火电总装机容量的 50%，而天然气发电和燃油发电分别占 38% 和 10%。技术水平进步推动单机装机容量稳步提升，全球平均单机燃煤装机容量从 1990 年的 110 兆瓦提高到 2020 年的 180 兆瓦，600 兆瓦以上燃煤机组装机容量占比从 20% 提高到 31%。

在区域层面，新兴经济体火电装机增速显著高于发达国家。例如“一带一路”沿线国家火电装机容量在过去三十年间增加了 1.6 倍，中国火电装机容量增加了 11.4 倍，而同期以国际经合组织（OECD）和欧盟为代表的发达国家装机容量只增加了 40%。虽然全球火电行业燃料结构过去基本保持稳定，但发达国家煤电比例持续下降，天然气比例持续增加；而发展中国家煤电装机容



量仍处在持续上升通道，且平均服役年限只有十余年，对未来全球电力行业减排带来较大压力。

随着技术进步和成本大幅降低，全球光伏和风电产业近年来实现跨越式发展。近十年全球光伏和风电装机容量年均增速分别达到 22% 和 14%。中国再生能源开发利用规模快速扩大，目前光伏和风电装机容量均位居世界首位。2020 年新冠疫情下全球新增光伏和风电装机量同比增加 52%，逆势创历史新高，为后疫情时代“绿色复苏”注入动力。

全球钢铁行业规模近三十年来持续增长，2020 年全球共有钢铁企业约 2300 家，全球粗钢产能从 1990 年不足 12 亿吨增加到 2020 年超过 24 亿吨。当前全球粗钢产能以长流程为主，长流程和短流程产能占比分别为 72% 和 28%。全球钢铁行业仍处在快速发展阶段，近十年全球新建粗钢产能约 6 亿吨，且仍以长流程为主，占比接近 65%。当前全球粗钢和炼铁产能中服役年限小于 10 年的产能占比分别达到 19% 和 21%。

当前发达国家粗钢产能以短流程为主且服役年限普遍较长，而新兴经济体国家粗钢产能以长流程为主，平均服役年限普遍较短。例如，OECD 和欧盟国家短流程炼钢产能占比约 50%，平均服役年限为 37 年；亚洲地区（OECD 国家除外）长流程炼钢产能占比达到 86%，平均服役年限为 16 年。中国是世界钢铁生产第一大国，2020 年粗钢产能达到 11 亿吨，占全球总产能的约 46%。中国钢铁行业发展和技术更替均十分迅速，近十年新增产能达到约 3.2 亿吨，同期淘汰落后产能达到约 3.3 亿吨，推动行业高质量发展。印度钢铁行业发展势头迅猛，近十年粗钢产能增加了 45%，年均增长率接近 4%。

在经历了二十多年持续增长之后，全球水泥产量自 2015 年起趋于稳定，近年来全球熟料产能稳定在 35–37 亿吨之间，熟料产量稳定在 28–31 亿吨左右，产能利用率维持在 79–83% 之间。全球熟料产能在 2005–2015 年间快速扩张，因此当前全球服役年限小于 15 年的生产线产能占比达到 53%。中国熟料产能和产量均居世界首位，2020 年熟料产能达到 20 亿吨。近年来“一带一路”沿线国家产能快速扩张，近十年间累积新建产能达到 2.3 亿吨。

2020 年全球机动车保有量达到 13.6 亿辆，过去 30 年年均增速达到 3%。当前全球机动车仍以汽油车和柴油车为主，汽柴油车保有量占比分别为 67% 和 32%。在技术进步和政策激励双轮驱动下，全球电动汽车保有量从 2010 年的 1.7 万多辆增长至 2020 年的 1023 万辆，十年间增长 600 倍。



全球能源基础设施碳排放及驱动因素

全球火电行业碳排放近三十年来总体呈增长趋势，从 1990 年的 75 亿吨 CO_2 增加至 2020 年的 132 亿吨，年均增长率为 2%。随着煤电比例逐步下降，近十年全球火电行业碳排放增速趋缓，2010–2020 年间排放年均增速约为 1%，远低于 1990–2010 年的 3%，且 2018 年后排放呈现下降态势。燃煤电厂对全球火电行业碳排放的贡献最大，2020 年排放占全球火电行业碳排放总量的 70%。2020 年，服役年限在 10 年和 20 年以内的机组分别贡献了 37% 和 61% 的碳排放，火电行业低碳转型任重道远。

过去三十年全球火电行业碳排放受电力需求变化、可再生能源发展、燃料结构变化和发电效率提升等多种因素共同影响，在区域层面，火电行业碳排放变化趋势及驱动因素存在显著差异。1990 年以来，发达国家火电行业碳排放经历了先上升后下降的过程。通过淘汰燃煤电厂、发展可再生能源电力等一系列措施，OECD 和欧盟国家 2020 年火电行业碳排放比 2010 年下降了 26%。在电力需求快速增长驱动下，新兴经济体国家火电行业碳排放增长迅速。例如，1990–2020 年间“一带一路”沿线国家火电行业碳排放增加了 78%。技术进步和发电效率提升对减缓火电行业碳排放增速发挥了积极作用，中国火电行业发电标煤耗从 1990 年的 408 gce/kwh 下降到 2020 年的 308 gce/kwh。

2020 年全球钢铁行业共排放 27.2 亿吨 CO_2（此处及以下均为直接排放），碳排放在过去三十年间增加了约 1.5 倍，且钢铁行业碳排放增长主要来自长流程炼钢过程。2020 年，服役年限在 10 年以内的设备排放占全行业排放的 23%。全球钢铁行业现役设备在技术水平、能源效率和排放强度方面存在巨大差异。以长流程炼钢为例，全球能效最低的部分企业生产了约 1% 的长流程



粗钢，但贡献了长流程炼钢企业约4% 的碳排放。因此，提升技术和能效水平对于钢铁行业碳减排具有重要意义。

上世纪九十年代钢铁行业碳排放主要来自发达国家，1990 年 OECD 与欧盟国家钢铁行业碳排放占全球排放的 42%。受技术转型（发展短流程炼钢）和能效提升推动，OECD 与欧盟国家钢铁行业碳排放近 30 年持续下降，2020 年排放比 1990 年下降了 35%。受钢铁需求驱动，发展中国家钢铁行业碳排放呈持续增长态势。中国钢铁行业碳排放在 1990–2020 年间增加了约 7 倍，2020 年排放量达到 18.1 亿吨 CO_2，且以长流程炼钢工艺贡献为主。



全球水泥行业碳排放在 1990 年至 2020 年增加了 1.9 倍，2020 年排放达到 25.2 亿吨 CO_2，其中过程排放占 64%，燃料排放占 36%。需求增加是驱动水泥行业碳排放增长的最主要因素，而水泥熟料比下降、窑炉技术升级、能效提升、燃料结构变化等因素则有效降低了水泥行业的碳排放强度，1990–2020 年间生产每吨水泥的碳排放量从 0.74 吨 CO_2 下降到 0.59 吨 CO_2。过去三十年来水泥熟料生产线的生产工艺发生了巨大变化，2000 年以前全球熟料生产线中立窑、湿法回转窑、半干法回转窑和传统干法等工艺占全球水泥行业排放量一半以上。2000–2010 年间立窑、湿法回转窑、半干法回转窑和传统干法等迅速被新型干法技术所替代，2010 年新型干法工艺贡献了排放量的 85%。

与钢铁行业类似，上世纪九十年代全球水泥行业碳排放主要来自发达国家，1990 年 OECD 与欧盟国家水泥行业排放占全球总排放量的 45%。但过去三十年间亚洲水泥行业迅猛发展，推动全球水泥行业碳排放持续增加。1990–2020 年亚洲地区水泥行业排放增长近 5.5 倍，2020 年排放占全球总排放量的 71%。受基础设施建设需求拉动，新兴经济体国家水泥行业碳排放近年来增速较快，例如北非与中东地区 2005–2020 年水泥行业年均排放增速达 5%。

全球机动车碳排放在保有量持续增长的驱动下逐年上升，三十年间排放增加了 75%，2020 年排放 57 亿吨 CO_2。在区域尺度，OECD 与欧盟国家目前仍是全球机动车碳排放最高的区域，2020 年机动车碳排放占全球总量一半以上。亚洲机动车碳排放在 1990–2020 年间显著增长，对全球机动车碳排放的贡献由 8% 增长至 26%。

能源基础设施碳锁定效应及绿色转型

2020 年，全球火电、钢铁、水泥和陆地交通运输部门共排放二氧化碳 241 亿吨，约占全球碳排放总量的 70%。更为重要的是，这些基础设施在未来还将运行数十年并持续产生碳排放，形成碳排放锁定效应。如果上述现有能源基础设施按历史平均服役寿命和设备投运率运行，其在未来数十年内产生的碳排放总量（即锁定碳排放）约为 4800 亿吨。按同样方法测算，全球所有现存排放源的锁定碳排放约为 7000 亿吨，上述能源基础设施的锁定碳排放约占全部锁定碳排放的 70%。

能源基础设施的碳锁定效应将对《巴黎协定》提出的全球气候目标产生较大威胁。《巴黎协定》提出将全球温升控制在 2 度之内并努力控制在 1.5 度之内，而到 2020 年，1.5 度和 2 度目标下剩余的碳排放空间分别为 3500–5100 亿吨和 11000–14000 亿吨。上述主要能源基础设施在未来锁定的 4800 亿吨碳排放与全球 1.5 度目标下剩余的碳排放空间基本相当，约占到 2 度目标下剩余碳排放空间的 40%。

碳锁定效应并非一成不变，通过缩短能源基础设施服役年限、降低产能利用率等措施可减少其碳锁定排放。以火电行业为例，如推动火电提前淘汰，将平均服役年限从 40 年削减到 30 年，则对应的锁定碳排放将从 3029 亿吨削减到 2000 亿吨。随着光伏和风电等新能源发电的大规模发展，未来火电将主要承担调峰功能，年发电小时数将大幅降低。如自 2030 年起将火电年发电小时数逐步降低到 2000 小时，则火电行业未来锁定的碳排放将减少到 2295 亿吨左右。此外，碳捕获与封存（CCS）等碳减排技术的大规模利用也能够在一定程度上抵消能源基础设施的碳锁定效应。

从前述分析结果可以看出，全球主要化石能源基础设施总体仍处在扩张阶段，持续新建的基础设施对低碳转型带来巨大挑战。新兴经济体正处在经济快速发展阶段，能源和基础原材料需求增长迅速，如何在满足需求的同时尽可能减轻锁定碳排放对未来减排带来的压力，是发展中国家亟待解决的重大问题。在全球迈向低碳转型和净零排放的背景下，未来火电、钢铁和水泥行业的持续惯性投资或将使大量基础设施的平均服役寿命缩减至 10–20 年，造成巨额资本搁浅风险。

受新冠疫情影响，2020 年全球主要能源基础设施投资趋缓，产能利用率下降。全球在推动经济复苏的同时还面临着可持续发展及气候变化的巨大挑战，后疫情时代的绿色复苏可望为全球经济低碳转型注入新动能。全球化石能源基础设施投资放缓为加快绿色基础设施建设提供了新机遇。中国已承诺不在海外新建煤电项目，未来大力推动分享绿色低碳技术，在使得“一带一路”倡议项目更加绿色的同时，也有望为全球气候治理探索出一条国际合作的新路径。

绿色转型是实现全球气候目标的必由之路，为实现全球气候目标，需扭转高碳能源基础设施投资惯性，避免新的高碳增长带来的长期碳锁定效应，同时降低资产搁浅风险；加速能源基础设施的升级改造和有序淘汰，提升技术和能效水平，降低碳排放强度；加大新兴低碳技术研发力度，推进氢能冶金、CCS 等碳减排技术的示范和产业化应用；抓住后疫情时代绿色复苏的发展机遇，深入推进可再生能源、新能源汽车等新能源产业发展，加强绿色技术国际合作，构建全球零碳能源体系。



01

第一章 引言

当前全球经济发展高度依赖化石能源，电力、钢铁、水泥、石化、油田、煤矿、交通运输等开采、生产和消耗能源的基础设施（以下简称“能源基础设施”）排放大量温室气体和大气污染物，对气候、环境和健康造成严重影响。能源基础设施是温室气体和大气污染物排放的基本单元，也是制订气候变化和大气污染控制策略的落脚点。然而长期以来，很多国家和地区的基础设施数据不透明、不公开，缺乏统一的数据基础和技术方法，目前大多数针对全球重点行业排放及减排策略的研究只能在行业宏观尺度开展，对科学研究和政策决策的支撑不足。

能源基础设施的寿命往往长达几十年，当前新建的能源基础设施在未来会产生大量碳排放，产生碳排放锁定效应。政府间气候变化专门委员会（IPCC）在《IPCC 全球升温 1.5℃特别报告》中指出，如今全球地表平均温度较工业化前水平上升约 1℃，1.5℃温控目标下 2018 年起全球仅剩余 4200–5800 亿吨 CO_2 的排放空间（50%–66% 置信区间）。而当前人类一半以上的能源来自从地壳深处提取的化石燃料，化石燃料体系已经深深地根植于社会之中。现有的大量能源基础设施在未来锁定的碳排放对低碳能源转型和《巴黎协定》目标的实现造成严重威胁。在这一背景下，全球能源基础设施在未来几十年内将面临剧烈转型挑战，其转型路径及转型过程中的气候环境影响是科学家和决策者共同关心的重大问题。

在能源基金会、国家自然科学基金委、科技部重点研发计划、生态环境部等机构支持下，清华大学联合国内外多个机构和团队组成全球能源基础设施排放数据库工作组，自 2018 年起开发和维护全球能源基础设施排放数据库（Global Energy Infrastructure Emissions Database，简称 GID），旨在构建设备级别的全球产耗能基础设施的基础信息及排放数据库，为科学研究和政策评估提供基础数据支持。团队通过对多个全球和区域尺度的能源基础设施数据库开展数据挖掘，整理出全球超过十万个产耗能基础设施信息，并在此基础上利用大数据方法开发了统一的排放表征模型，实现了设备级别的二氧化碳和大气污染物排放核算。

以 GID 数据库中超过十万个产耗能基础设施信息为基础，由清华大学碳中和研究院、清华大学全球变化研究院和能源基金会支持，全球能源基础设施排放数据库工作组发起并组织相关专家学者完成了《全球能源基础设施碳排放及锁定效应》研究报告。报告旨在以单个设施为研究对象，建立从设施层面追踪全球能源基础设施排放的新方法，进而识别能源基础设施在低碳转型过程中面临的主要挑战并提出治理思路，为推动全球化石能源低碳转型贡献中国智慧。

报告涵盖了电力、钢铁、水泥和道路机动车等四个生产和消耗化石能源的部门，上述四个部门的化石能源消耗量约占全球化石能源消耗总量的 63%。

本报告是依托 GID 数据库编制的首份研究报告，受方法和数据所限，不当之处在所难免。报告相关结论和政策建议仅代表作者团队个人观点，不代表作者所在单位和机构及报告资助方观点。GID 工作组未来一方面将持续开发和完善数据库，从时间、空间、行业等多个维度拓展数据库覆盖范围，提升数据库精度；另一方面将致力构建开放、合作、共享的平台机制，依托平台持续科学产出并提出政策建议，为全球气候变化应对和可持续发展做出贡献。

报告共分为三部分

- **第一部分**基于 GID 数据库中的基础信息分析了 1990–2020 年间全球电力、钢铁、水泥行业和道路机动车等主要能源基础设施的发展趋势，其中特别关注了中国和“一带一路”沿线国家等主要新兴经济体的发展态势。
- **第二部分**测算了上述主要能源基础设施 1990–2020 年碳排放变化趋势并解析了排放变化的驱动因素。
- **第三部分**探究了主要能源基础设施的碳排放锁定效应和对实现全球气候目标的影响，识别了全球能源基础设施在绿色转型进程中面临的主要挑战和机遇并提出了政策建议。





02

第二章

全球主要能源基础设施发展现状

2.1 电力行业

电力基础设施是社会经济发展的基础。火电指以煤炭、天然气、石油、生物质和其他化石燃料作为燃料生产电能的设施（Tong et al., 2018）。为满足日益增长的电力需求，近三十年来全球火电行业总体发展迅速，全球火电厂总装机容量从1990年的1774吉瓦增加到2020年的4229吉瓦，机组数量从3.7万个增加到8.4万个（见图2–1）。火电扩张速度在区域层面有明显差异，社会经济

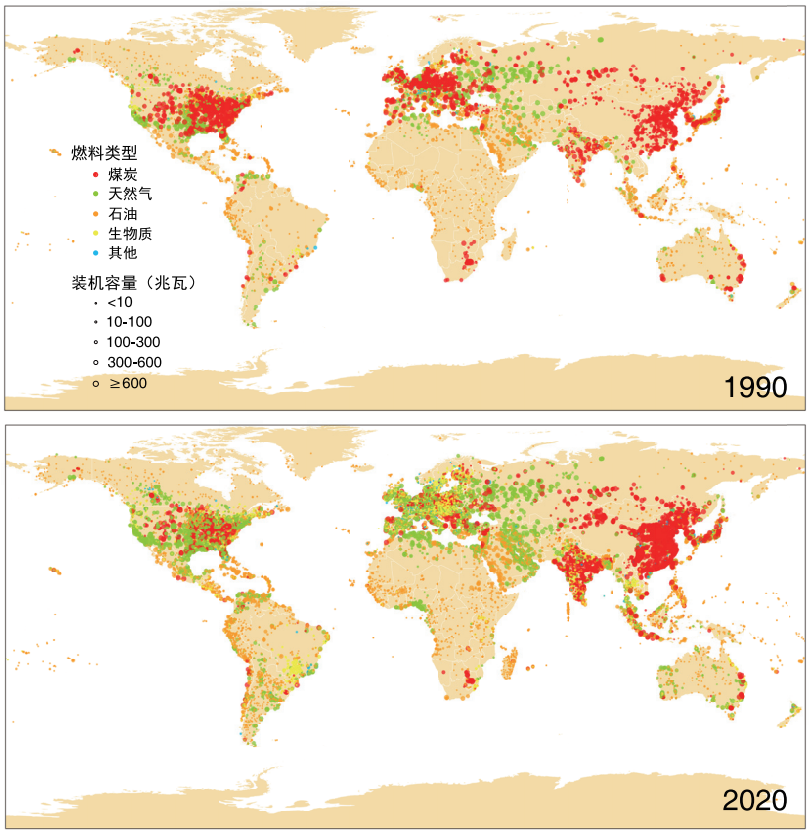


图 2–1 1990 和 2020 年全球火电厂空间分布（改编自 Qin et al., 2022）

发展和电力需求的持续攀升推动了发展中国家火电基础设施的快速扩张。例如，1990–2020 年间，中国火电装机容量增加了 11.4 倍，而美国火电装机容量仅增长了 50%。

在火电行业迅速发展的背景下，当前全球火电机组年龄结构偏年轻。2020 年火电机组平均服役年限约为 21 年，其中服役年限在 10 年以内的新机组占火电总装机容量的 33%，而服役年限在 40 年以上的老旧机组占比只有 16%。由于经济发展、资源禀赋和环境政策的差异，不同区域和燃料类型的火电机组服役年限具有显著差别（见图 2–2）。亚洲的煤电机组、经合组织与欧盟的燃气机组与中东和非洲地区的燃油机组的服役年限较短，而经合组织与欧盟的燃煤和燃气机组、东欧和俄罗斯的燃气机组服役年限较长。

煤电依然是全球火电行业的主力。电力需求的快速增长和环境政策导向推动了燃煤电厂和燃气电厂的大规模建设（Tong et al., 2018）。尽管全球燃气电厂的装机容量增速快于燃煤电厂，2020 年全球煤电装机容量仍占火电总装机容量的 50%，而燃气发电和燃油发电分别占 38% 和 10%。虽然全球煤电占火电的比例过去三十年间基本保持稳定，但发达国家煤电比例持续下降，天然气比例持续增加；而发展中国家煤电装机容量仍处在持续上升通道，且平均服役年限只有十余年，对未来全球电力行业减排带来较大压力。

技术水平进步推动单机装机容量稳步提升。技术水平进步和环境标准加严大力推动了大规模、低能耗强度的燃煤机组建设，同时加速了低效、小型燃煤机组的淘汰，使得全球平均单机燃煤装机容量从 1990 年的 110 兆瓦提高到 2020 年的 180 兆瓦，600 兆瓦以上燃煤机组装机容量占比从20% 提高到31%，火电机组发电结构得以优化。

在区域层面，新兴经济体火电装机增速显著高于发达国家。“一带一路”作为连接起亚太、非洲、欧洲等多个经济圈的经济走廊，沿线多为新兴经济体和发展中国家（国家发展改革委，2015; 推进“一带一路”建设工作领导小组办公室，2021），区域

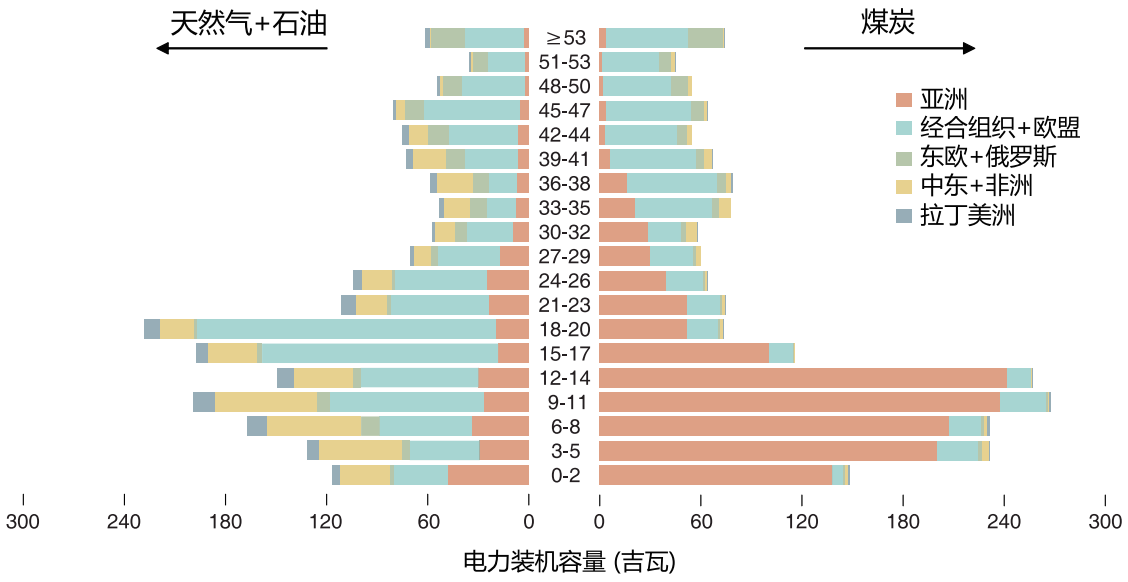


图 2–2 2020 年全球不同服役年限火电机组装机容量分布（改编自 Qin et al., 2022）

内火电装机增长显著。1990–2020 年，“一带一路”沿线国家火电装机容量从 480 吉瓦增加至 1259 吉瓦（见图 2–3）。三十年间“一带一路”沿线国家火电装机容量增长了 1.6 倍，而同期经合组织与欧盟火电装机容量只增加了 40%。

“一带一路”沿线国家火电发展速度存在明显差异。1990 年，俄罗斯、印度、乌克兰是“一带一路”沿线国家中火电装机容量前三的国家，合计占“一带一路”沿线国家火电总装机容量的 46%。到 2020 年，“一带一路”沿线国家中火电装机容量前三的国家分别为印度、俄罗斯和沙特阿拉伯，火电装机容量分别为 276 吉瓦、188 吉瓦和 91 吉瓦。

中国火电以煤电为主，近三十年发展迅速。1990 年，中国煤电装机容量不足 100 吉瓦，到 2020 年已超过 1000 吉瓦（见图 2–4）。煤电发展的区域差异主要受煤炭资源分布及电力需求影响。华北和西北地区丰富的煤炭资源推动了煤电基础设施的建设，1990–2020 年间内蒙古、山西、陕西等省份煤电装机容量年均增速都在 10% 左右。这些区域依托自身资源优势发展煤电，现已成为国家重要的能源生产基地（中国电力企业联合会，2021）。

在煤电基础设施快速发展的背景下，中国煤电机组服役年限偏低。如图 2–5 所示，2020 年中国现役煤电机组平均服役年限为 11 年，其中服

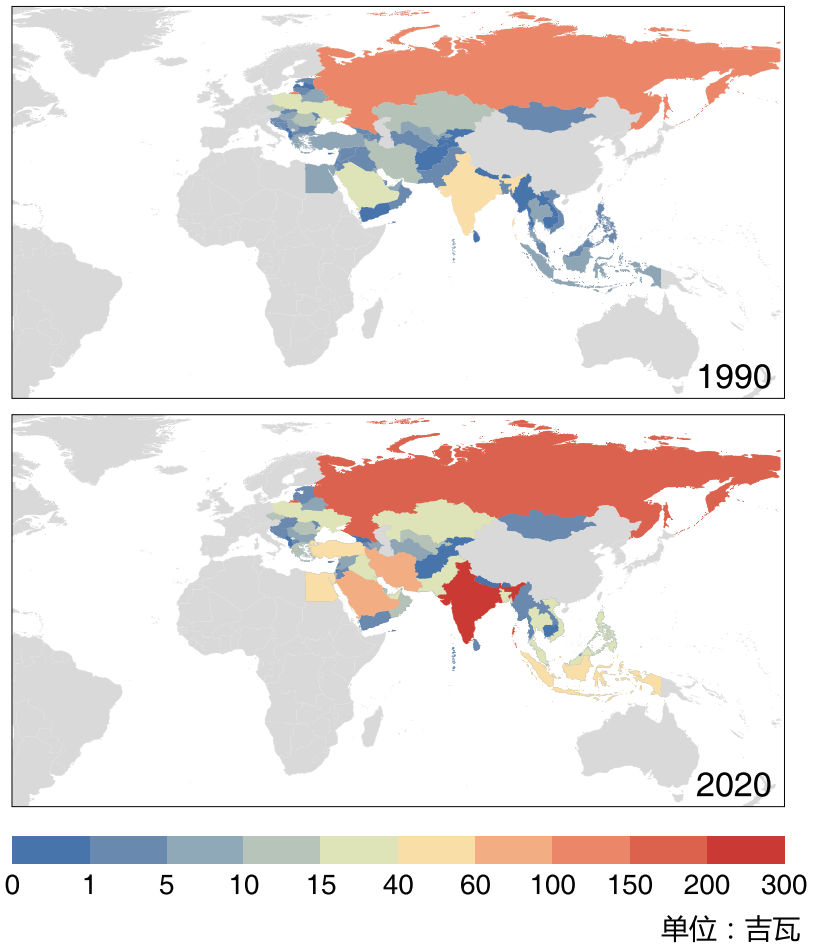


图 2–3 1990 和 2020 年“一带一路”沿线国家火电装机容量分布

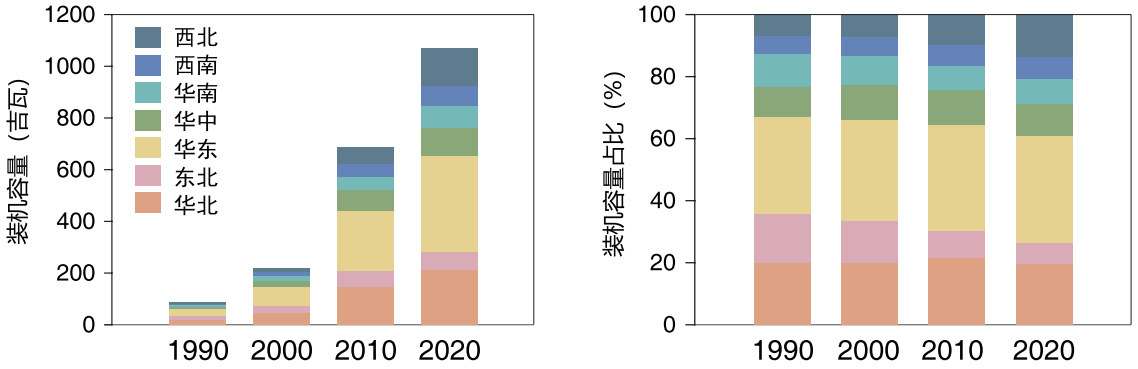


图 2–4 1990、2000、2010 和 2020 年中国分区域煤电装机容量及其占比变化

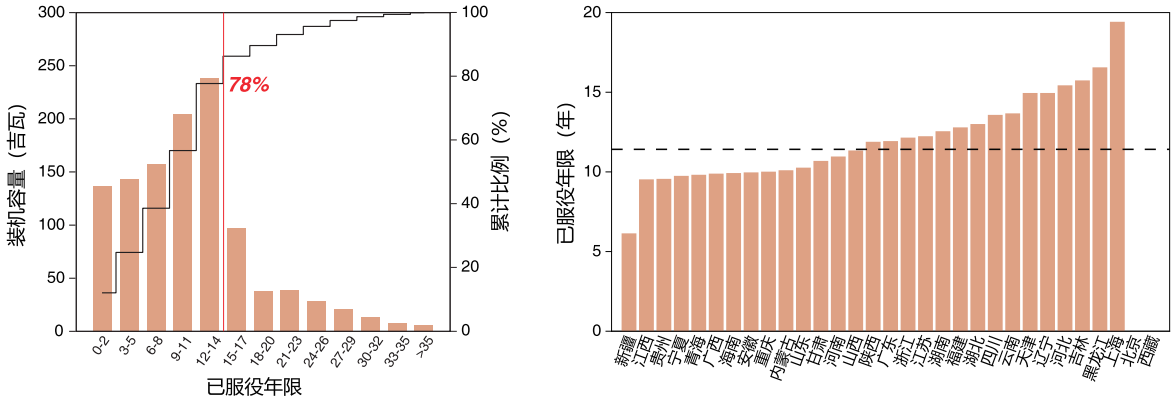


图 2–5 2020 年中国现役煤电装机容量服役年限分布和各省（自治区、直辖市）平均服役年限（右图黑色虚线代表全国平均服役年限）

役小于 15 年的煤电机组超过 75%，这与“十一五”时期以来煤电机组的快速发展和老旧机组的淘汰密切相关（Zhang et al., 2019）。受煤电发展速度和发展阶段影响，不同省份煤电机组的平均服役年限存在显著差异。上海市煤电机组的平均服役年限接近 20 年，而新疆煤电机组的平均服役年限只有 6 年。

随着技术进步和成本大幅降低，全球光伏和风电产业近年来实现跨越式发展。在技术进步推动下，可再生能源发电成本自 2010 年以来急剧下降，其中，光伏发电和陆上风电的成本分别下降了 82% 和 39%（IRENA, 2020）。成本下降推动光伏和风电装机容量快速增加（IRENA, 2019; IRENA, 2021a; IRENA, 2021b）。2010–2020 年，全球新增光伏和风电装机容量增长迅速，年均增速分别达到 22% 和 14%（见图 2–6）。过去十年间，亚洲逐渐超越经合组织与欧盟，成为全球光伏和风电装机容量增长最快的区域。2020 年，亚洲占全球新增光伏装机容量的 54%、全球新增风电装机容量的 67%。

2020 年新冠疫情下全球新增光伏和风电装机容量同比增加约 52%，逆势创历史新高，为后疫情时代“绿色复苏”注入动力。2020 年，全球新增光伏装机容量为 127 吉瓦，较 2019 年增长了 30%，而全球新增风电装机容量增速达到 90%。其中，亚洲地区新增光伏和风电装机容量增长最显著，2020 年亚洲新增光伏和风电装机容量同比增速分别达到 52% 和 164%。

中国可再生能源开发利用规模快速扩大，目前累积和新增光伏/风电装机容量均居世界首位。2010 年，全球新增光伏装机容量最大的三个国家分别为德国、意大利和捷克，全球新增风电装机容量最大的三个国家分别为中国、美国和印度（图 2–7）。而目前中国新增光伏和风电装机容量稳居世界首位。2020 年，中国占全球新增光伏装机容量的 38% 和风电装机容量的 65%，其次是美国（占全球新增光伏装机容量的 15% 和风电装机容量的 13%）。

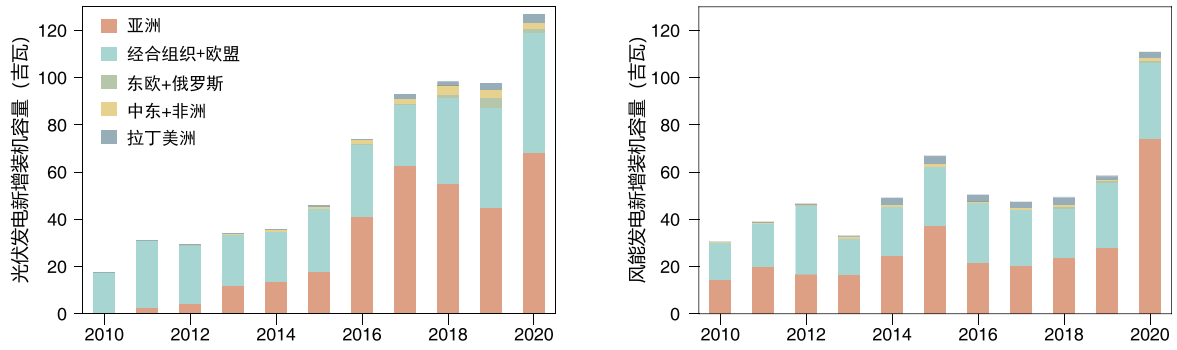


图 2–6 2010–2020 年光伏和风电新增装机容量

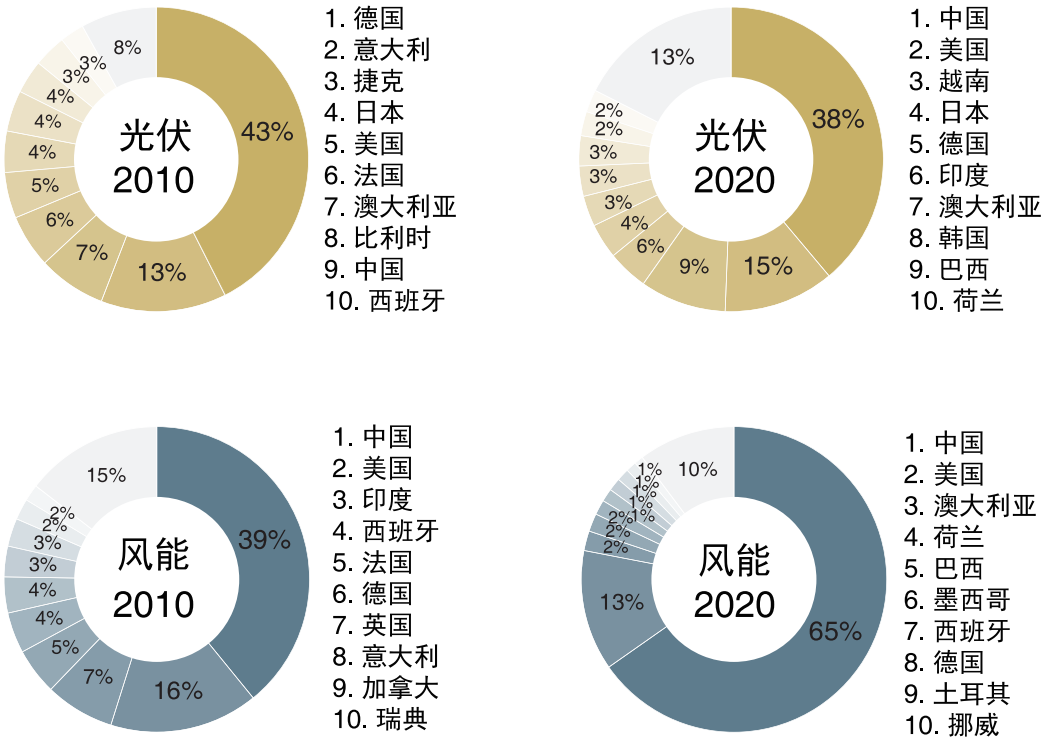


图 2–7 2010 和 2020 年新增光伏和风电装机容量前十国家

2.2 钢铁行业

全球钢铁行业规模近三十年持续增长。1990 年全球钢铁企业共约 1400 家，到 2020 年已增加至近 2300 家（图 2–8）；全球粗钢产能从 1990 年不足 12 亿吨增长到 2020 年超过 24 亿吨。亚洲、中东和非洲地区的生产扩张对全球钢铁产能增长起到主要推动作用，钢铁行业重心从发达国家向发展中国家发生明显转移。1990 年亚洲和中东与非洲的粗钢产能合计占全球总产能的 20%，而近三十年两个地区产能分别增加约 6 倍和 3 倍，2020 年产能合计超过 15 亿吨，占比超过全球总产能的 60%。与之相反，1990 年经合组织与欧盟地区粗钢产能全球占比约 60%，但其近三十年间产能相对稳定，到 2020 年全球占比下降至不足 30%。

以转炉为代表的长流程炼钢主导了当前全球粗钢产能，长流程和短流程产能占比分别为 72% 和 28%（图 2–9）。钢铁生产技术结构存在显著的区域差异性。由于废钢资源紧缺和成本偏高等因素，亚洲和中东与非洲等区域近三十年新增产能多为长流程炼钢及相关上游产品（烧结矿、

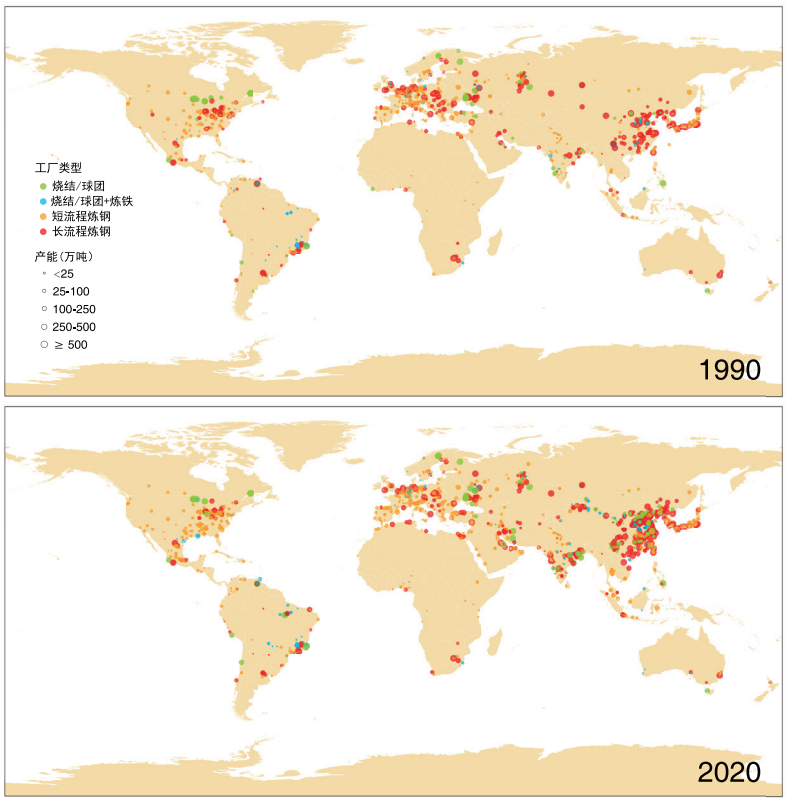


图 2–8 1990 和 2020 年全球钢铁企业空间分布

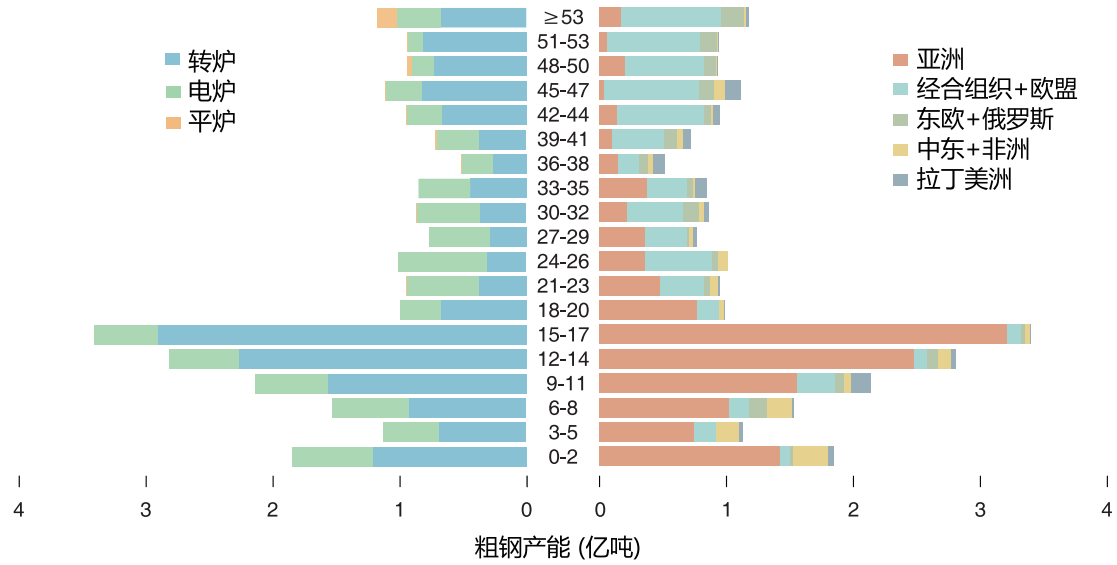


图 2–9 2020 年全球不同服役年限粗钢产能分布

球团矿和生铁等），而发达国家则充分利用自身废钢资源发展以电炉为基础的低能耗短流程炼钢技术。例如，当前亚洲长流程炼钢产能比例高达 86%，而经合组织与欧盟短流程炼钢产能比例约为 50%。

当前全球钢铁行业仍处在快速发展阶段，近五年（2015–2020 年）新建粗钢产能接近 3 亿吨，与 2010–2015 年间新建产能基本持平。近十年新建产能仍以长流程为主，占比接近 65%。钢铁产能新建主要集中在亚洲和中东与非洲地区的新兴经济体，例如 2010 年后亚洲地区新建产能占全球总量的超过 70%，而工业化起步较早的经合组织与欧盟和东欧与俄罗斯地区同期新建产能较少。全球钢铁行业近年来快速扩张导致服役年限较短的设施比例较高（图 2–9），当前全球粗钢和炼铁产能中服役年限小于 10 年的产能占比分别达到 19% 和 21%，而服役年限小于 20 年的产能占比分别达到 55% 和 62%。当前全球粗钢产能平均服役年限仅为 23 年，但不同区域钢铁产能的服役年限呈现出显著差异性。例如，经合组织和欧盟地区钢铁行业发展较早，当前粗钢产能平均服役年限达 37 年，仅有不到 12% 的设施服役不满 15 年；而亚洲地区平均服役年限仅为 16 年，约 50% 的设施服役不满 15 年。

“一带一路”沿线国家近三十年钢铁行业扩张明显。1990 年“一带一路”沿线国家粗钢产能合计为 3.5 亿吨，2020 年已达 5.6 亿吨，增幅达 60%（图 2–10）。近十年（2010–2020 年）“一带一路”沿线国家钢铁产能扩张加速，年均增速接近 3%，显著高于 1990–2020 年 1.6% 的年均增速。当前大部分“一带一路”沿线国家废钢资源有限，主要依靠煤铁资源发展长流程炼钢，粗钢产能中长流程炼钢占比接近 65%。

尽管整体呈现增长趋势，“一带一路”沿线国家之间钢铁行业发展差异明显（图 2–11）。俄罗斯和乌克兰工业化较早，1990 年在“一带一路”沿线国家粗钢产能中位列前二，但受到苏联解体等因素影响，其 90 年代钢铁行业规模明显收缩，之后虽然有所恢复发展，但 2020 年产能规模仍不及 1990 年水平；东南亚和中东多个新兴经济

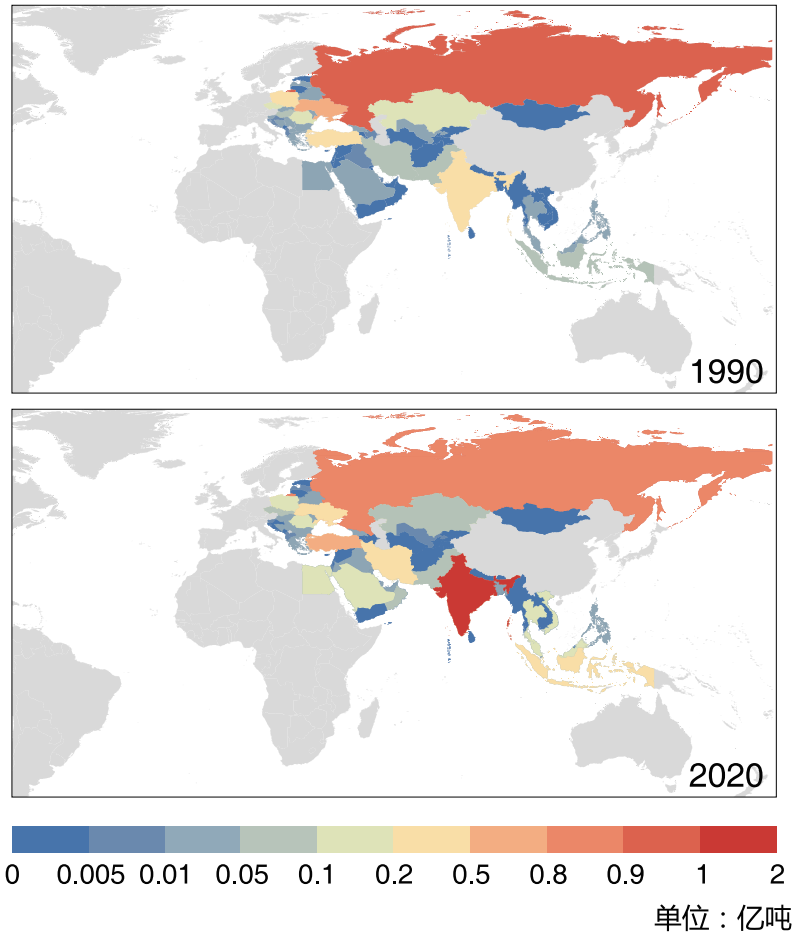


图 2–10 1990 年和 2020 年“一带一路”沿线国家粗钢产能分布

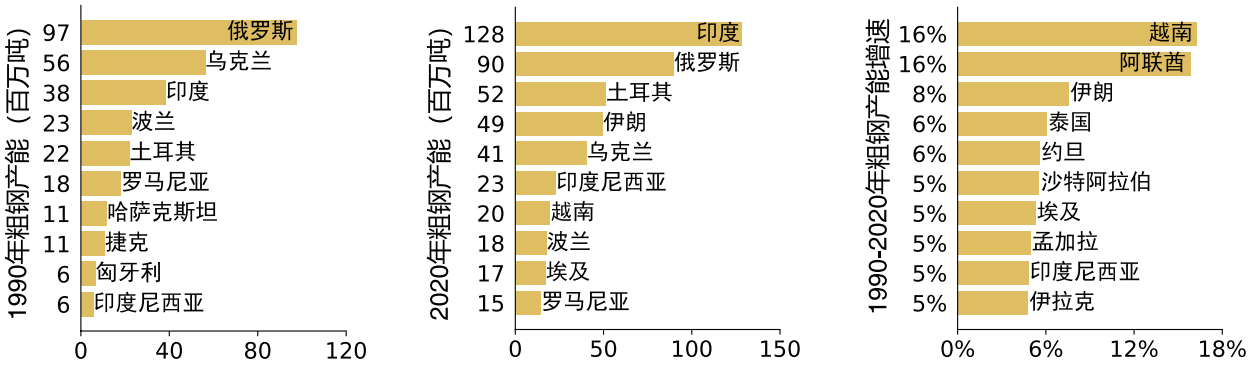


图 2–11 1990 年和 2020 年“一带一路”国家粗钢产能前十及 1990–2020 年间增速前十

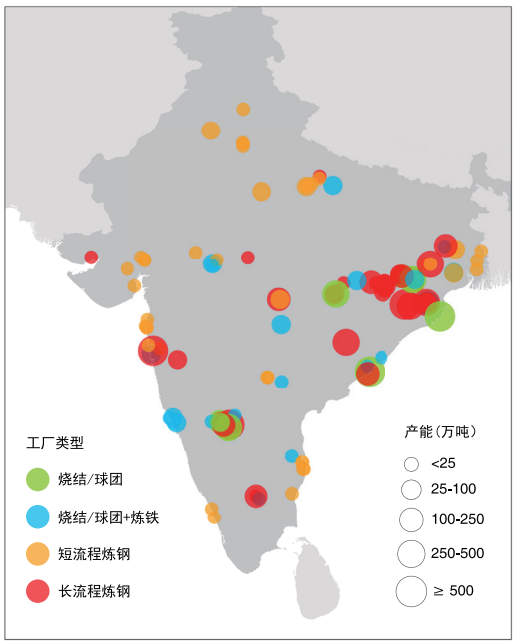


图 2–12 1990–2020 年印度新增钢铁产能分布

体随着经济社会发展钢铁需求增长迅速，产能扩张显著，如印度、印度尼西亚、越南、土耳其和伊朗等多国产能年均增速达到 5% 甚至 10%，与 1990 年相比在“一带一路”沿线国家粗钢产能中排序明显提升。

作为“一带一路”沿线国家钢铁行业快速扩张的代表性国家，印度钢铁行业发展势头迅猛，2010–2020 年间粗钢产能年均增速接近 4%，2020 年已接近 1.3 亿吨，成为“一带一路”沿线国家中粗钢产能最大的国家和世界第二钢铁生产国（图 2–11）。印度新建钢铁产能在多个邦均有分布，其中东部的奥里萨邦等地尤为突出（图 2–12）。除了发展传统基于高炉 – 转炉的长流程炼钢外，印度还大力发展以直接还原铁为主要原料的电炉炼钢技术，并大量进口废钢补充原料缺口（IEA, 2020）。在总体规模快速扩张的同时，需求增长推动印度建设了许多小型的高能耗钢铁生产设施，其吨钢能耗居高不下，环境问题突出（IEA, 2020），亟需探寻产业结构转型和高质量发展路径。

中国是当前世界钢铁生产第一大国，拥有超过 11 亿吨粗钢产能，占全球总产能的约 46%。中国钢铁行业在 2000 年后迅速发展，产能二十年间增加了约 4 倍，且形成了产能较为集中的分布格局（图 2–13）。华北地区的粗钢产能增长最为显著，产能占比在 2020 年接近全国的 40%（1990 年占比小于 20%），其增长主要归因于河北钢铁行业的迅速扩张（2000–2020 年年均增速 11%）。河北的铁矿石资源丰富，且毗邻煤炭大省山西，资源优势明显；同时其位于沿海大型

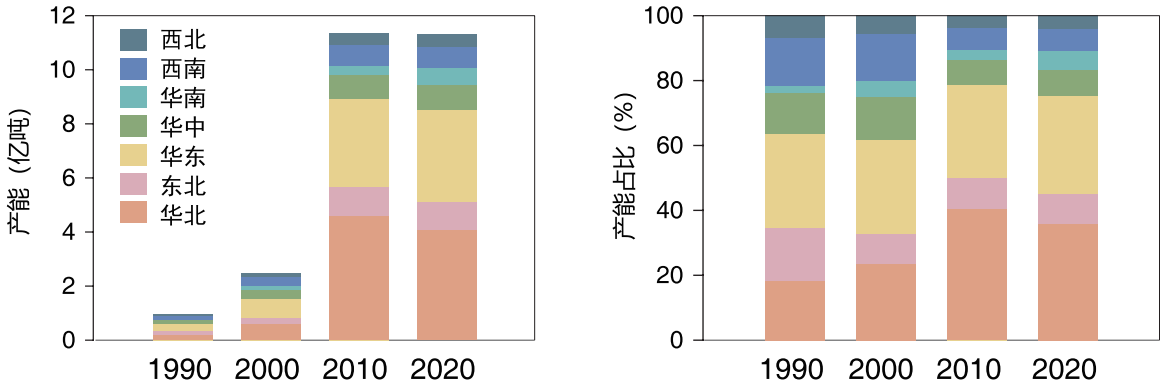


图 2–13 1990、2000、2010 和 2020 年中国分区域粗钢产能及其占比变化

港口辐射范围之内，进出口运输便利；京津冀地区的经济快速发展又催生了巨大的钢铁需求（中国钢铁工业年鉴编辑委员会，2021）。上述因素共同推动河北逐步发展成为中国钢铁生产的中心，2020 年其一省产能占比达到全国的 25% 左右。江苏和山东等省份近二十年新增大量钢铁产能的大量新增，使得华东地区成为另一个炼钢产能的增长热点。

中国钢铁行业发展和技术更替均十分迅速，近十年新建产能约 3.2 亿吨，同期也淘汰落后和过剩产能约 3.3 亿吨（Zheng et al., 2018; Zhang et al., 2019），因此 2010–2020 年中国粗钢产能基本保持稳定。同时，中国钢铁行业炼铁炼钢工艺装备自主集成、自主创新能力不断提高，在超薄钢和高强度钢材制造等方面取得重大技术突破，同时大力促进产业结构优化和节能减排，推动行业实现高质量发展（新华社，2018）。

经过近二十年的快速发展，我国钢铁行业现有设施平均服役年限较小，服役不满 15 年的设施占比超过 50%（图 2–14）。在“十五”计划中后期，我国钢铁市场利润可观，行业存在一定的大量投资涌入、粗放型发展现象，钢铁行业快速扩张，因此现有设施服役年限分布的峰值为 15–17 年。而近十年来我国实施严控产能新增等供给侧结构性改革措施，推动钢铁行业走上高质量发展道路。受煤铁资源禀赋、运输条件发展和本地需求增长等影响，不同省份钢铁行业发展程度存在差异。例如，河北、江苏、山东等钢铁生产大省在“十五”计划时期大幅扩张钢铁产能，当前设施的平均服役年限在 10–15 年之间；而上海等钢铁行业发展较早的地区设施平均服役年限较长。

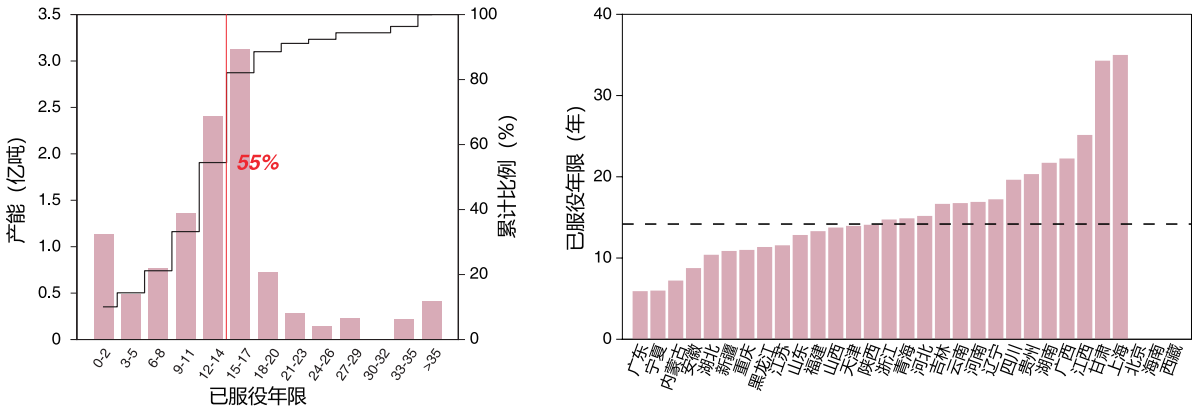


图 2–14 2020 年中国现役粗钢产能服役年限分布和各省（自治区、直辖市）平均服役年限（右图黑色虚线代表全国平均服役年限）

2.3 水泥行业

自 90 年代起全球水泥熟料产能和产量均持续增长，于近五年趋于稳定。1990 年全球水泥熟料产能约 9 亿吨，1990–2015 年间年均产能增速达 5.6%，2015 年增长到 35 亿吨。随着主要生产国需求趋于饱和，2015 年之后全球熟料产能稳定在 35–37 亿吨之间，产量亦稳定在 28–31 亿吨左右，产能利用率维持在 79–83% 之间。全球熟料产能在 2005–2015 年间扩张迅速，年均产能增速达 6%，当前全球服役年限小于 15 年的设施产能占比达 53%，熟料产能平均服役年限仅为 21 年。从生产工艺上看，新型干法产能占比达到 87%。

过去近三十年水泥行业在全球不同区域的发展速度差异明显。东亚、东南亚和中东等地的新兴经济体水泥需求激增，新建了大量大规模熟料生产线；非洲和中亚等地熟料产能也显著增加，

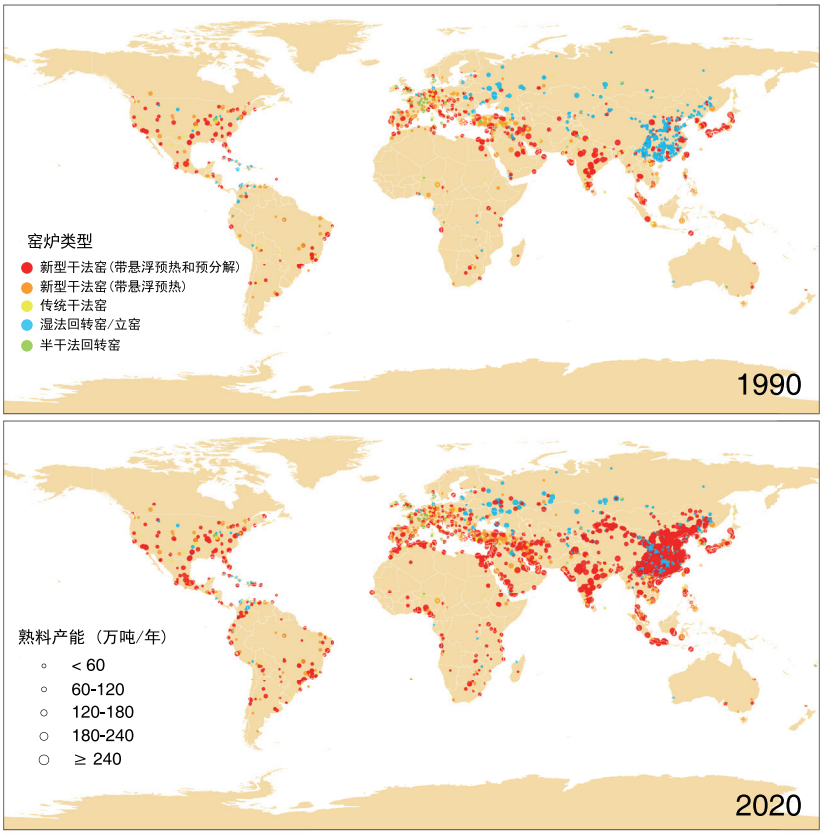


图 2–15 1990 和 2020 年全球水泥熟料企业空间分布（改编自 Chen et al., 2022）

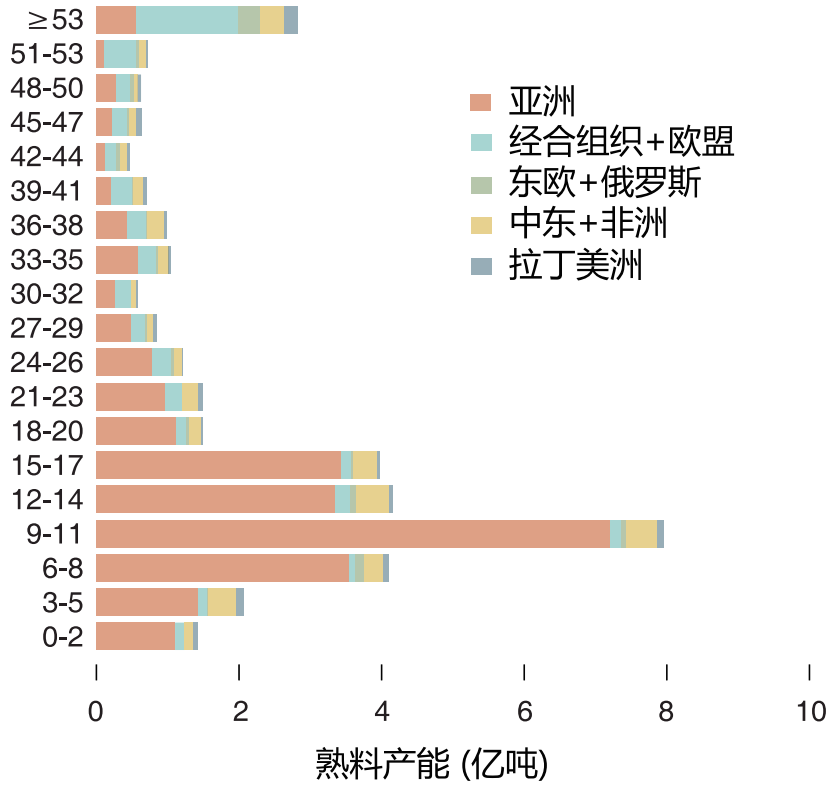


图 2–16 2020 年全球不同服役年限水泥熟料产能分布（改编自 Chen et al., 2022）

但新增生产线规模普遍偏小，仍处于产业发展早期；发达国家水泥需求饱和，维持了较为稳定的熟料产能和生产布局（图 2–15）。与钢铁行业相似，全球水泥生产重心已向新兴经济体发生明显转移。亚洲地区熟料产能全球占比从 1990 年的 35% 增长至 2020 年已达 70%，主导了全球水泥行业扩张进程。当前亚洲地区 63% 的熟料生产线服役年限未满 15 年，平均服役年限仅 15 年（图 2–16）。同期中东与非洲地区熟料产能增长同样迅速，2020 年产能全球占比达 10%。1990 年经合组织与欧盟地区熟料产能全球占比达 39%，2020 年下降至仅 14%，其现有熟料生产线平均服役年限达 41 年。

过去三十年间“一带一路”沿线国家水泥熟料产能持续增长，2020 年相较 1990 年均增幅为 3%，熟料总产能达 10.8 亿吨。由于近十年“一带一路”沿线国家城市化和现代化进程逐步深入，催生大量水泥需求，推动其水泥熟料产能迅速扩张，2010–2020 年累计新建产能达 2.3 亿吨，产能十年内增长了 24%。在“一带一路”沿线国家整体增长趋势下，不同国家之间熟料产能变化趋势存在明显差异。亚洲地区的越南、印度、印度尼西亚和中东的沙特阿拉伯、伊朗等国产能增长尤为迅速，其 1990–2020 年年均增速可达 3–7%；而东欧国家经济社会发展和基础设施建设起步较早，近三十年熟料产能较为稳定（图 2–17）。

越南是“一带一路”沿线国家中水泥行业快速扩张的代表性国家，其自 1990 年以来熟料产

能增长近 8 倍，2020 年达 0.9 亿吨，已成为世界第三大水泥生产国，仅次于中国和印度。近五年其水泥产业扩张尤为迅速，2015–2020 年年均熟料产能增速达 6%，熟料产量年均增速超 7%（图 2–18）。越南新建水泥生产线地理分布较为集中，大规模生产线多建设于越南北部主要经济区域红河三角洲一带，中部亦有较多新建生产线但规模较小，而南部地区新建生产线较少。近年来越南水泥行业逐步从国营企业主导向市场经济转型，大量新增产能进入市场，导致一定的产能过剩问题（Global Cement, 2012）。短期内向中国、菲律宾和孟加拉国等国增加出口在一定程度上缓解了这一问题，但并不能根本解决越南水泥行业供过于求的产业现状，长期来看仍需政府推动其供给侧结构性改革。

当前中国水泥产能和产量均居世界首位。过去三十年间中国水泥熟料产能以 10% 左右的年均增长率迅速发展，2020 年熟料总产能接近 20 亿吨。与钢铁行业地理分布更为集中的发展特征不同，水泥行业新增产能分布更为广泛。2020 年，除华东地区拥有接近 5 亿吨熟料产能外，华北、华中、西南和西北均有接近或超过 2.5 亿吨的熟

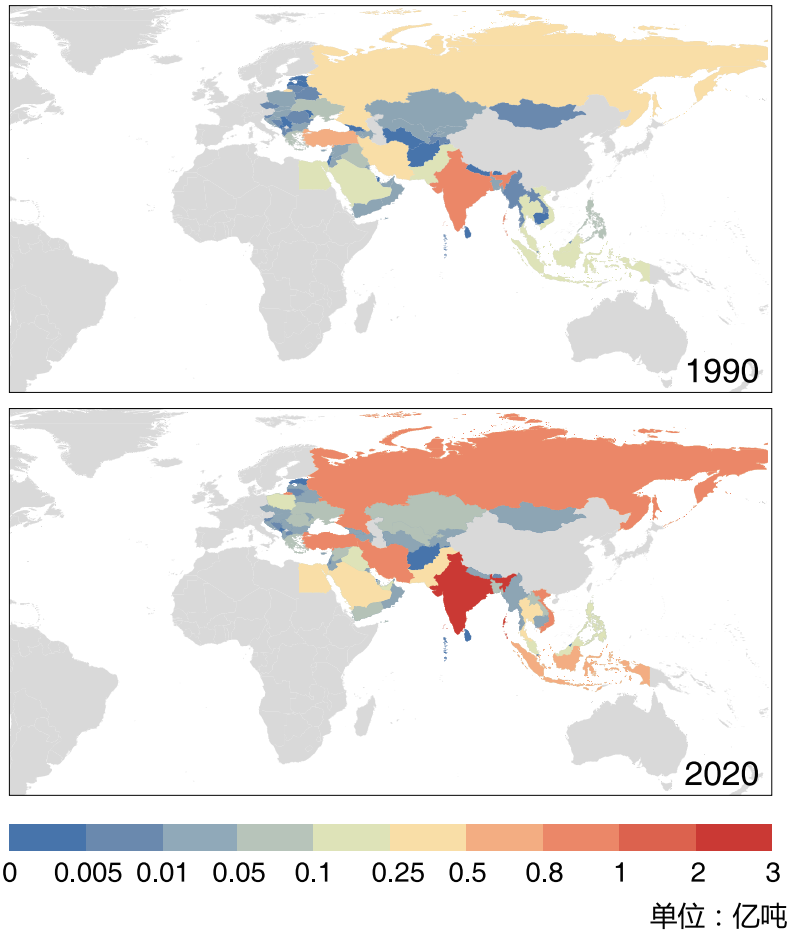


图 2–17 1990 年和 2020 年“一带一路”沿线国家熟料产能分布（改编自 Chen et al., 2022）

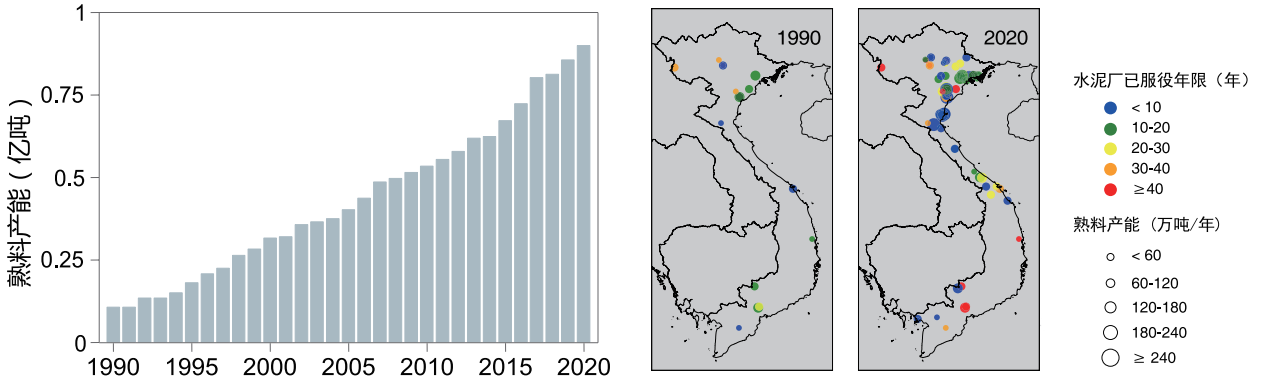


图 2–18 越南 1990–2020 年熟料产能变化趋势及 1990 年和 2020 年水泥熟料企业空间分布

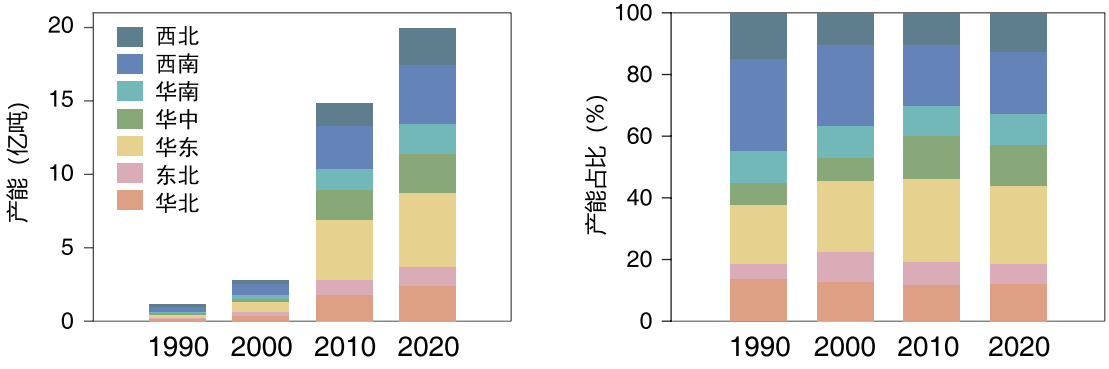


图 2–19 1990、2000、2010 和 2020 年中国分区域水泥熟料产能及其占比变化

料产能（图 2–19）。其中，安徽依托自身石灰石资源禀赋、长江水系运输优势和长江三角洲的巨大市场快速发展水泥行业（Liu et al., 2021），1990–2020 年间熟料产能年均增速超过 13%，2020 年产能接近 1.4 亿吨；此外，四川、山东和广东等省份近二十年熟料产能增长也位居全国前列。整体来看，我国水泥行业在各地区逐步发展形成了各自产能中心和优势企业，区域性特征明显，空间分布的集中度较低。

当前中国水泥行业设施平均服役年限较小，2020 年服役不满 15 年的设施占比超过 70%（图 2–20）。大规模新型干法水泥生产线的建设高峰期出现在 2010 年左右（Liu et al., 2021），因此现有水泥生产线服役年限分布的峰值为 9–11 年。与钢铁行业类似，各省份水泥行业快速发展的时间节点有所差异。大部分省份生产线平均服役年

限较为接近，均在 10–15 年之间。西藏、新疆和贵州等西北、西南省份水泥行业发展起步较晚，其生产线平均服役年限小于 10 年。而天津和上海等工业化和城市化起步较早的地区熟料生产线平均服役年限则超过 20 年。

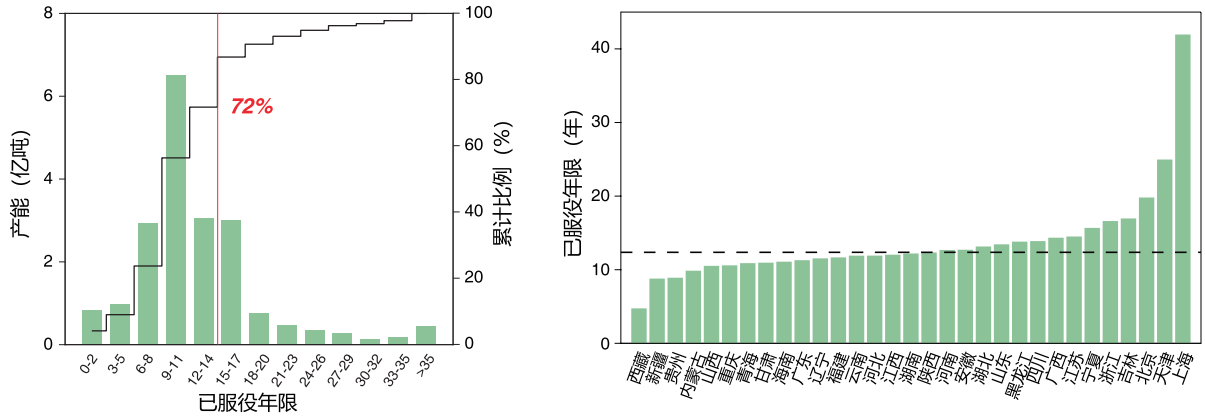


图 2–20 2020 年中国现役水泥熟料产能服役年限分布和各省（自治区、直辖市）平均服役年限（右图黑色虚线代表全国平均服役年限）

2.4 道路交通

1990 年以来全球机动车保有量持续增长，由 6.2 亿辆增长至 2020 年 13.6 亿辆，三十年间保有量增加了一倍（图 2–21）。全球机动车保有量增长主要来自经合组织与欧盟和亚洲两个区域，其保有量年均增速分别为 2% 和 9%，合计贡献了全球 80% 以上的机动车增量。由于机动车保有量增速存在地区差异，1990–2020 年间全球机动车保有量的区域分布也发生了显著的变化。1990 年，经合组织与欧盟机动车保有量占全球机动车保有量的 79%，而亚洲占比不足 5%；随着亚洲机动车保有量的快速增长，2020 年亚洲在全球机动车保有量中的占比增加至 24%，经合组织与欧盟的占比下降至 61%（闫柳，2021）。

当前全球机动车仍以汽油车和柴油车为主，汽柴油车保有量占比分别为 67% 和 32%，2020 年共消耗汽油 9.2 亿吨、柴油 7.6 亿吨（闫柳，2021；IEA, 2021a）。从分车型的燃料构成来看，全球各区域大型客车和重型货车均以柴油为最常使用的燃料，汽油车在同类型车辆中的保有量占比一般不超过 20%。小型客车和轻型货车的燃料构成则表现出明显的地区差异。以轻型货车为例，美国几乎所有轻型货车均为汽油车，而欧盟仅有不足 10% 的轻型货车使用汽油，其余均为柴油车。

2010–2020 年间，全球电动汽车保有量从 1.7 万多辆增长至超 1000 万辆，十年间增长 600 倍（IEA, 2021b; IEA, 2021c）。如图 2–22 所示，经合组织与欧盟国家电动汽车行业发展较早，2010 年占据了全球约 83% 的电动汽车市场。而亚洲地区电动汽车十年间保有量增长了 1600 多倍，2020 年已占据了全球约 44% 的市场份额，其中

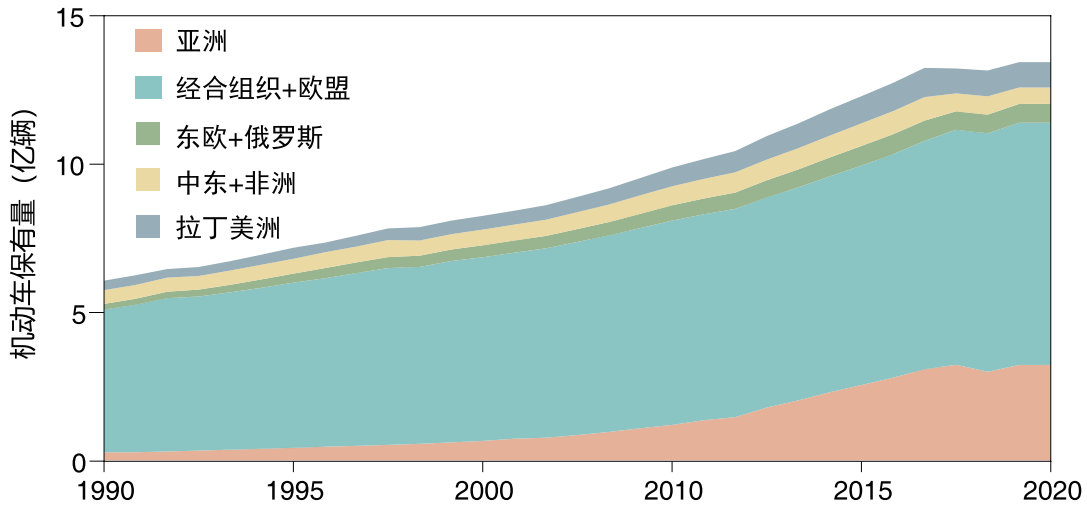


图 2–21 1990–2020 年全球机动车保有量变化趋势

中国已迅速成长为目前全球最大的电动汽车市场。电动汽车的蓬勃发展主要来自技术进步和政策激励的驱动。一方面，电池技术的发展创新带来了电动汽车续航能力的有效提升和成本的降低，使得电动汽车的市场竞争力大幅增强；另一方面，各国陆续出台了电动汽车购置补贴、充电基础设施建设、燃油车销售限制等政策，进一步推动了以电动汽车取代化石燃料车的转型进程。

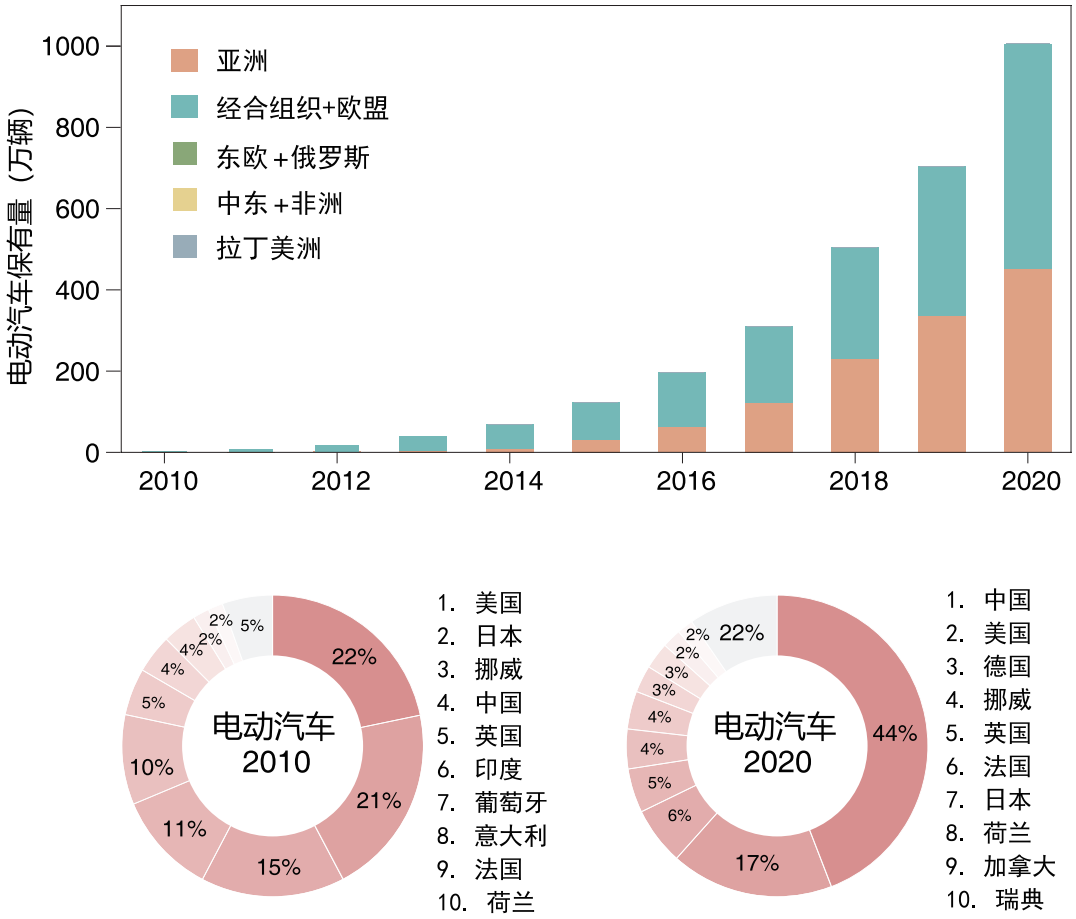


图 2–22 2010–2020 年全球电动汽车保有量及排名前 10 国家



03

第三章

全球能源基础设施碳排放及驱动因素

3.1 电力行业

随着社会经济的快速发展和电力需求的蓬勃增长，全球火电行业碳排放近三十年来总体呈增长趋势（见图 3–1）。全球火电行业碳排放从 1990 年的 75 亿吨增加至 2020 年的 132 亿吨，年均增长率约为 2%。全球火电行业碳排放经历了快速增长期（1990–2010 年）和平稳期（2010–2020 年）。在快速增长期，全球火电行业碳排放以 3% 的年均速率增长。而随着煤电比例逐步下降，近十年全球火电行业碳排放进入平稳期，年均增长速度放缓到 1% 左右。自 2018 年起全球火电行业碳排放呈下降态势，2018–2020 年排放下降了 2%，这主要与经合组织与欧盟燃煤电厂排放持续下降和亚洲燃煤电厂排放增速放缓有关。

燃煤电厂对全球火电行业碳排放的贡献最大。全球燃煤电厂迅速增长，主导了过去三十年火电行业的碳排放变化趋势，2020 年全球燃煤电厂碳排放占全球火电行业碳排放总量的 70%。全球燃气电厂碳排放持续增加，年均排放增速达 4%，2020 年燃气电厂碳排放占火电行业排放总量的 21%。从装机容量分布来看，中大型火电机组碳排放呈上升趋势，2020 年，大于 600 兆瓦的火电机组碳排放占比最大（28%），而小于 10 兆瓦的火电机组排放仅占 3%。

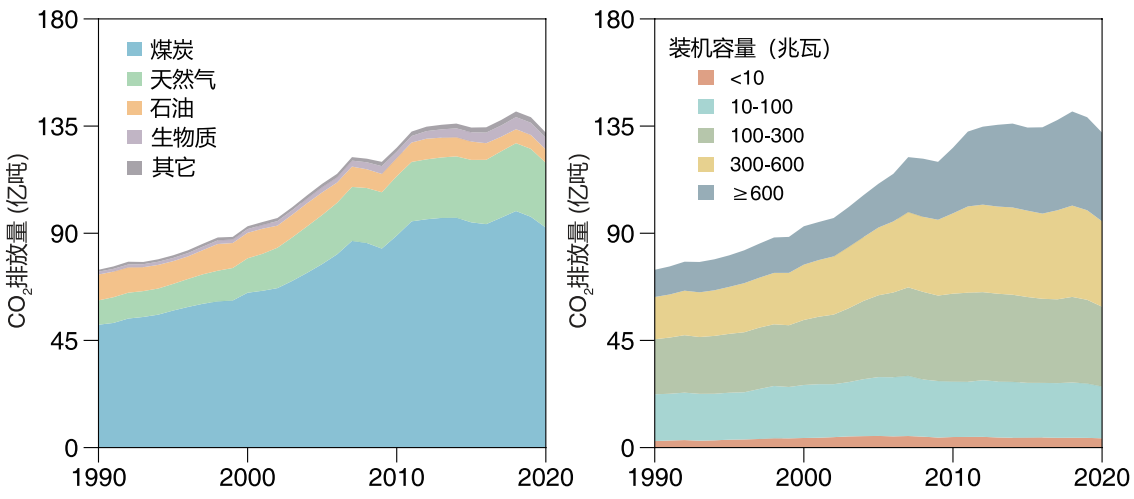


图 3–1 1990–2020 年全球火电行业分燃料类型和分装机容量规模 CO_2 排放量（改编自 Qin et al., 2022）

服役年限较短的火电机组对全球火电行业碳排放贡献显著，火电行业低碳转型任重道远。在电力需求迅速增长的背景下，火电基础设施快速扩张，2020 年，全球服役年限在 20 年以内的火电机组贡献了 61% 的火电行业碳排放，服役年限在 10 年以内的火电机组贡献了 37% 的排放（图 3–2）。新建的火电机组满足了社会经济发展需求，同时也带来了较强的碳锁定效应，为火电行业深度脱碳带来了严峻的挑战。

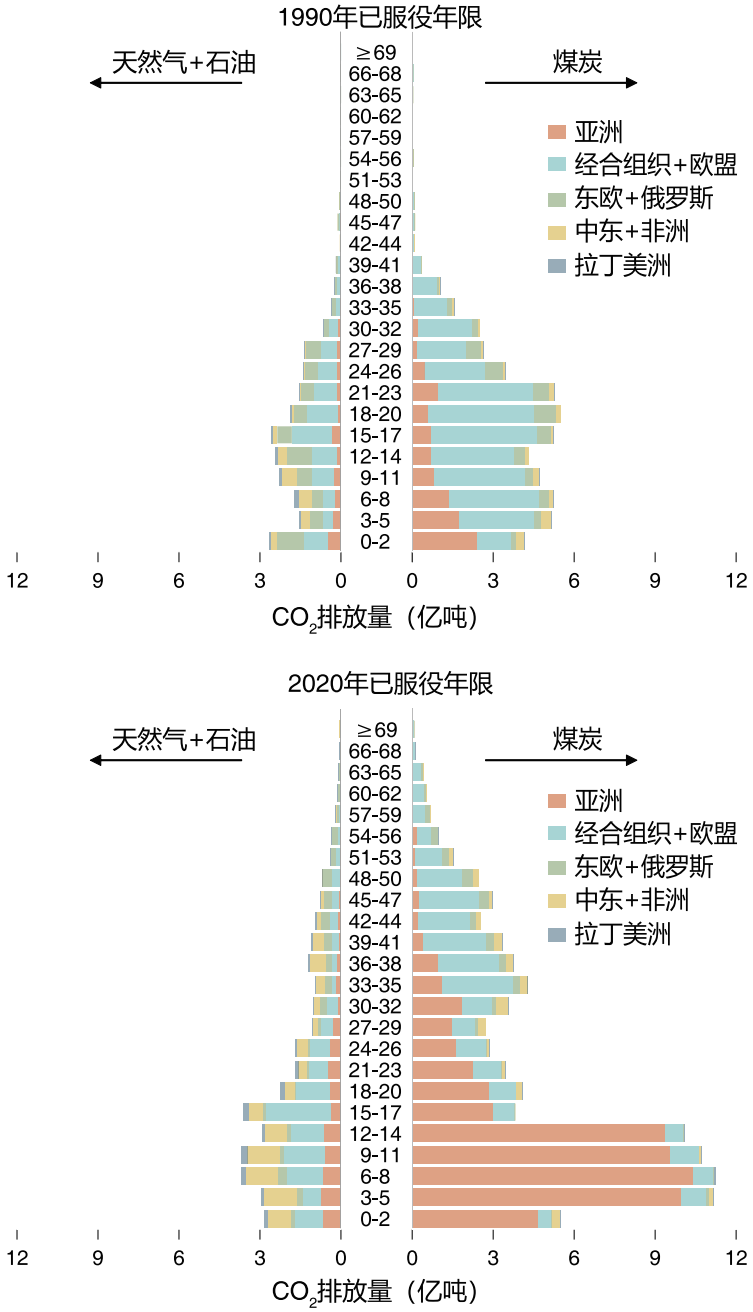


图 3–2 1990 和 2020 年全球不同服役年限火电机组的 CO_2 排放分布（改编自 Qin et al., 2022）

过去三十年全球火电行业碳排放受电力需求变化、可再生能源发展、燃料结构变化和发电效率提升等多种因素共同影响。电力需求变化是全球火电行业碳排放上升的重要驱动因素，使 1990–2000、2000–2010 和 2010–2020 期间火电行业碳排放分别增加了 31%、45% 和 21%（图 3–3）。而发电效率提升是推动碳排放下降的主要因素，其次是燃料结构变化和可再生能源发展。不同时期全球火电行业碳排放驱动力变化与政策演进和技术进步关系密切。例如，在大力推广清洁能源和可再生能源技术不断进步的背景下，近十年来可再生能源的快速发展对降低全球火电行业碳排放起到了重要作用。

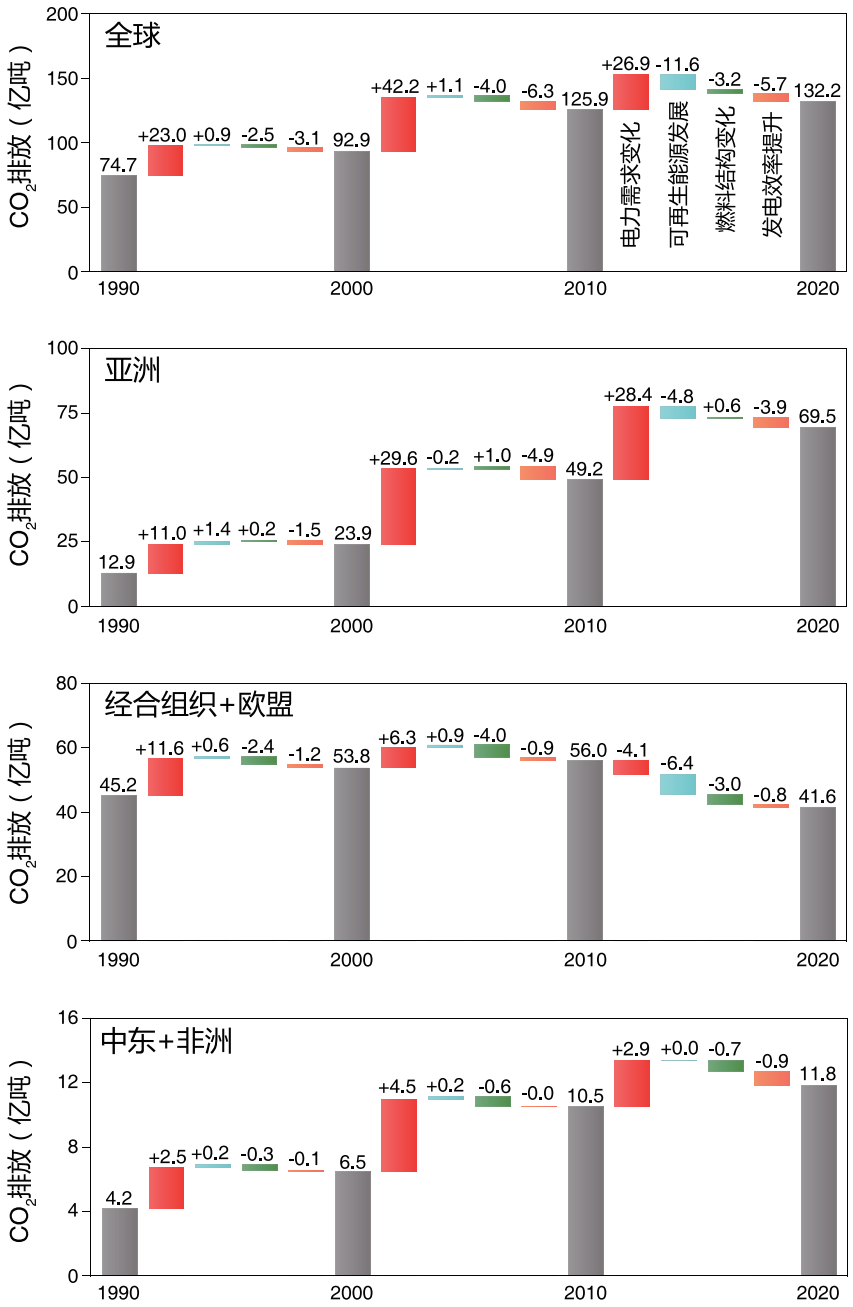


图 3–3 1990–2020 年全球及区域火电行业 CO_2 排放变化驱动因素（改编自 Qin et al., 2022）

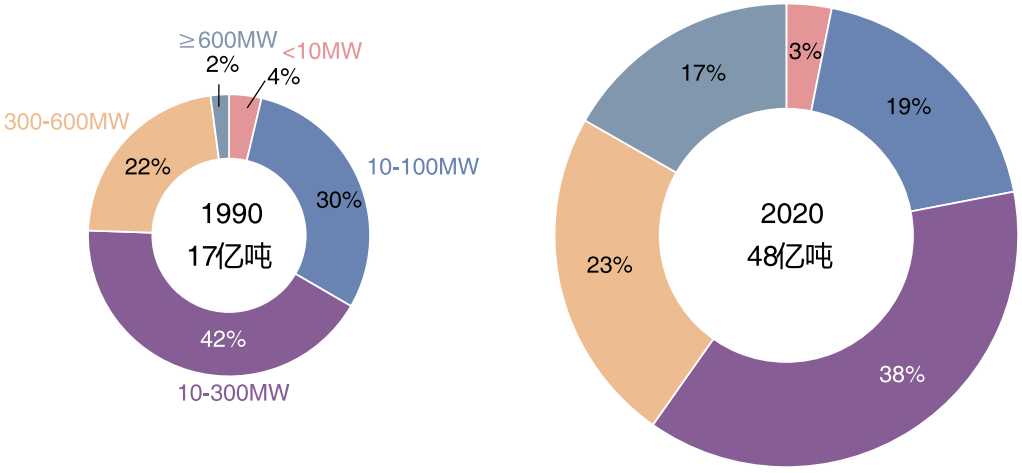


图 3–4 1990 和 2020 年“一带一路”沿线国家不同装机规模的火电机组 CO_2 排放贡献

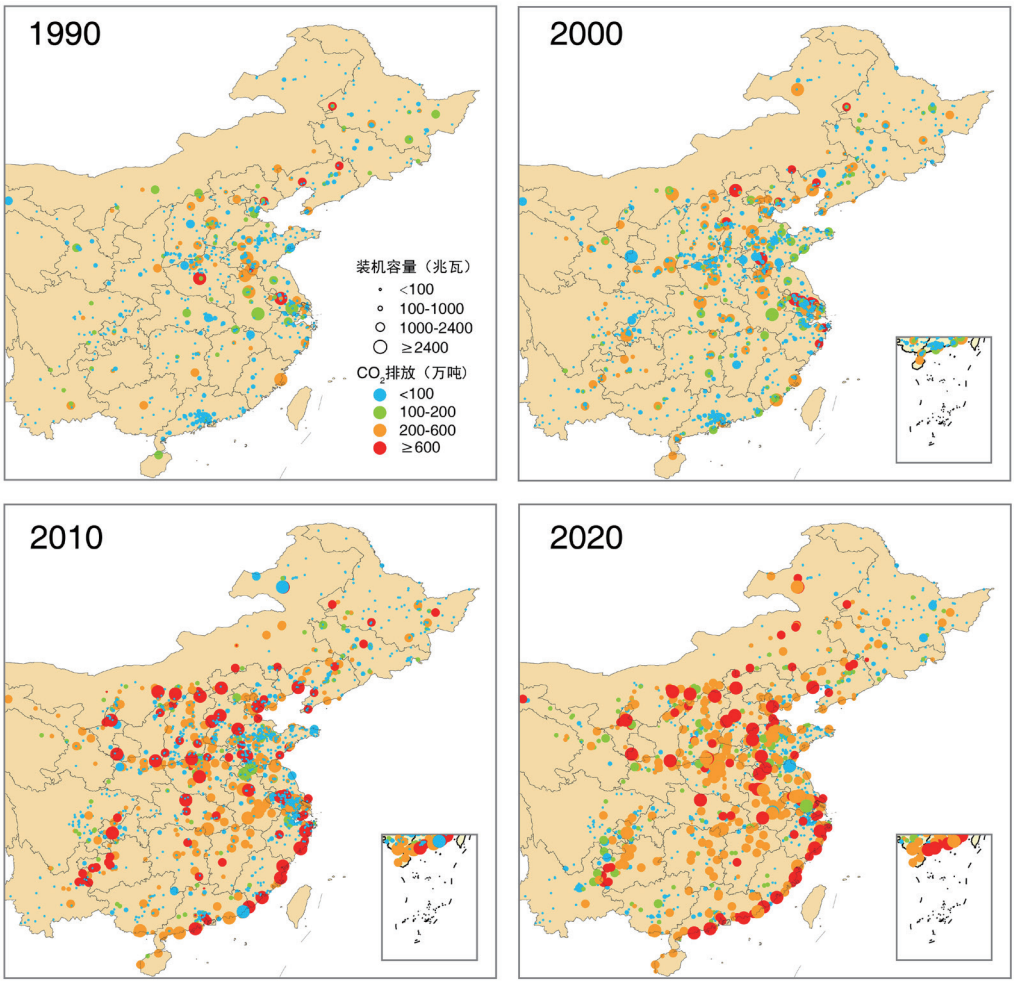


图 3–5 1990、2000、2010 和 2020 年中国燃煤电厂 CO_2 排放空间分布

区域层面火电行业碳排放变化趋势及驱动因素存在显著差异。上世纪九十年代以前，发达国家对火电行业碳排放有重要贡献，以经合组织与欧盟为例，1750–1990 年间火电行业累积排放约 1000 亿吨 CO_2，占全球火电行业累积碳排放的近 80%（Hoesly et al., 2018）。1990 年以来，经合组织与欧盟火电行业经历了先上升后下降的过程。通过淘汰燃煤电厂、加速燃气电厂新建、发展可再生能源电力等一系列措施，经合组织与欧盟 2020 年火电行业碳排放比 2010 年下降了 26%。亚洲、中东和非洲等发展中地区火电行业碳排放的增加主要受电力需求快速增长的影响。与此同时，上述区域通过提升发电效率、大力发展可再生能源等方式也有效减缓了碳排放增速。

在电力需求快速增长驱动下，新兴经济体火电行业碳排放增长迅速。“一带一路”沿线国家火电行业碳排放从 1990 年的 27 亿吨增长到 2020 年的 48 亿吨，三十年间增长了 78%（见图 3–4）。其中，1990–2020 年间印度尼西亚和越南火电行业碳排放年均速率高达 10% 左右，印度火电行业碳排放年均增速在 6% 左右。

随着过去三十年社会经济的快速发展和用电需求的上涨，中国火电行业碳排放在 1990–2020 年间增加了 6 倍，从 5 亿吨增加到 37 亿吨。煤电对中国火电行业碳排放贡献最大，贡献了当前火电行业碳排放的 97%。随着“上大压小”和落后产能淘汰等一系列政策的实施，2005 年以来小于 10 兆瓦小型机组的排放占比不断下降，而大于 600 兆瓦的大型机组的排放占比持续上升。三十年间火电行业碳排放的时空分布格局发生了显著的变化（见图 3–5）。2000 年之后煤电建设迎来高速发展期，煤炭资源丰富的区域和经济发达的沿海地区新建了大量煤电机组（Liu et al., 2015），碳排放增长最为显著。

技术进步和发电效率提升对减缓中国火电行业碳排放增速发挥了积极作用。随着煤电技术的进步和高质量发展，大型煤电机组快速增加（见图 3–6）。中国大于 600 兆瓦的煤电机组占比从 1990 年的 1% 上升至 2020 年的 48%，而小于 10 兆瓦和 10–100 兆瓦的煤电机组分别下降至 1% 和 6%。煤电装机结构优化促进了中国火电行业发电效率的整体提升（Liu et al., 2015）。中国火电行业发电标煤耗从 1990 年的 408 gce/kwh 下降到 2020 年的 308 gce/kwh，三十年间累计减少碳排放 159 亿吨。

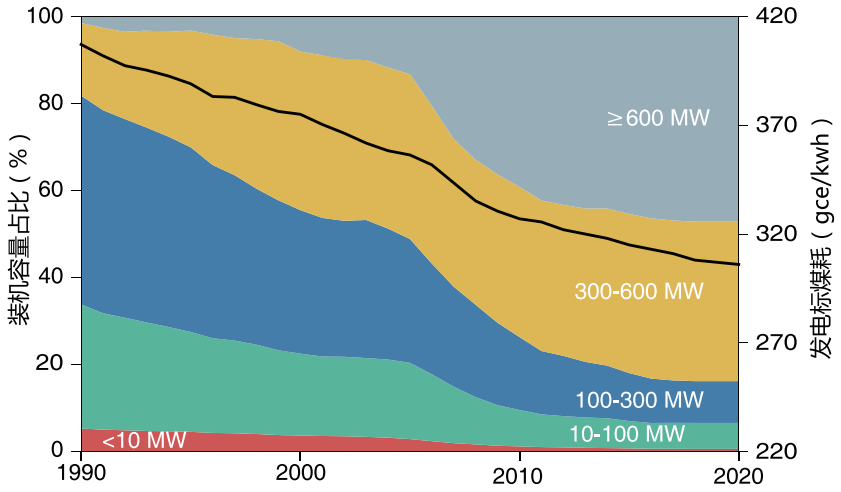


图 3–6 1990–2020 年中国煤电装机结构演变（改编自 Qin et al., 2022）

3.2 钢铁行业

近三十年全球钢铁行业碳排放大幅增长。2020 年全球钢铁行业共排放 27.2 亿吨 CO_2，是 1990 年碳排放量的约 2.5 倍（图 3–7）。由于长短流程差异悬殊的碳排放强度和不断扩张的长流程炼钢规模，全球钢铁行业碳排放增长主要来自长流程炼钢过程。炼钢前的多个铁矿石处理和冶炼工序是长流程炼钢过程的主要碳排放来源，当前炼铁工序排放占比达全球排放总量的约 75%，烧结等炼铁前工序排放占比也达 16%，而炼钢工序排放占比较低。与长流程炼钢不同，短流程炼钢过程的主要工序是以废钢为主要原料的电炉冶炼，因此排放强度远低于长流程炼钢过程。在废钢资源充足、成本具有竞争力的情况下提高短流程炼钢比例是减缓全球钢铁行业碳排放增长的有效途径。

在全球排放增长的整体趋势下，近三十年不同区域钢铁行业碳排放变化差异显著。发达国家钢铁行业起步远早于发展中国家，例如经合组织与欧盟贡献了 1750–1990 年间钢铁行业化石燃料燃烧累积碳排放的近 70%（Hoesly et al., 2018）。上世纪九十年代钢铁行业碳排放亦主要来自发达国家，1990 年经合组织与欧盟钢铁行业碳排放占全球排放的约 42%（图 3–7）。过去三十年间发达国家利用自身废钢资源提高短流程炼钢比例，并通过技术升级等方式推动能效提升，因此经合组织与欧盟钢铁行业碳排放持续下降（图 3–8），2020 年碳排放水平仅为 1990 年的 65%，在全球排放中的占比下降到 11%。东欧与俄罗斯 2020 年碳排放相较 1990 年亦有所下降。

需求激增刺激下发展中国家钢铁生产的大规模扩张推动亚洲地区钢铁行业碳排放由 1990 年约 3 亿吨激增至 2020 年达 21.7 亿吨，是近三十年全球钢铁行业碳排放增加的主要驱动因素，当前排放占比达全球排放的约 80%。钢铁产量激增

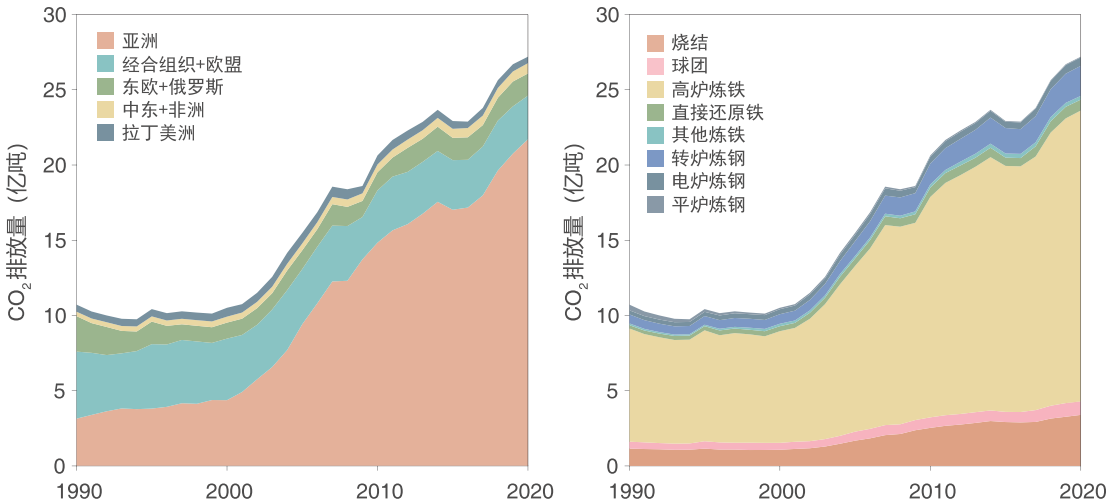


图 3–7 1990–2020 年全球钢铁行业分区域和分生产工序 CO_2 排放量

是亚洲地区钢铁行业碳排放增长的主要驱动力。受到生产技术水平等因素影响，亚洲地区钢铁行业能效水平仍有较大进步空间；废钢资源短缺、成本偏高则限制了其短期内技术转型（发展短流程炼钢）进程。近年来亚洲等地区钢铁行业快速扩张也使服役年限较小的设施排放占比偏高，2020 年服役年限在 10 年以内的设施排放占全行业排放的 23%。

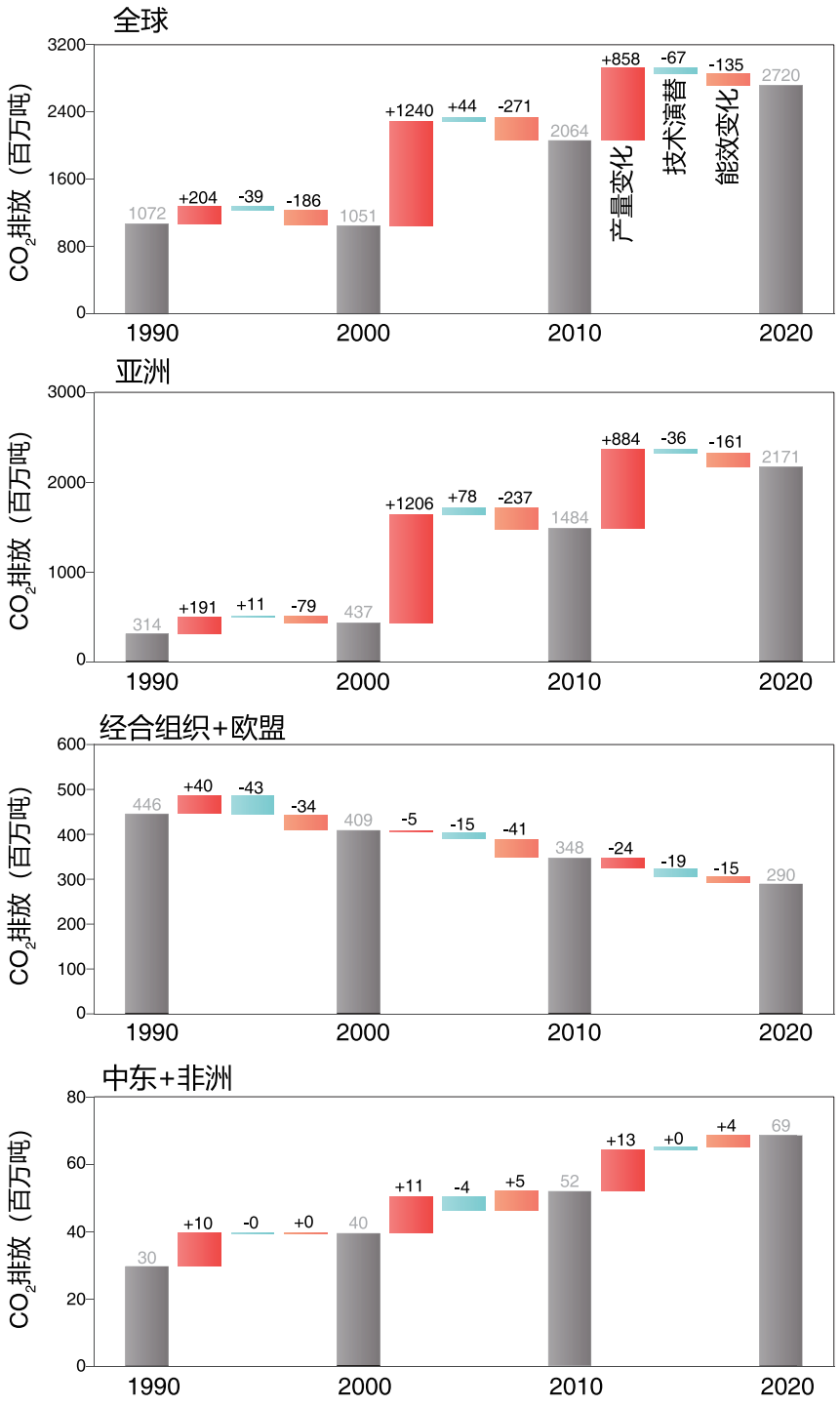


图 3–8 1990–2020 年全球及区域钢铁行业 CO_2 排放变化驱动因素

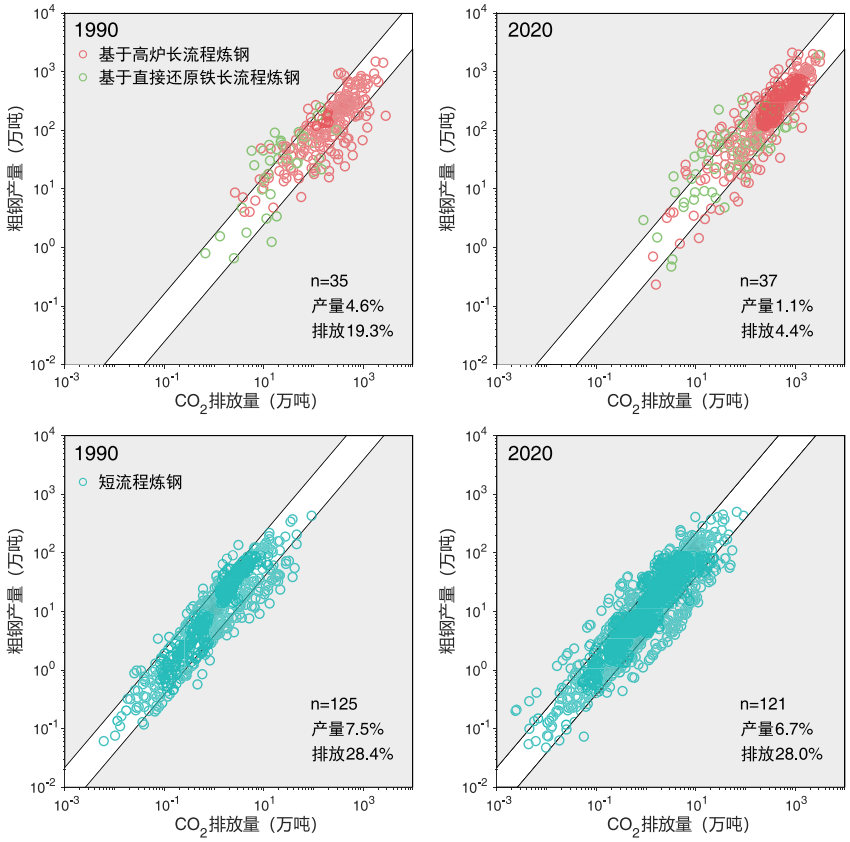


图 3–9 1990 年和 2020 年全球不同类型炼钢工厂粗钢产量与 CO_2 排放量关系

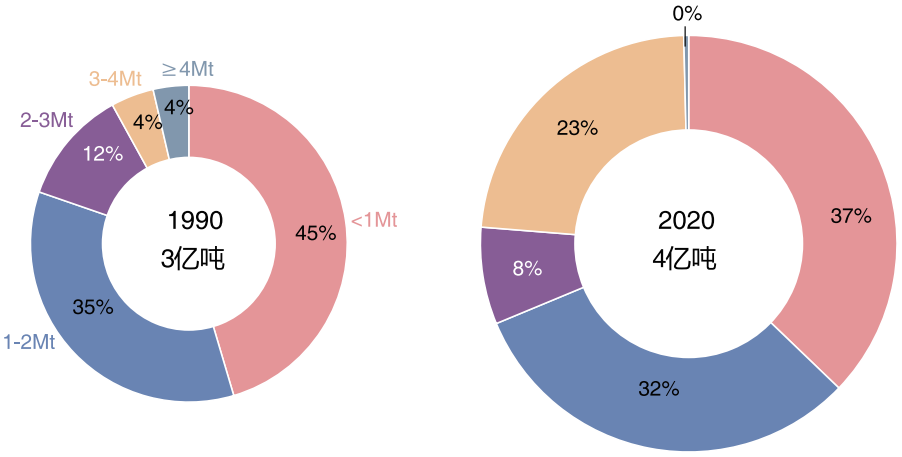


图 3–10 1990 和 2020 年“一带一路”沿线国家不同产能规模的炼铁高炉 CO_2 排放贡献

全球钢铁行业现役设备在技术水平、能源效率和排放强度方面存在巨大差异。图 3–9 给出了全球长流程和短流程炼钢企业单位粗钢产量的碳排放，并以 1990–2020 年逐年同类企业吨钢碳排放强度第 90 分位数的平均值为界识别出相对低效（即吨钢碳排放强度相对较高）的企业。以长流程炼钢企业为例，2020 年全球相对低效的企业生产了约 1% 的长流程粗钢，但贡献了长流程炼钢企业约 4% 的碳排放，且这一状况在近三十年钢铁行业发展过程中一直存在。尽管短流程炼钢企

业中也存在部分相对低效的企业，但其整体碳排放强度显著低于长流程炼钢企业。因此，在氢能冶金等新兴低碳炼钢技术尚未成熟的现阶段，全球钢铁行业实现碳减排一方面需要通过生产流程改进和设备技术进步等努力提升能效水平，另一方面要建立更为完善的废钢资源回收利用体系，充分利用废钢资源提高短流程炼钢生产的比例。

“一带一路”沿线国家钢铁行业碳排放在2000 年后持续增长。1990 年“一带一路”沿线国家钢铁行业碳排放总量约 3.8 亿吨，俄罗斯和乌克兰钢铁行业起步较早，当时其钢铁行业合计排放超 2 亿吨 CO_2。但是受到前苏联和东欧剧变影响，俄罗斯、乌克兰和罗马尼亚、捷克、波兰等东欧国家九十年代钢铁行业规模缩减，碳排放随之减少。而同期其他“一带一路”沿线国家钢铁行业尚未进入快速发展期，2000 年“一带一路”沿线国家钢铁行业碳排放降至 2.7 亿吨。2000 年后，俄罗斯钢铁行业有所回暖，碳排放逐步回升，同时南亚和东南亚多国尤其是印度的钢铁生产扩张迅速，导致“一带一路”沿线国家钢铁行业碳排放持续攀升。2020 年“一带一路”沿线国家钢铁行业碳排放上升至接近 6 亿吨，其中印度和俄罗斯的排放量较大，分别排放 2.6 和 1.6 亿吨 CO_2。

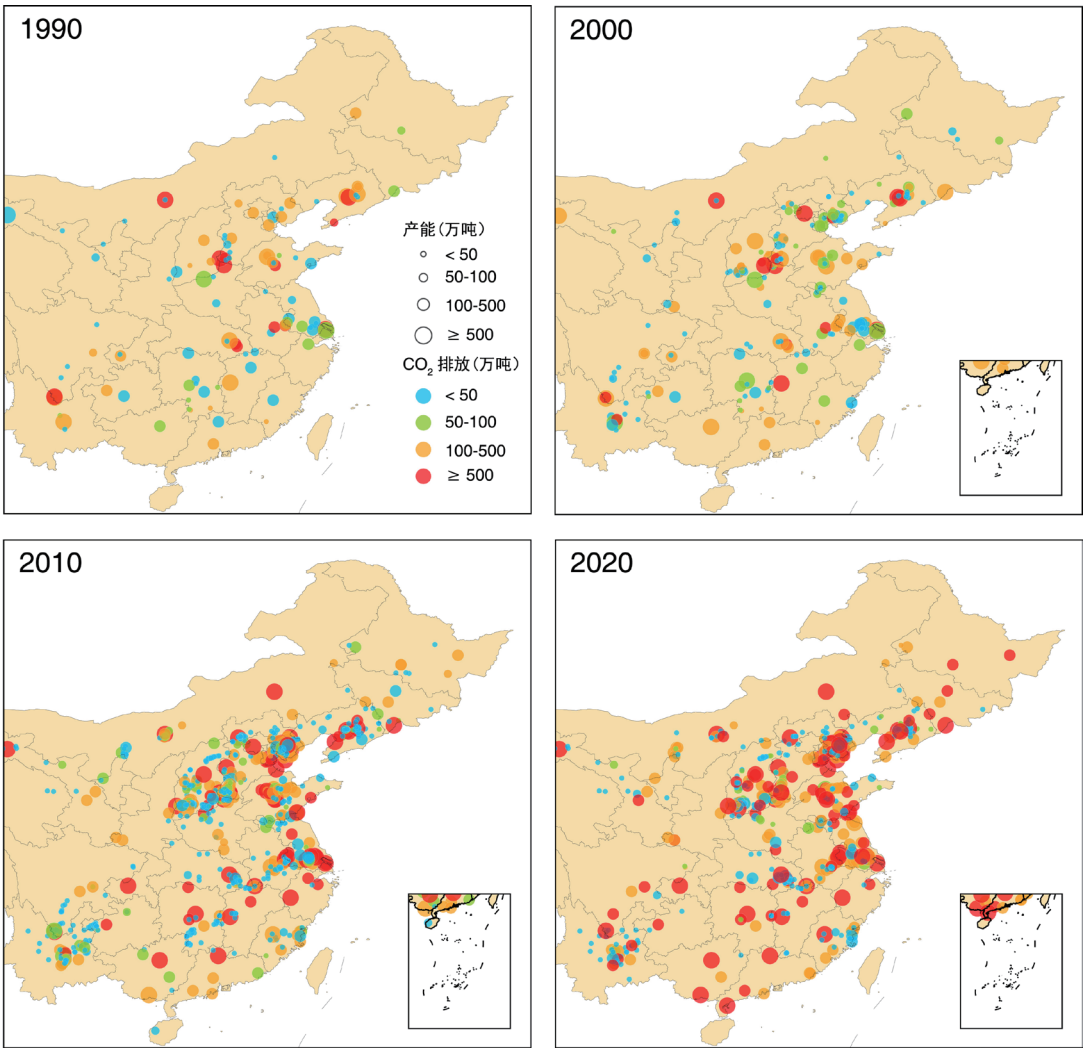


图 3–11 1990、2000、2010 和 2020 年中国钢铁厂 CO_2 排放空间分布

随着近二十年“一带一路”沿线国家钢铁行业持续发展，产能较大的生产设施逐渐增加，其排放贡献也逐步增大。以钢铁行业碳排放主要设施炼铁高炉为例，1990 年“一带一路”沿线国家产能小于 100 万吨的高炉碳排放占高炉总排放量的接近 50%，产能大于 200 万吨的高炉碳排放占比约 20%（图 3–10）。随着大型生产设施的不断新建，到 2020 年“一带一路”沿线国家高炉总排放量中产能大于 200 万吨的高炉贡献占比上升至超过 30%，而产能小于 100 万吨的高炉排放贡献明显下降。

过去三十年间中国钢铁行业碳排放增长显著，1990–2020 年间增加了约 7 倍，2020 年排放量达到 18.1 亿吨 CO_2，且以长流程炼钢工艺贡献为主。在排放空间分布上，河北在过去三十年的大部分时段内都是中国钢铁行业碳排放的最大贡献者，2000–2010 年碳排放年均增速达到 20%，逐步拉大与其他省份差距，2020 年其贡献了全国钢铁行业碳排放总量的 26%（图 3–11）。河北省内唐山、邯郸和秦皇岛等多个城市依托煤铁资源、港口运输和京津冀本地市场大力发展钢铁生产，逐渐使河北成为我国钢铁行业中心。新世纪前十年中国钢铁行业的快速扩张显著改变了全国钢铁行业碳排放空间分布格局。上世纪九十年代，辽宁（鞍钢所在地）和上海（宝钢所在地）等拥有大规模老牌钢铁企业的地区钢铁碳排放较高，2000 年后江苏、山东和山西等省份钢铁行业扩张迅速，碳排放明显上升。整体来看，中国钢铁行业碳排放空间集中度较高。2020 年排放量最大的 5 个省份贡献了排放总量的 59%（前十为 74%），与钢铁产能空间分布集中度较高的现状相一致。

中国钢铁行业近二十年快速发展的同时积极推动节能减排和结构优化，降低碳排放增长速度。2000 年后中国钢铁生产节能技术不断进步，碳排放强度下降幅度超 30%，2020 年下降到 1.7 吨 CO_2/ 吨钢。同时，中国钢铁行业积极推动落后老旧的高能耗设施退役，并在近十年开始严控新增产能，避免高能耗生产方式盲目扩张。以长流程炼钢过程的主要碳排放设施高炉为例，服役超过 30 年的老旧设施碳排放比例近年来不断下降，2020 年仅占高炉碳排放总量的不足 3%；2010 年后服役不足 10 年的设施碳排放占比也不断减少，2020 年在高炉碳排放总量中的占比下降至约 25%（图 3–12）。

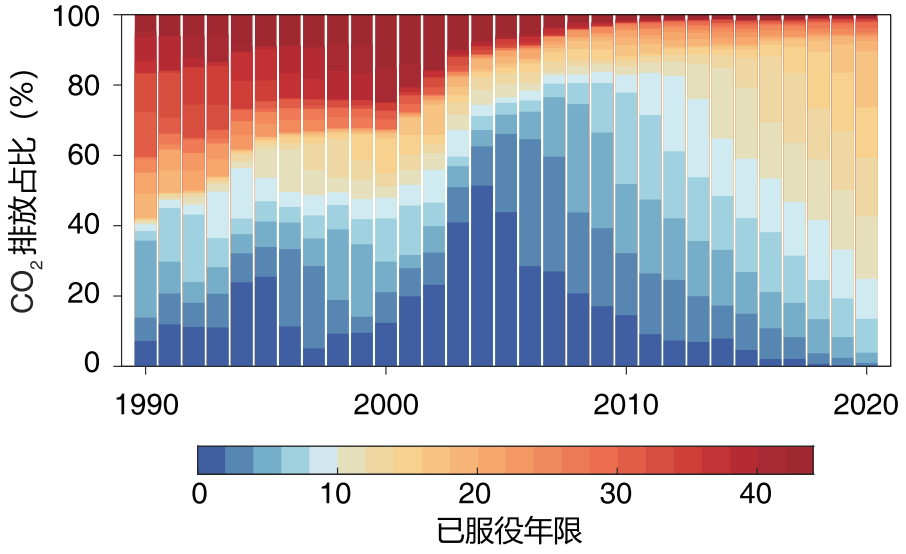


图 3–12 1990–2020 年中国不同服役年限区间的炼铁高炉 CO_2 排放量贡献变化

3.3 水泥行业

过去三十年间全球水泥行业碳排放快速增长，在 1990 年至 2020 年增加了 1.9 倍，2020 年排放达到 25.2 亿吨 CO_2。随着全球水泥行业整体能耗水平下降，过程排放在水泥行业碳排放中的占比逐渐增大。1990 年，过程排放在水泥行业碳排放中的占比为 57%，到 2020 年已上升至 64%（图 3–13）。1990–2020 年间全球水泥需求大幅上升是驱动水泥行业碳排放增长的最主要因素，而水泥熟料比下降、窑炉技术升级、能效提升和燃料结构变化等则有效降低了水泥行业碳排放强度，减缓了碳排放的增长（图 3–13）。1990–2020 年间生产每吨水泥的碳排放量从 0.74 吨 CO_2 下降至 0.59 吨 CO_2。水泥熟料生产线的生产工艺近三十年亦发生巨大变化，2000 年以前全球熟料生产线中立窑、湿法回转窑、半干法回转窑和传统干法等工艺占全球水泥行业排放量一半以上。2000–2010 年间新型干法技术应用迅速增长，2010 年新型干法工艺贡献了排放量的 85%，2020 年占比进一步上升至 96%。

尽管排放呈现整体快速上升趋势，近三十年不同区域水泥行业碳排放变化及其背后驱动力差异显著。与钢铁行业类似，由于发达国家基础建设起步较早，上世纪九十年代以前全球水泥行业碳排放主要来自发达国家。据测算，1750–1990 年间全球水泥行业累积碳排放的 60% 以上来自经合组织与欧盟（Andrew, 2019），1990 年经合组织与欧盟水泥行业碳排放在全球总排放量中占比仍有 45%。随着水泥需求趋于饱和，近三十年水泥生产规模较为稳定，2020 年经合组织与欧盟水泥行业碳排放相较 1990 年略有下降，排放约 3.7 亿吨 CO_2。过去三十年亚洲地区水泥行业的迅速发展是全球水泥行业碳排放增长的主要推动力。1990–2020 年亚洲地区水泥行业碳排放增长约 5.5 倍，2020 年达 17.8 亿吨，排放占全球水泥行

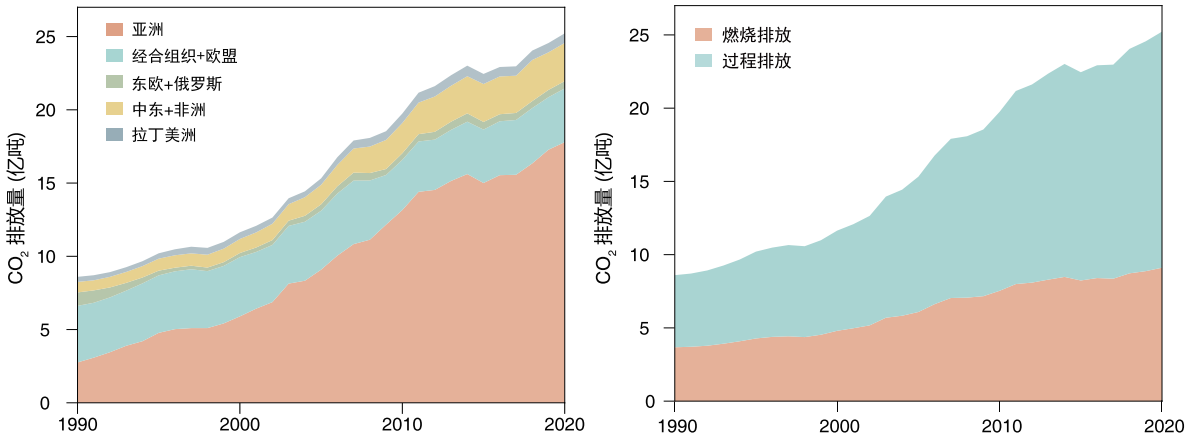


图 3–13 1990–2020 年全球水泥行业分区域和分来源 CO_2 排放量（改编自 Chen et al., 2022）

业排放总量的 71%。亚洲地区大量发展中国家水泥需求激增拉动其产量增加，成为驱动亚洲水泥行业碳排放增长的主要因素；2000 年后水泥熟料比降低和生产能耗下降等则有效减缓了亚洲地区水泥行业碳排放增加（图 3–14）。受到基础设施建设需求拉动，中东和非洲地区新兴经济体水泥行业碳排放在近十五年快速增长。中东和非洲地区 2005–2020 年水泥行业排放年均增速达 5%，2020 年碳排放量为 2.6 亿吨。

过去三十年间全球水泥行业内小型（熟料产能小于 60 万吨）熟料生产线碳排放贡献逐渐下降，中型（产能 60 到 120 万吨之间）和大型（产

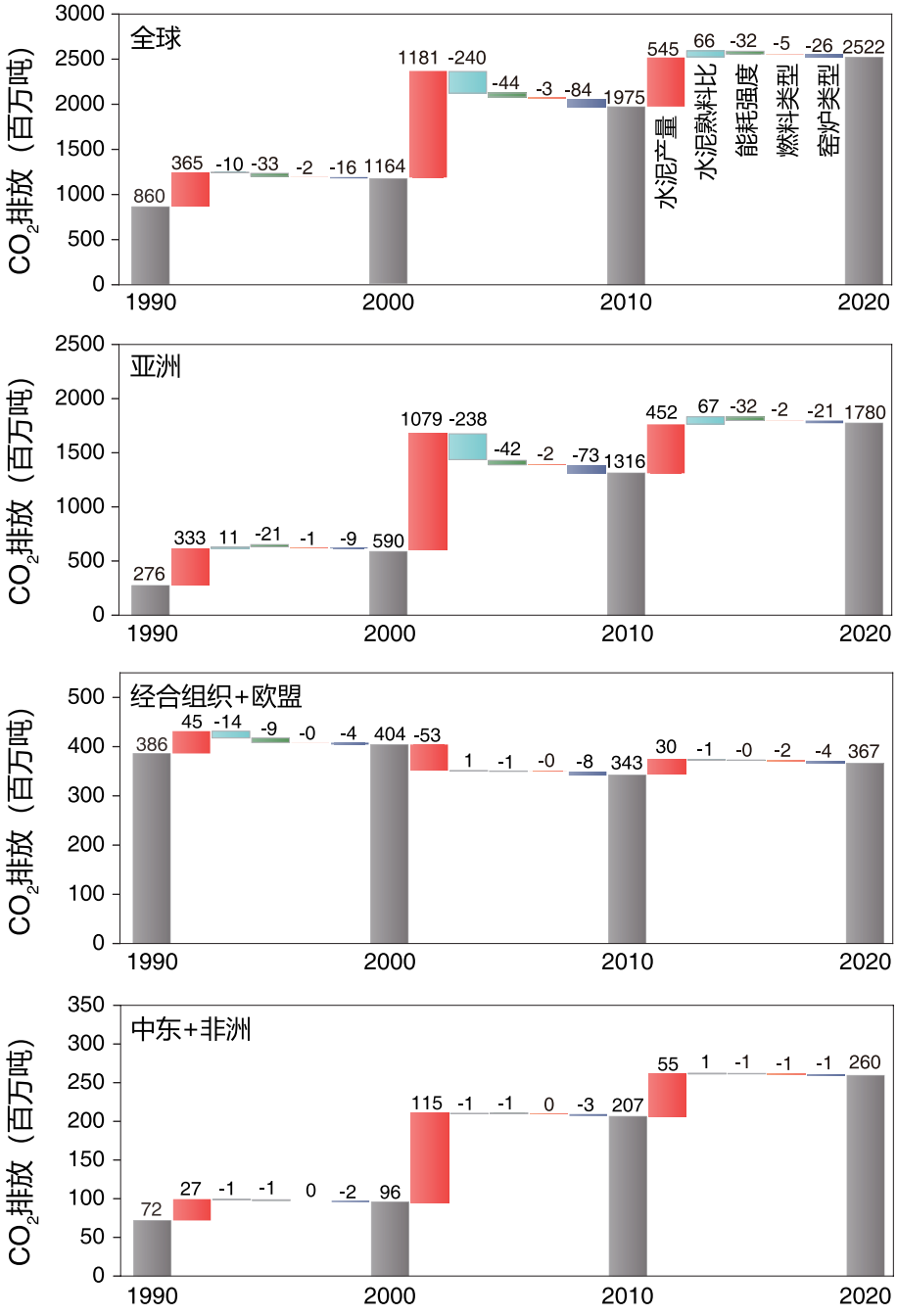


图 3–14 1990–2020 年全球及区域水泥行业 CO_2 排放变化驱动因素（改编自 Chen et al., 2022）



能超过 120 万吨）生产线碳排放贡献显著上升的趋势明显，且亚洲和中东与非洲等地区水泥行业扩张是驱动这一变化的最主要因素。1990–2005 年亚洲地区水泥行业 74–51% 的 CO_2 由小型熟料生产线排放，这是由于亚洲地区熟料生产技术早期以小型立窑、湿法回转窑、半干法回转窑和传统干法等为主。2005 年后亚洲地区部分发展中国家大中型新型干法生产线建设活跃，逐步取代小型生产线，到 2020 年大型熟料生产线碳排放占亚洲水泥行业排放总量的 63%（图 3–15）。中东与非洲和拉丁美洲地区近三十年不同产能规模熟料生产线的碳排放变化趋势与亚洲相似，但相较亚洲存在一定滞后性，当前中东与非洲水泥行业内中型生产线排放占比最大，达到 42%。过去三十年间经合组织和欧盟通过政策驱动或市场竞争不断淘汰小型低效熟料生产线，并小规模新建大中型生产线以平衡供需关系，小型生产线碳排放不断下降，大中型生产线碳排放小幅度上升。

由于基础设施建设需求不断增长，“一带一路”沿线国家近三十年水泥行业碳排放持续攀升，从 1990 年的 3 亿吨上升至 2020 年的 8 亿吨，年均增速约 3%。2005 年后“一带一路”沿线国家水泥行业碳排放增长较为显著，年均增速达 4%。俄罗斯、印度和乌克兰水泥行业发展起步较早，1990 年合计排放 1.3 亿吨 CO_2。2000 年后印度和俄罗斯水泥行业保持较高的碳排放水平，同时东南亚的越南、印度尼西亚和中东的土耳其、伊朗、埃及等国水泥行业发展迅速，其 2000–2020 年水泥行业碳排放年均增速在 3–10% 之间。2020 年，印度水泥行业 CO_2 排放达 2.2 亿吨，越南和印度尼西亚水泥行业 CO_2 排放均超过 5000 万吨，土耳其、伊朗、埃及和俄罗斯水泥行业 CO_2 排放则在 3500–4500 万吨之间。

与钢铁行业类似，随着“一带一路”沿线国家水泥行业规模持续扩张，熟料生产线类型逐渐从小规模立窑等向大中规模新型干法等转变，产能规模较大的生产线碳排放贡献逐渐增加。1990年小型（产能小于60万吨）生产线碳排放占“一带一路”沿线国家水泥行业排放总量的比例超65%，而大型（产能超过120万吨）生产线碳排放占比不足20%（图3–16）。到2005年，中型（产能60到120万吨）和大型生产线排放占比均显著上升，小型生产线排放占比则下降至不足50%；2005–2020年间中型和大型生产线迅速增加，到2020年中型和大型生产线合计排放“一带一路”沿线国家水泥行业超过80%的CO_2，而小型生产线仅贡献不足20%的碳排放。

近三十年中国水泥行业碳排放持续增长，2020年排放量达12.8亿吨CO_2，相较1990年增长了约7.5倍。1990–2020年间中国水泥行业碳排放空间分布格局发生显著变化。上世纪九十年代水泥产业发展主要集中在东部经济社会发展起步较早的地区，广东、山东和江苏等地水泥产业

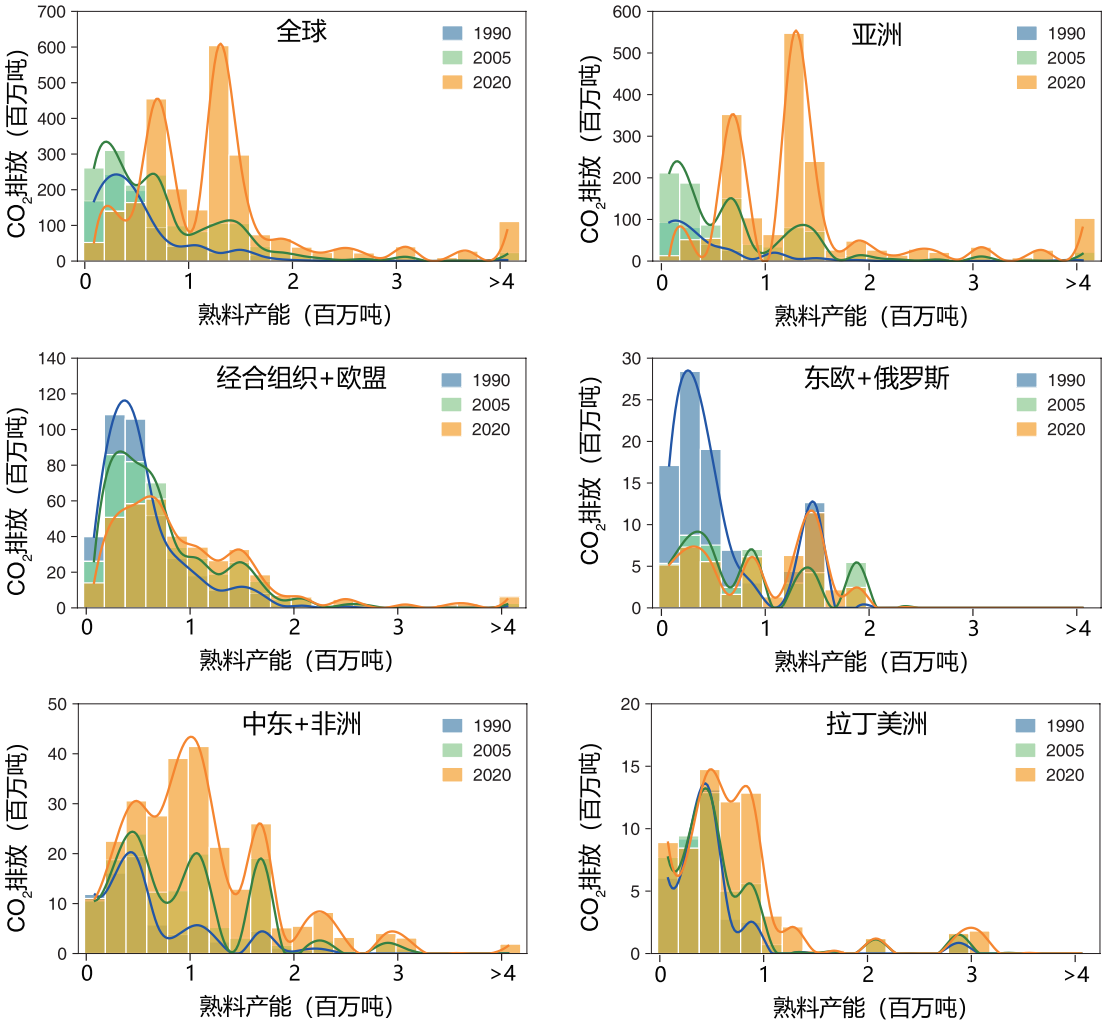


图3–15 全球及区域1990年、2005年和2020年不同产能规模熟料生产线CO_2排放量分布（改编自 Chen et al., 2022）

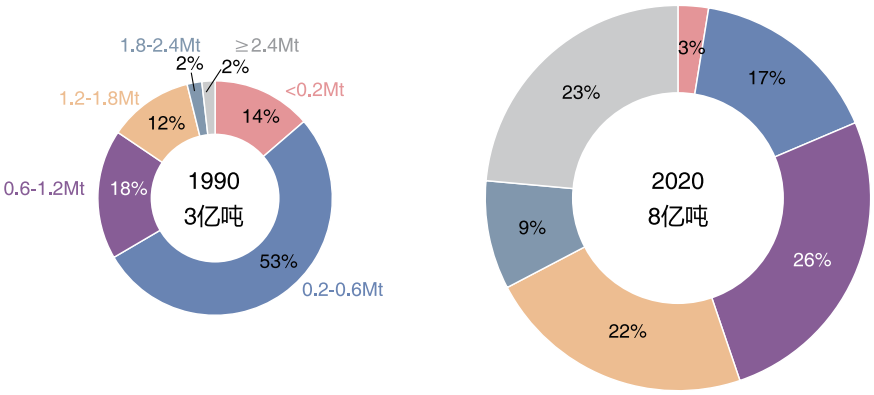


图 3–16 1990 和 2020 年“一带一路”沿线国家不同产能规模的熟料生产线 CO_2 排放贡献

发展较快，碳排放较高（图 3–17）。2000 年后安徽依托自身石灰石资源和长江水系运输快速发展水泥行业（Liu et al., 2021），新建大量大型生产线，成为中国水泥行业碳排放贡献最大的省份，2010 和 2020 年分别贡献了中国水泥行业碳排放总量的 8% 和 11%。西南地区水泥行业在 2000 年之后也显示出强劲的增长势头：2010 年西南五省（重庆、四川、贵州、云南和西藏）合计贡献了中国水泥行业排放总量的 17%，到 2020 年占比进一步上升至 22%。广西水泥行业碳排放在

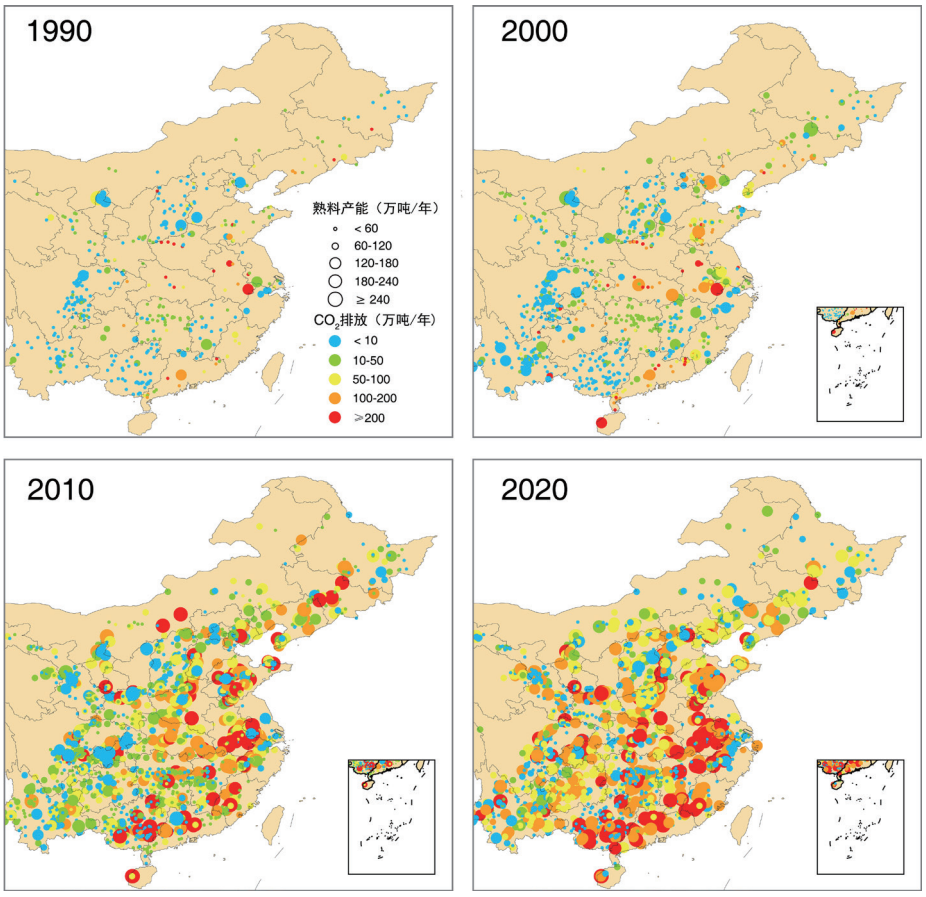


图 3–17 1990、2000、2010 和 2020 年中国水泥厂 CO_2 排放空间分布

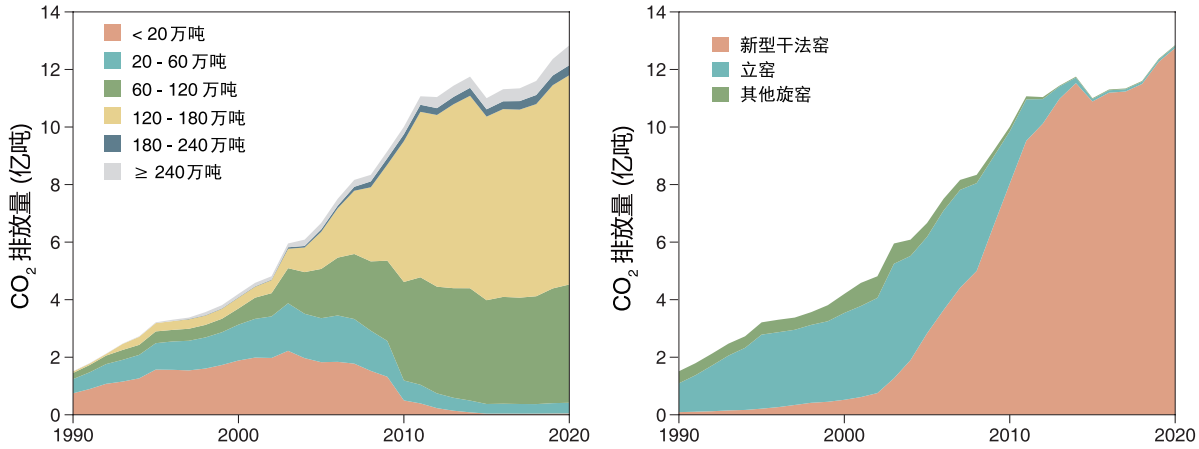


图 3–18 1990–2020 年中国不同产能规模和不同技术类型的熟料生产线 CO_2 排放量变化

2000 年后也呈现快速增长趋势，2000–2020 年年均增速达到 15%。整体来看，中国水泥行业碳排放空间集中度低于钢铁行业。以 2020 年为例，排放量最大的 5 个省份贡献了水泥行业约 36% 的碳排放（前十为 60%），与水泥行业空间分布集中度较低的特征相一致。

在过去三十年中国水泥行业碳排放快速增长过程中，不同生产规模和工艺类型的熟料生产线排放贡献发生显著变化（图 3–18），反映了中国水泥行业迅速的技术更替和进步过程。2000 年以前中国水泥熟料生产线多为小型立窑，1990–2000 年间熟料产能小于 60 万吨的生产线碳排放占中国水泥行业排放总量的 75%–82%，立窑排放占比为 66%–80%。2005 年后大中型规模的新型干法生产线快速扩张取代小型立窑，到 2020 年产能超 120 万吨的熟料生产线碳排放占中国水泥行业排放总量的 65%，新型干法生产线排放占比达 99%。快速的技术更替有效的减缓了中国水泥行业碳排放的增长，1990 年中国水泥行业碳排放强度为 0.72 吨 CO_2/ 吨水泥，到 2020 年下降至 0.54 吨 CO_2/ 吨水泥。



3.4 道路交通

在保有量持续增长的驱动下，全球机动车碳排放逐年上升，从 1990 年的 33 亿吨 CO_2 增长至 2020 年的 57 亿吨 CO_2，三十年间排放增加了 75%（闫柳，2021）。受新冠疫情影响，2020 年全球道路机动车碳排放同比下降了 10.4%。从区域贡献来看，不论历史累积排放亦或各年实际排放，以经合组织与欧盟为代表的发达国家始终是全球机动车碳排放的主要贡献者。据测算，在过去两百多年间（1750–2020 年）全球机动车累积排放 2227 亿吨 CO_2，其中 68% 来自经合组织与欧盟（闫柳，2021; Hoesly et al., 2018）。尽管近年来经合组织与欧盟的排放占比逐年降低，如图 3–19 所示，但 2020 年依旧贡献了 52% 的全球机动车碳排放。近三十年来亚洲机动车碳排放增长显著，由 2.8 亿吨 CO_2 增加至 14.7 亿吨 CO_2，在全球机动车碳排放中的占比增加了 2 倍多，2020 年对全球机动车碳排放的贡献为 26%。

从排放的车型分布来看，全球机动车碳排放主要来自小型客车和重型货车（图 3–19）。对于汽油车而言，由于全球机动车保有量中 60% 以上为小型客车，且多数国家小型客车主要以汽油为燃料（闫柳，2021），因此 2020 年全球汽油车 70% 的碳排放来自小型客车。对于柴油车而言，尽管重型货车在全球机动车保有量中占比不足 5%（闫柳，2021），但由于其年均行驶里程显著高于其他车型，2020 年重型货车对柴油车碳排放的贡献达 43%。

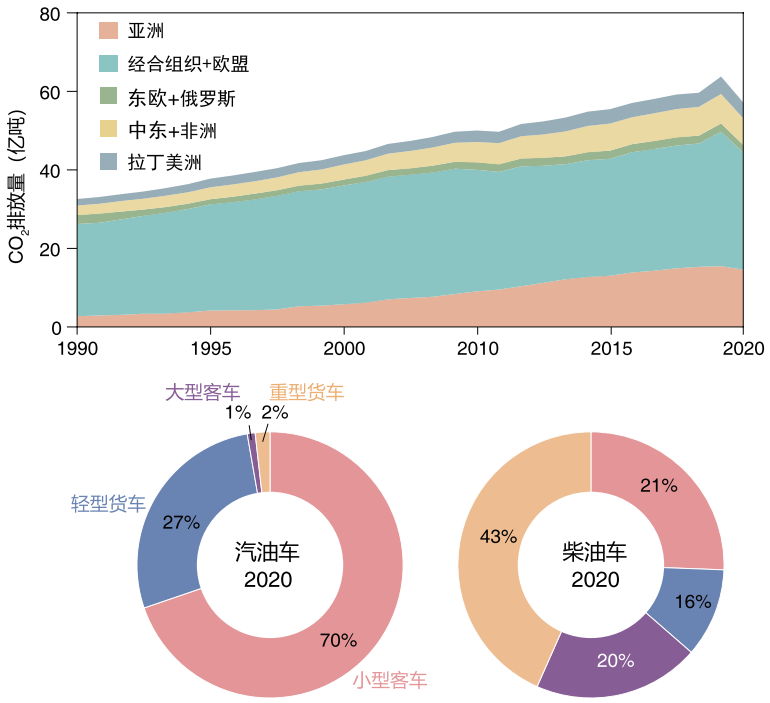


图 3–19 1990–2020 年全球机动车 CO_2 排放及 2020 年排放车型分布



04

第四章

能源基础设施碳锁定效应及绿色转型

4.1 能源基础设施碳锁定效应及对全球气候目标的影响

2020 年，全球火电、钢铁、水泥和陆地交通运输部门共排放二氧化碳 241 亿吨，约占全球碳排放总量的 70%。更为重要的是，这些基础设施在未来还将运行数十年并持续产生碳排放，形成碳排放锁定效应。碳排放锁定效应是指现有能源基础设施在未来产生的累积二氧化碳排放（Davis et al., 2010 和 2014; Tong et al., 2019），表征了排放源对未来气候变化的潜在影响。

如上述主要能源基础设施按历史平均服役寿命和设备投运率运行，其锁定碳排放约为 4800 亿吨（图 4–1）。按同样方法测算，全球所有现存排放源的锁定碳排放约为 7000 亿吨，上述主要能源基础设施的锁定碳排放约占全部锁定碳排放的 70%。其中，火电行业的碳锁定效应最大，锁定碳排放为 3029 亿吨，占全部锁定碳排放的 43%。钢铁行业在未来锁定的 615 亿吨碳排放占全部锁定碳排放的 9%，而水泥行业的锁定碳排

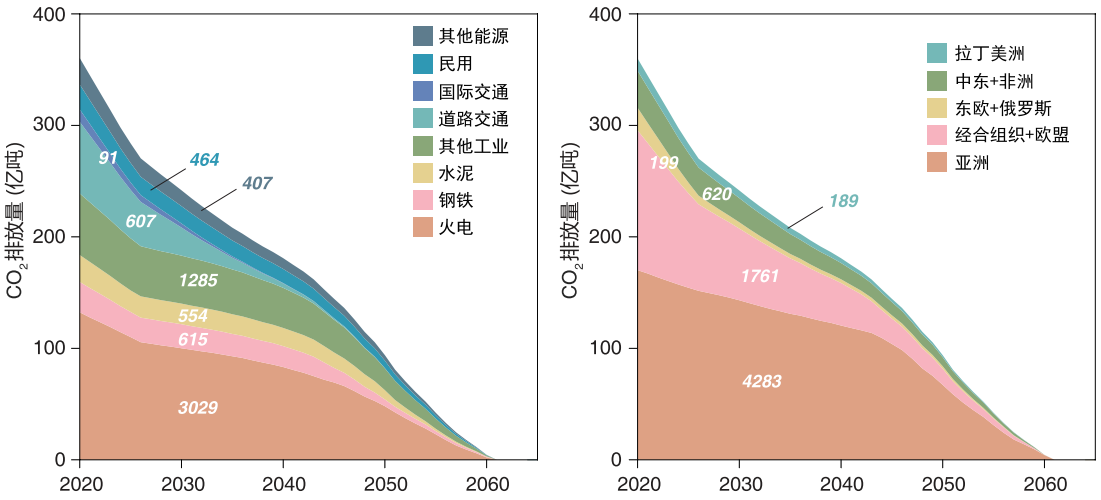


图 4–1 2020 年全球能源基础设施分行业部门和分区域的碳锁定效应

放约为 554 亿吨，占全部锁定碳排放的 8%。由于机动车服役寿命（15 年）仅约为工业行业能源基础设施（40 年）的三分之一，尽管 2020 年陆地交通运输部门的碳排放量高于钢铁和水泥行业，但是其未来锁定的碳排放仅有 607 亿吨，占全部锁定碳排放的 9%。除上述主要能源基础设施外，其他现存排放源的锁定碳排放为 2247 亿吨，主要来自工业源和民用源。

从区域层面来看，亚洲对全球碳锁定效应贡献最大，在未来锁定的碳排放为 4283 亿吨，占全部锁定碳排放的 61%。经合组织与欧盟国家、中东和非洲地区也对全球碳排放锁定效应也有重要贡献，分别占到全部锁定碳排放的 25%（1761 亿吨）和 9%（620 亿吨）。发达国家能源基础设施的服役年限普遍较长，在未来锁定的碳排放较少。2020 年，以发达国家为主的经合组织与欧盟国家贡献了全球碳排放总量的 35%，而其在未来锁定的碳排放占比仅为 25%。相反，新建能源基础设施在未来会锁定大量的碳排放，使得锁定效应增强。以发展中国家为主的亚洲地区为例，

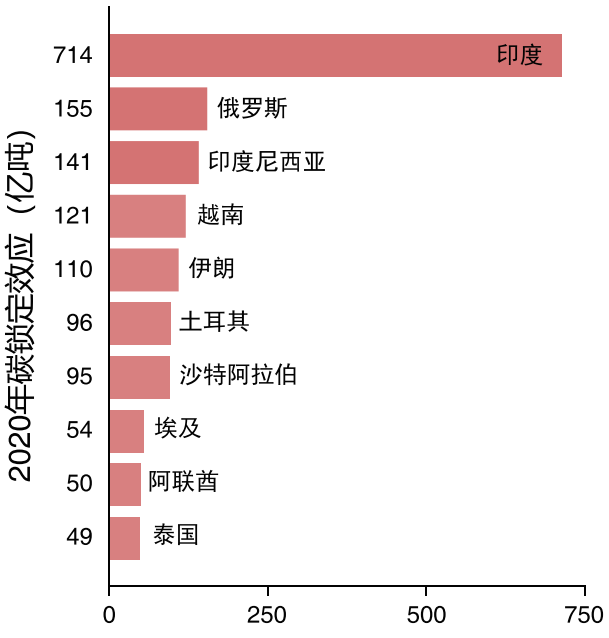


图 4–2 2020 年“一带一路”沿线国家中碳锁定效应前十的国家

排放全球 47% 二氧化碳的能源基础设施贡献了 61% 的锁定碳排放。

尽管以发达国家为主的经合组织与欧盟对未来气候变化的潜在影响呈下降态势，但是发达国家在过去二百多年实现其工业化、现代化的过程中建设大量化石能源基础设施并不断排放二氧化碳，对全球气候变化负有不可推卸的历史责任。1750–2020 年经合组织与欧盟累积排放二氧化碳超 9000 亿吨（Hoesly et al., 2018），在全球同期碳排放总量中占比超 55%，远高于发展中国家所有现存排放源的锁定碳排放。

“一带一路”沿线国家在能源产业结构和能源基础设施扩建速度方面存在差异（见图 4–2）。2020 年锁定碳排放排名前十的国家对“一带一路”沿线国家全部锁定碳排放的贡献超过 70%。尽管部分“一带一路”沿线国家的碳锁定效应较小，但近年来大量新建的能源基础设施产能使其碳锁定效应明显增加。以塔吉克斯坦为例，2020 年其在未来锁定的碳排放仅为 3.3 亿吨，在“一带一路”沿线国家锁定碳排放中的占比不足 1%，但近年来塔吉克斯坦火电和水泥行业保持高速扩张，近五年火电装机容量和熟料产能分别增加了 3 倍和 1.5 倍，致使锁定碳排放增速位列“一带一路”沿线国家第二。

值得关注的是，由于越南近年来经济增长势头强劲（商务部 ,2020），电力、粗钢、熟料产能等产能迅速扩张，成为“一带一路”沿线国家高速发展的典型国家之一。2020 年越南在未来锁定的 121 亿吨碳排放位列“一带一路”沿线国家锁定碳排放前十，同时，近五年越南火电装机容量、钢铁和熟料产能年均增速分别达 5%、18% 和 8%，成为“一带一路”沿线国家中近五年锁定碳排放增长最显著的国家。

按历史平均服役寿命和设备投运率测算，中国火电、钢铁、水泥和陆地交通运输部门的能源基础设施未来产生的锁定碳排放约为 1959 亿吨，占所

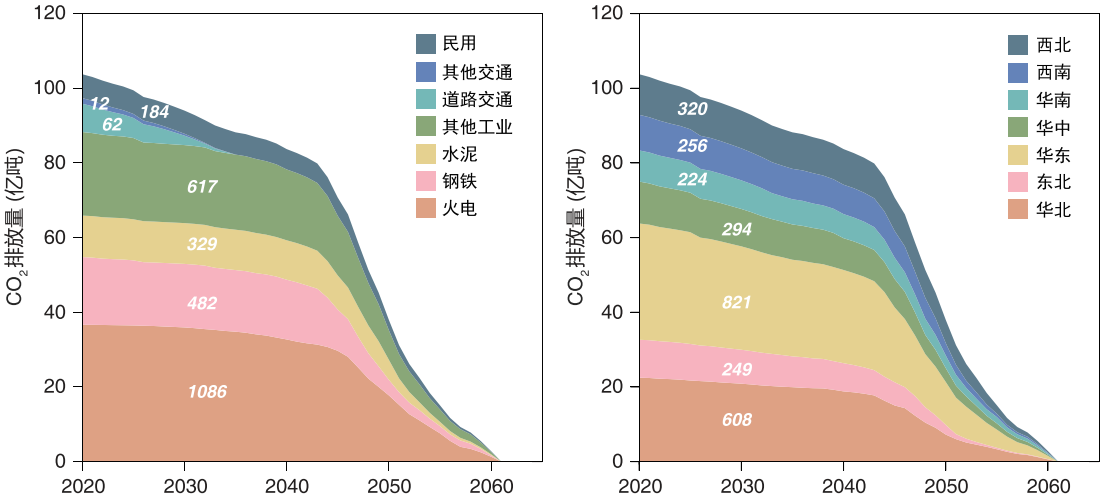


图 4–3 2020 年中国能源基础设施分行业部门和分区域的碳锁定效应

有现存排放源锁定碳排放的 71%（图 4–3）。碳锁定效应的衰减趋势表明我国偏年轻化能源基础设施结构有较强的排放惯性。火电行业的碳排放锁定效应位居所有行业部门之首，其在未来锁定的碳排放约为 1086 亿吨，占全部锁定碳排放的 39%，钢铁和水泥行业的锁定碳排放分别为 482 亿吨和 329 亿吨，占比分别为 17% 和 12%。与全球锁定碳排放行业分布特征相似，由于机动车服役寿命较短，陆地交通运输部门产生的锁定碳排放仅有62亿吨，占全部锁定碳排放的 2%。从区域分布来看，由于华东和华北地区现有主要能源基础设施的规模较大，其所有现存排放源在未来锁定的碳排放合计约为 1429 亿吨，在全国占比达 52%。

动态追踪碳排放锁定效应与剩余碳排放空间的差距有助于评估实现气候目标需要做出的努力。碳排放空间是指在气候目标的约束下，某一特定时期

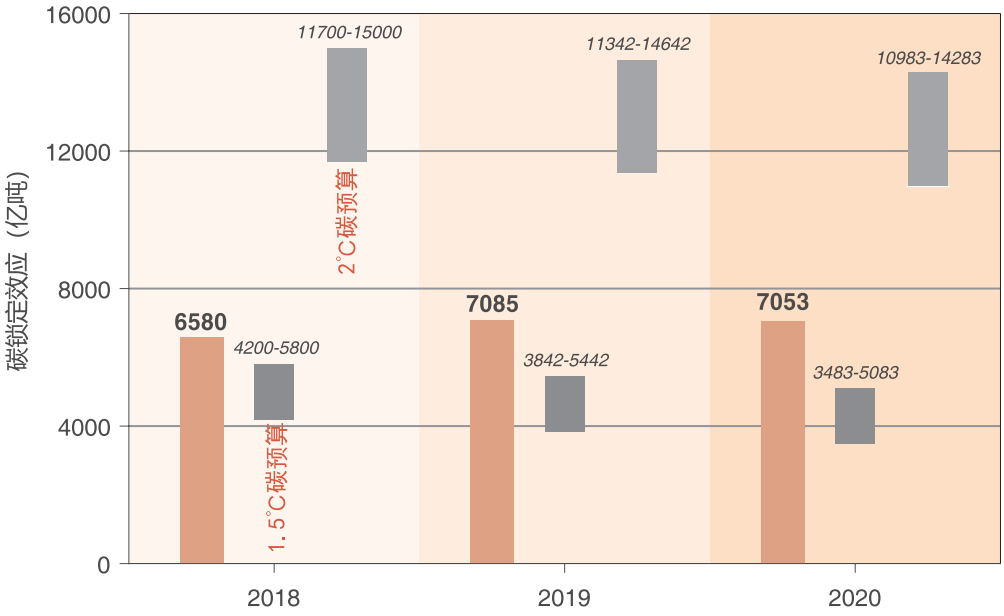


图 4–4 全球碳锁定效应与剩余碳排放空间

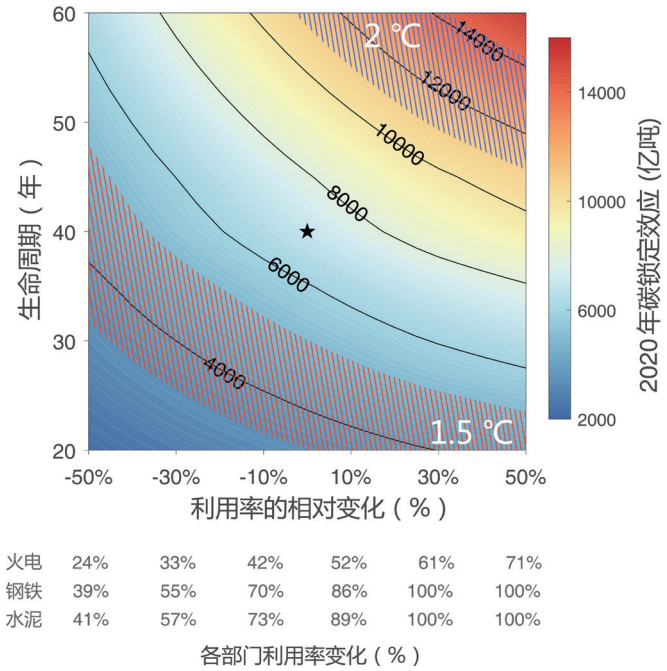


图 4–5 2020 年全球碳锁定效应的敏感性分析

内温室气体排放总量的上限（Rogelj et al., 2018）。随着人为源不断地排放二氧化碳到大气中，剩余的碳排放空间正在迅速缩小（Rogelj et al., 2018）。《巴黎协定》提出将全球温升控制在 2 度之内并努力控制在 1.5 度之内，而到 2020 年，2 度和 1.5 度目标下剩余的碳排放空间分别约为 3500–5100 亿吨和 11000–14000 亿吨（50%–66% 概率）。

能源基础设施的碳锁定效应将对《巴黎协定》提出的全球气候目标产生较大威胁，碳锁定效应与剩余碳排放空间之间的紧张关系日益加剧（见图 4–4）。全球火电、钢铁、水泥和陆地交通运输部门等主要能源基础设施在未来锁定的 4800 亿吨碳排放与全球 1.5 度目标下剩余的碳排放空间基本相当，约占到 2 度目标下剩余碳排放空间的 40%。全球所有现存排放源在未来锁定的约 7000 亿吨碳排放将超过全球 1.5 度目标下剩余的碳排放，约占到 2 度温控目标碳空间的一半。

碳锁定效应并非一成不变，通过缩短能源基础设施服役年限、降低产能利用率等措施可减少其碳锁定排放（图 4–5）。推动火电、钢铁和水泥行业等主要高碳基础设施的提前退役，将服役年限从 40 年削减到 30 年，则对应的锁定碳排放将从 7052 亿吨削减到 5040 亿吨，降幅达 29%。推动低碳能源转型进程中能源基础设施产能利用率的下降，降低 25% 的产能利用率可削减 1370 亿吨的锁定碳排放。

针对火电行业，如推动火电机组提前淘汰，将平均服役年限从 40 年削减到 30 年，则对应的锁定碳排放将从 3029 亿吨削减到 2000 亿吨，降幅达 34%（见图 4–6）。随着光伏和风电等新能源发电的大规模发展，未来火电将主要承担调峰功能，年发电小时数将大幅降低（Tong et al., 2019）。如自 2030 年起将火电年发电小时数逐步降低到 2000 小时，则火电行业锁定碳排放将减少到 2295 亿吨。

碳捕获与封存（CCS）等碳减排技术的大规模利用也能够在一定程度上抵消能源基础设施的碳锁定效应（见图 4–7 和 4–8）。以钢铁和水泥行业为例，如自 2035 年开始以每年 10% 的速度对在役能源基础设施大规模安装 CCS，则对应的锁定碳排放将分别从 615 亿吨和 554 亿吨削减到 448 亿吨和 392 亿吨。

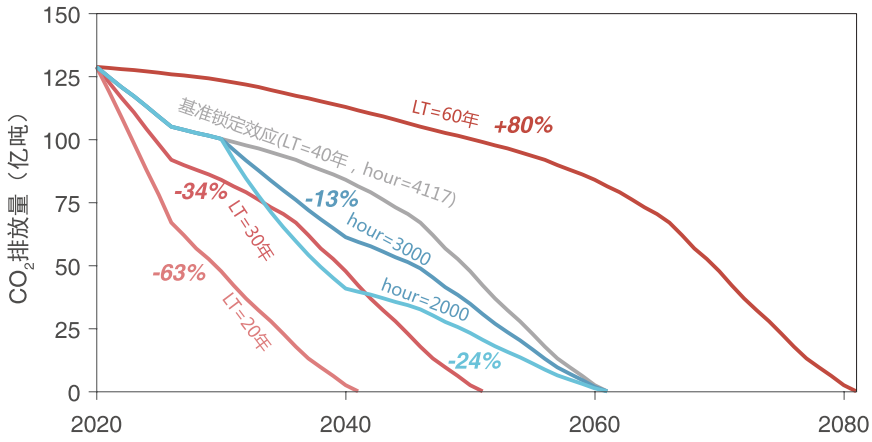


图 4–6 火电行业碳锁定效应敏感性分析

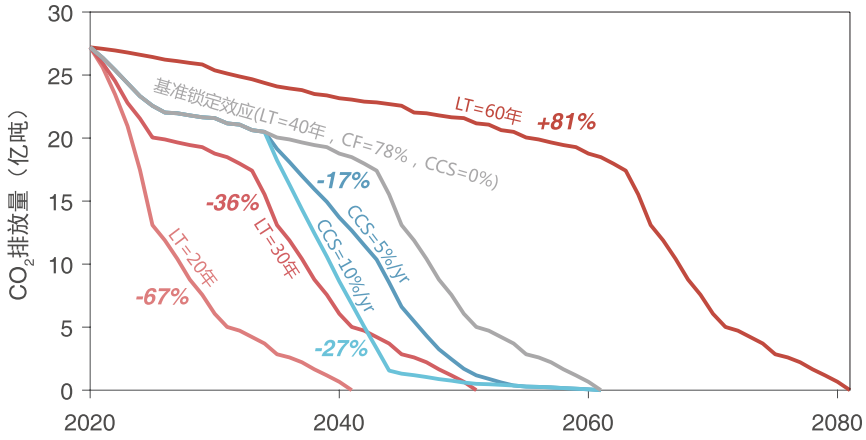


图 4–7 钢铁行业碳锁定效应敏感性分析

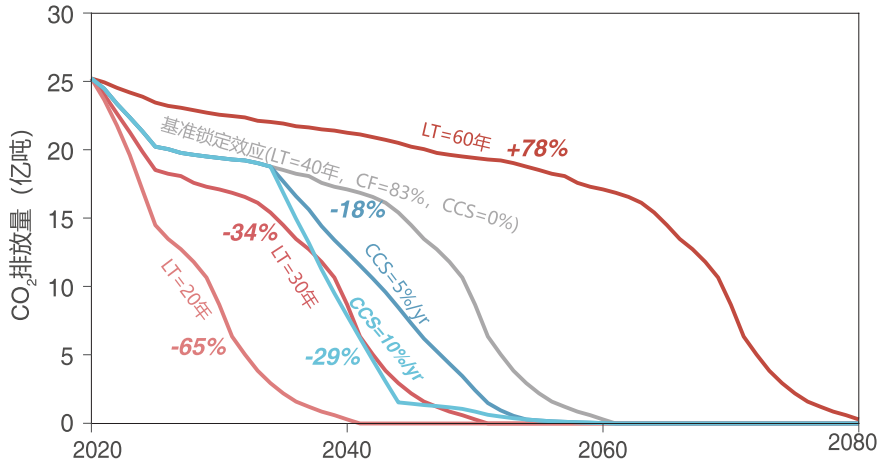


图 4–8 水泥行业碳锁定效应敏感性分析

4.2 能源基础设施低碳转型挑战

前述分析结果表明，全球主要化石能源基础设施当前总体仍处在扩张阶段。2010–2020 年间全球火电和水泥行业能源基础设施年均新建速率均为 3.2%，近五年来平均新建速率趋缓，分别下降至 2.7% 和 1.6%。而全球钢铁行业能源基础设施新建速度近十年来基本维持在 2% 左右（见图 4–9）。

新兴经济体火电装机和钢铁、熟料产能增速显著高于发达国家。以火电行业为例，受电力需求驱动，发展中国家火电装机容量仍处在高速发展时段，2015–2020 年间，亚洲、中东和非洲地区的火电新建速率分别为 4.3% 和 3.3%，分别高出全球平均新建速率 66% 和 26%，而同期以发达国家为代表的 OECD 和欧盟地区增速仅有 1.2%。

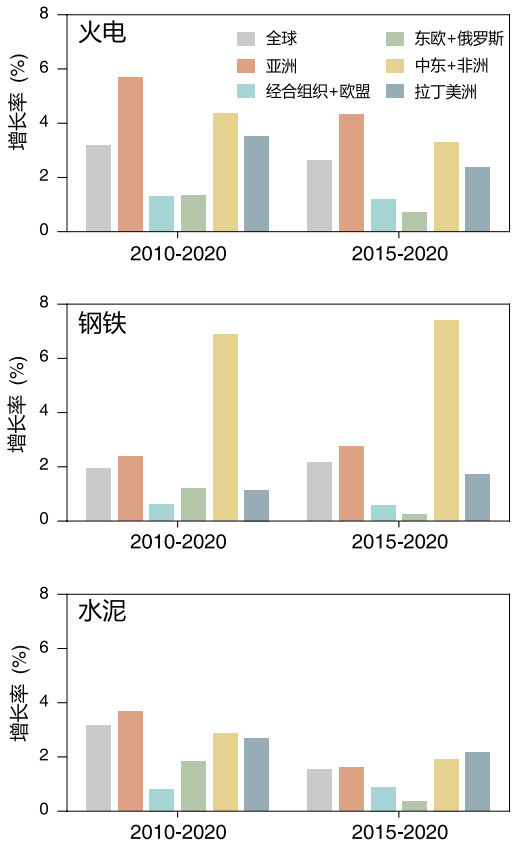


图 4–9 2010–2020 和 2015–2020 期间全球火电、钢铁和水泥基础设施建设的增长速率

化石燃料能源基础设施的投资和建设惯性将对全球低碳转型带来巨大挑战。情景分析结果表明，如火电、钢铁、水泥等主要能源基础设施以 2015–2020 年的平均增速持续增长至 2030 年，三个行业在未来十年间新增能源基础设施将分别产生 1287 亿吨、141 亿吨和 121 亿吨的锁定碳排放（见图 4–10），合计相当于 1.5 度温控目标剩余的碳排放空间的 30%–44%，2 度温控目标剩余碳排放空间的 11%–14%。如上述行业基础设施以过去十年的平均增速持续增长至 2030 年，则将共计额外增加 2200 亿吨的碳锁定排放，占 1.5 度温控目标剩余碳排放空间的 43%–63%。如何尽快减少乃至停止新建化石燃料能源基础设施，对全球实现《巴黎协定》目标至关重要。

当前新兴经济体正处在经济快速发展阶段，能源和基础原材料需求增长迅速。而新兴经济体国家在低碳技术研发和市场推广方面往往落后于发达国家，在新增需求压力下更容易继续投资新建化石燃料设施，形成新的碳锁定效应，增加未来减排的难度。如何在满足增长需求的同时尽可能减轻锁定碳排放对未来减排带来的压力，是发展中国家在低碳转型进程中亟待解决的重大问题。

在全球迈向低碳转型和净零排放的背景下，以本世纪中叶前后实现净零排放为目标，新建的化石能源基础设施将面临大规模提前退役，造成巨额资本搁浅风险（见图 4–11）。以电力行业为

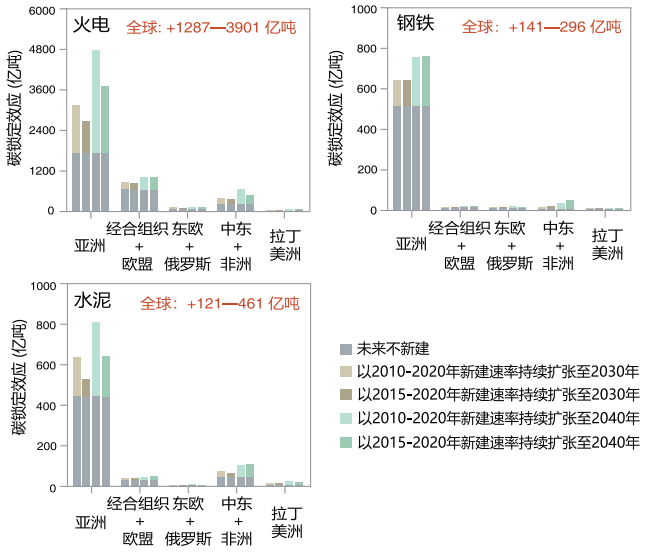


图 4–10 截至 2050 年，不同情景下全球火电、钢铁和水泥基础设施的碳锁定效应

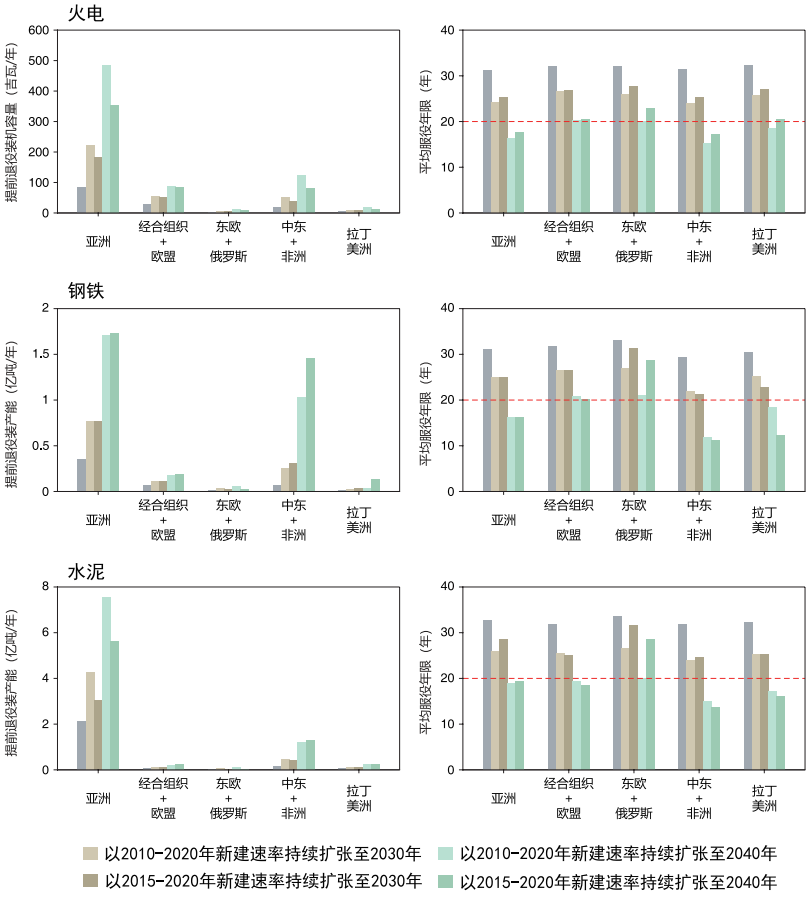


图 4–11 不同情景下火电、钢铁和水泥基础设施平均提前退役产能和平均服役寿命

例，若以 2050 年实现净零排放为目标，即使从现在起停止新建化石燃料发电厂，未来全球也将有 139 吉瓦的火电机组需要提前退役或加装 CCS 设备；如未来十年还持续新建化石燃料发电厂，则全球将有超过 341 吉瓦的火电机组将需要提前退役或加装 CCS 设备。

4.3 疫情影响及绿色复苏机遇

受新冠疫情影响，2020 年全球主要能源基础设施投资趋缓，2019–2020 年间全球现有能源基础设施锁定碳排放出现小幅下降，全球所有现存排放源的锁定碳排放减少 0.5%，减少约 32 亿吨锁定碳排放。

尽管全球基础设施的碳锁定效应总体变化幅度不大，但碳锁定效应变化趋势在行业部门及区域层面存在明显差异（见图 4–12）。全球火电行业的锁定碳排放减少了 67 亿吨，主要来自于经合组织与欧盟国家的贡献。OECD 和欧盟国家火电行业的锁定碳排放减少近 80 亿吨，抵消了亚洲地区火电行业增加的 25 亿吨锁定碳排放。而全球工业部门的锁定碳排放增加了 40 亿吨，主要由发展中国家新建的钢铁和水泥产能贡献。受新冠疫情影响，除中东与非洲地区外，其他区域机动车注册量均大幅减少，导致全球陆地交通部门基础设施的锁定碳排放下降 7.4 亿吨。

2019–2020 年间碳排放锁定效应变化在国家尺度上也存在较大差别（见图 4–13），新冠疫情对新兴经济体的能源基础设施的新建投运冲击较小，锁定碳排放仍呈增长趋势，2019–2020 年 52 个主要位于亚洲、中东和非洲、拉丁美洲地区的新兴经济体的锁定碳排放合计增加 134 亿吨，最高增速可达 20% 以上。值得注意的是，部分新兴经济体对全球碳排放锁定效应贡献较大，如持续高速增长，其未来对全球气候变化的贡献会逐

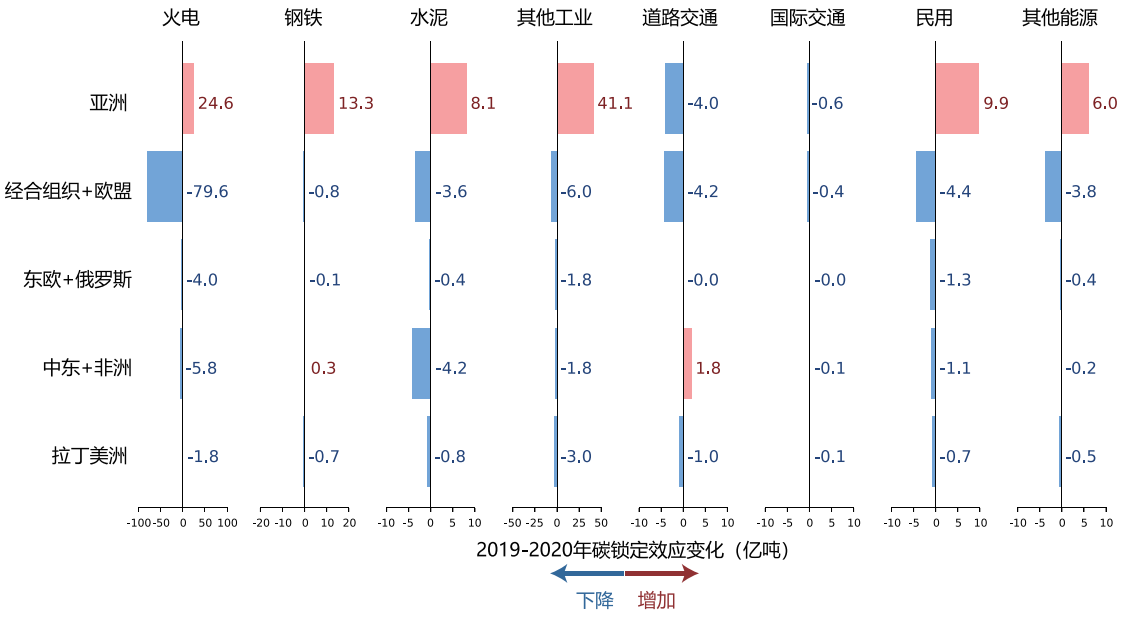


图 4–12 2019–2020 年全球能源基础设施分行业和分地区的碳锁定效应变化

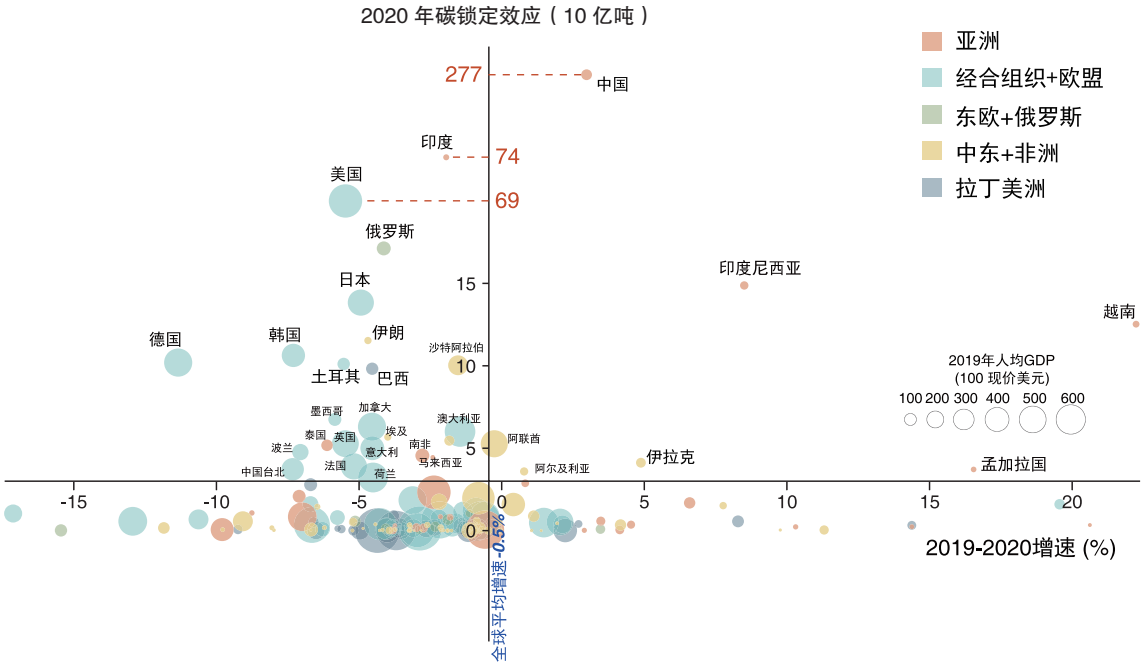


图 4–13 2020 年全球碳锁定效应及同比变化分布

步增加。以越南和印度尼西亚为例，其 2020 年锁定碳排放均位列全球前十，且 2019–2020 年锁定碳排放增速分别达 22% 和 9%。

2020 年全球低碳能源基础设施的投资建设明显增加，全球光伏和风能发电装机量逆势增长，对减缓碳排放锁定效应起到了显著的积极作用。2020 年全球新增光伏和风能装机量合计达 238 吉瓦，比 2019 年新增量增加了 81 吉瓦。基于以火力发电装机等量替换的考虑，额外新增的装机容量可避免超 90 亿吨的锁定碳排放（见图 4–14），占 2020 年全球火电行业锁定碳排放的 3%。

全球在推动经济复苏的同时还面临着可持续发展及气候变化的巨大挑战，后疫情时代的绿色复苏可望为全球经济低碳转型注入新动能。促进绿色复苏正在成为全球广泛共识，美国、德国、法国、英国和日本等纷纷出台相关绿色复苏计划，覆盖可再生能源、新能源汽车和氢能等低碳发展领域（绿色和平组织，2021）。同时，全球化石能源基础设施投资放缓也为加快绿色基础设施建设提供了新机遇。中国已承诺不在海外新建煤电项目，未来大力推动分享绿色低碳技术，在使得“一带一路”倡议项目更加绿色的同时，也有望为全球气候治理探索出一条国际合作的新路径。

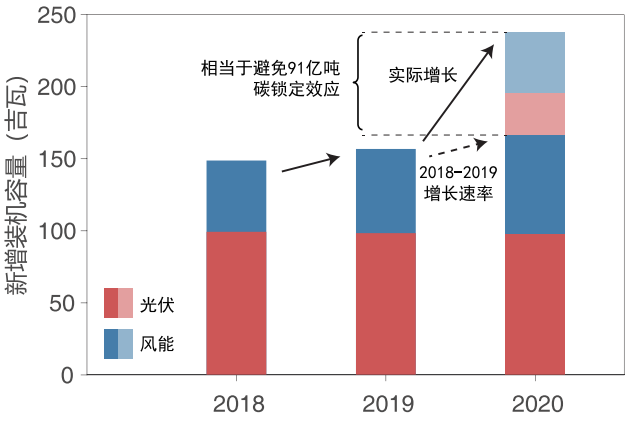


图 4–14 2020 年全球光伏和风能新增装机量对减缓碳锁定效应的积极作用

4.4 能源基础设施绿色转型

能源基础设施绿色转型是实现全球气候目标的必由之路。未来全球需在限制高碳能源基础设施投资、提升现有设施技术和能效水平、加大新兴低碳技术研发、加强绿色技术国际合作等方面持续发力，推动能源基础设施绿色转型，确保全球气候目标实现。

首先，需扭转高碳能源基础设施投资惯性，避免新的高碳增长带来的长期碳锁定效应，同时降低资产搁浅风险。社会经济高速发展形成较强的技术锁定和路径依赖，持续扩张的长寿命高碳能源基础设施会加剧技术与碳排放锁定效应，阻碍零碳或低碳技术的发展。绿色转型本质上是推动能源系统深度降碳并逐步解除碳锁定的过程，因此，在加快解除锁定效应的推动下，未来应当严格限制高碳能源基础设施的惯性投资冲动，发挥绿色金融在推动基础设施绿色转型过程中的作用，收紧向化石能源投资的信贷业务，推动高碳投资逐步退出历史舞台，降低由于大量新建能源基础设施需提前退役可能出现的巨大资产搁浅风险。

其次，应当加速能源基础设施的升级改造和有序淘汰，提升技术和能效水平，降低碳排放强度。发展中国家和新兴经济体尚处经济起飞的粗放型发展阶段，落后产能存量较高，技术和能效水平低，碳排放强度高，与世界先进水平存在较大差距。节能减排是推动低碳发展的重要抓手之一，下一步应当帮助发展中国家提升重点行业技术和能效水平，有序淘汰落后产能，加快发展先进低碳产能，加大技术和资金支持，充分释放节能减排潜力，优化产业结构，推动行业高质量发展。



第三，要加大新兴低碳技术研发力度，推进氢能冶金、碳捕集与封存等减排技术的示范和产业化应用，引领全球能源基础设施由资源依赖型向技术依赖型发展模式转变，加速社会经济发展与化石能源大规模使用脱钩。技术进步是低碳发展的核心驱动力，当前在全球绿色低碳转型进程中仍有大量关键核心技术尚未突破，应当积极部署绿色低碳前沿技术研究，推动新兴低碳技术从示范期和原型期向商业化、市场化过渡；进一步加大对绿色低碳产业发展、低碳技术研发创新的支持力度，力争扭转当前高碳产业格局，将燃料变为原料，将能源变为资源。同时，针对相关“难脱碳”的钢铁和水泥等关键行业领域，积极推进氢能冶金等减排技术的示范及商业化应用，在不同地理条件和资源禀赋的地区对碳捕集与封存减排技术的适用性、有效性和经济性开展广泛测试与评估，依靠绿色低碳技术创新解决这些行业深度脱碳问题。

最后，应当抓住后疫情时代绿色复苏的发展机遇，加强绿色技术国际合作，深入推进可再生能源、新能源汽车等新能源产业发展，构建全球零碳能源体系。后疫情时代的经济复苏是世界各国尤其是主要经济体的政策重心，而绿色复苏不仅能推动经济重启，缓解气候资金缺位等难题，还是各国形成新竞争优势的重要契机。世界各国应当利用政策体系、市场机制等多种手段撬动更多资金支持绿色产业、绿色项目和绿色经济活动，



并建立绿色复苏的国家公约和多边合作，促进使用气候友好型资源与能源满足日益增长的能源需求，朝着构建全球零碳能源体系迈出重要一步。同时，以全球气候共治为指导思想，各国应当在治理体系、资金、技术、机制等方面全方位加强国际合作与交流，形成经济增长新共识，发达国家应当为发展中国家分享低碳发展技术以充分释放其绿色能源潜力，为“更好地重建”而共同努力。

附录 方法学简介

1. 碳排放核算

报告中 1990–2020 年全球电力、钢铁和水泥行业碳排放按逐个设备计算。以各行业全球设备级基础信息数据库为基础，在美国、欧洲和印度等区域融合高精度本地数据库，首先获得逐个设备的地理位置、投运和关闭时间、生产技术和产能等信息（Tong et al., 2018; Qin et al., 2022; Xu et al., 2022; Chen et al., 2022）。基于上述设备级信息，进一步收集各区域设备级产能利用率数据，并以国际能源署能源消费数据和多源产品产量数据为约束（IEA,2021a; USGS,2021; World Steel Association, 2021），通过考虑产能规模、技术类型和能效差异等多种因素的数据建模估计逐设备的能源消费数据。道路交通部门的活动水平基于使用多源保有量数据、Gompertz 方程和机动车存活曲线等建立的全球车队模型，结合国际能源署能源消费数据进行核算（Yan et al., 2021）。

在逐个设备能源消费量基础上，利用国际能源署提供的各国燃料热值数据、IPCC 指导手册提供的燃料含碳量数据以及碳排放因子数据（IEA, 2021a; IPCC, 2006），计算得到逐个设备的二氧化碳排放量。

其中，中国大陆地区上述三个行业设备级别的活动水平及排放数据直接来自清华大学的中国多尺度排放清单模型 MEIC（Liu et al., 2015; Wang et al., 2020; Liu et al., 2021）。

本报告中碳排放均为直接排放（Scope 1 emissions），即企业自身生产活动等直接产生的碳排放（如工业企业由于生产需要进行化石燃料燃烧等），不包括外购能源（如电力、热力等）和上下游生产活动产生的碳排放。

2. 碳锁定效应核算

各国各行业部门在未来的累积碳排放，即碳锁定效应通过公式（1）核算（Tong et al., 2019）。

$$CE_y = \sum E_{i,y} \times (lifetime - T_{i,y}) \quad (1)$$

其中i为能源基础设施，y 为年份，E 为基准年碳排放，$lifetime$ 为假设的平均服役寿命，T 为已服役年限，则（$lifetime - T_{i,y}$）表征在一定服役寿命假设下剩余的运行时间，即存活曲线。碳锁定效应核算基于基准年碳排放与相应的能源基础设施存活曲线（survival curves）（Davis et al., 2010; 2014; Tong et al., 2019）。

电力、钢铁、水泥和道路交通四个行业部门的基准年碳排放由前述方法在设备尺度或车队模型层面获得。全球其他排放源的基准年碳排放基于国际能源署能源消费数据和收集的工业产品产

量数据（IEA, 2021a; USGS, 2021），使用国际能源署和 IPCC 指导手册提供的二氧化碳排放因子计算得到（IEA, 2021a; IPCC, 2006）。

本报告根据已有研究和历史设施退役数据（Davis et al., 2014; Tong et al., 2019），在基准情况下假设电力、钢铁、水泥行业能源基础设施的平均服役寿命为 40 年，并基于此假设通过各设备级排放数据库获得各国电力、钢铁和水泥能源基础设施的存活曲线，全球其他工业源和民用排放源的存活曲线假设与电力行业相同。根据全球车队模型估计机动车未来衰减变化以获得道路交通部门存活曲线，并假设其他交通能源基础设施的年龄分布和存活曲线与机动车相同。此外，中国分省碳锁定效应的核算与全球一致，各行业部门的存活曲线在省级尺度获取。

2020 年新冠疫情爆发导致全球经济生产活动放缓和停滞，各类能源基础设施利用率明显降低，全球二氧化碳排放下降（Le Quéré et al., 2020; Liu et al., 2020）。为反映新建能源基础设施对碳排放锁定效应的影响，本报告选取 2019 年的二氧化碳排放作为基准年碳排放，用以核算 2019 和 2020 年碳锁定效应。

3. 敏感性分析

碳锁定效应受到假设服役寿命和设备利用率的影响（Tong et al., 2019），基准碳锁定效应是基于电力、钢铁和水泥行业能源基础设施的平均服役寿命 40 年和平均产能利用率分别为 47%、78% 和 81% 得到的。为更全面的评估碳锁定效应对服役寿命和设备利用率的敏感性，本报告进行了一系列敏感性分析。

假设设备服役寿命在 20 到 60 年间变化，设备利用率相对 2020 年水平在 –50% 到 50% 之间变化。（设备利用率范围：电力行业 24%–71%，钢铁行业 39%–100%，水泥行业 41%–100%，100% 代表设备利用率理论上的最大值），由此得到碳锁定效应在不同假设条件下的变化范围。此外，针对钢铁和水泥等重点工业行业，本报告也同时考虑了 CCS 技术在中长期逐步应用对碳锁定效应的影响（二氧化碳去除效率考虑为 90%）。上述敏感性测试可评估碳锁定效应的不确定性和对不同因素的敏感性，并与不同气候目标下剩余碳排放空间等指标进行综合比较。



附录

附表

附表 1：各区域对应的国家和地区列表 *

区域	区域所对应的国家和地区
亚洲（30）	阿富汗、亚美尼亚、阿塞拜疆、孟加拉国、不丹、文莱达鲁萨兰国、柬埔寨、中国（包括台湾省、香港特别行政区和澳门特别行政区）、朝鲜民主主义人民共和国、格鲁吉亚、印度、印度尼西亚、哈萨克斯坦、吉尔吉斯斯坦、老挝、马来西亚、马尔代夫、蒙古、缅甸、尼泊尔、巴基斯坦、菲律宾、新加坡、斯里兰卡、塔吉克斯坦、泰国、东帝汶、土库曼斯坦、乌兹别克斯坦、越南
经合组织 + 欧盟（43）	澳大利亚、奥地利、比利时、保加利亚、加拿大、智利、哥伦比亚、哥斯达黎加、克罗地亚、塞浦路斯、捷克、丹麦、爱沙尼亚、芬兰、法国、德国、希腊、匈牙利、冰岛、爱尔兰、以色列、意大利、日本、拉脱维亚、立陶宛、卢森堡、马耳他、墨西哥、荷兰、新西兰、挪威、波兰、葡萄牙、韩国、罗马尼亚、斯洛伐克、斯洛文尼亚、西班牙、瑞典、瑞士、土耳其、英国、美国
东欧 + 俄罗斯（9）	阿尔巴尼亚、白俄罗斯、波斯尼亚和黑塞哥维那、北马其顿、摩尔多瓦、黑山、俄罗斯、塞尔维亚、乌克兰
中东 + 非洲（71）	阿尔及利亚、安哥拉、巴林、贝宁、博茨瓦纳、布基纳法索、布隆迪、喀麦隆、佛得角、中非共和国、乍得、科摩罗、刚果共和国、科特迪瓦、刚果民主共和国、吉布提、埃及、赤道几内亚、厄立特里亚、埃塞俄比亚、加蓬、冈比亚、加纳、几内亚、几内亚比绍、伊拉克、伊朗、约旦、肯尼亚、科威特、黎巴嫩、莱索托、利比里亚、利比亚、马达加斯加、马拉维、马里、毛里塔尼亚、毛里求斯、马约特岛、摩洛哥、莫桑比克、纳米比亚、尼日尔、尼日利亚、阿曼、巴勒斯坦、卡塔尔、留尼汪、卢旺达、圣赫勒拿、圣多美和普林西比、沙特阿拉伯、塞内加尔、塞舌尔、塞拉利昂、索马里、南非、南苏丹、苏丹、斯威士兰、叙利亚、坦桑尼亚、多哥、突尼斯、乌干达、阿拉伯联合酋长国、西撒哈拉、也门、赞比亚、津巴布韦
拉丁美洲（43）	安提瓜和巴布达、安圭拉、阿根廷、阿鲁巴岛、巴哈马、巴巴多斯、伯利兹、百慕大、玻利维亚、巴西、英属维尔京群岛、开曼群岛、古巴、多米尼加、多明尼加共和国、厄瓜多尔、萨尔瓦多、福克兰群岛、法属圭亚那、格林纳达、瓜德罗普岛、危地马拉、圭亚那、海地、洪都拉斯、牙买加、马提尼克、蒙特塞拉特、尼加拉瓜、荷属安的列斯、巴拿马、巴拉圭、秘鲁、波多黎各、圣基茨和尼维斯、圣卢西亚、圣文森特和格林纳丁斯、苏里南、特立尼达和多巴哥、特克斯和凯科斯群岛、美属维尔京群岛、乌拉圭、委内瑞拉

* 表格内未出现的其他国家和地区未包括在本报告研究范围内

附表 2：“一带一路”沿线涵盖的国家和地区列表 *

国家和地区	
东亚（1）	蒙古
东盟（10）	新加坡、马来西亚、印度尼西亚、缅甸、泰国、老挝、柬埔寨、越南、文莱、菲律宾
西亚（18）	伊朗、伊拉克、土耳其、叙利亚、约旦、黎巴嫩、以色列、巴勒斯坦、沙特阿拉伯、也门、阿曼、阿联酋、卡塔尔、科威特、巴林、希腊、塞浦路斯、埃及的西奈半岛
南亚（8）	印度、巴基斯坦、孟加拉、阿富汗、斯里兰卡、马尔代夫、尼泊尔、不丹
中亚（5）	哈萨克斯坦、乌兹别克斯坦、土库曼斯坦、塔吉克斯坦、吉尔吉斯斯坦
独联体（7）	俄罗斯、乌克兰、白俄罗斯、格鲁吉亚、阿塞拜疆、亚美尼亚、摩尔多瓦
中东欧（16）	波兰、立陶宛、爱沙尼亚、拉脱维亚、捷克、斯洛伐克、匈牙利、斯洛文尼亚、克罗地亚、波黑、黑山、塞尔维亚、阿尔巴尼亚、罗马尼亚、保加利亚、马其顿

* 由于缺少埃及西奈半岛地区的统计资料，本报告中统计“一带一路”沿线国家和地区信息时使用了埃及的数据。

附表 3：中国各区域对应的省份、自治区和直辖市列表 *

区域所对应的省份、自治区和直辖市	
华北（5）	北京市、天津市、河北省、山西省、内蒙古自治区
东北（3）	辽宁省、吉林省、黑龙江省
华东（7）	上海市、江苏省、浙江省、安徽省、福建省、江西省、山东省
华中（3）	河南省、湖北省、湖南省
华南（3）	广东省、广西壮族自治区、海南省
西南（5）	重庆市、四川省、贵州省、云南省、西藏自治区
西北（5）	陕西省、甘肃省、青海省、宁夏回族自治区、新疆维吾尔自治区

* 台湾省、香港特别行政区和澳门特别行政区未包括在中国的分区域研究范围

参考文献

Andrew, R. M. (2019). Global CO_2 emissions from cement production, 1928–2018. *Earth System Science Data, 11,* 1675–1710. https://doi.org/10.5194/essd-11-1675-2019

Chen, C., Xu, R., Tong, D., Qin, X., Cheng, J., Liu, J., Zheng, B., Yan, L., & Zhang, Q. (2022). A striking growth of CO_2 emissions from global cement industry driven by new facilities in emerging countries. *Environmental Research Letters.* http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/ac48b5

Davis, S. J., & Socolow, R. H. (2014). Commitment accounting of CO_2 emissions. *Environmental Research Letters,* 9(8). https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/8/084018

Davis, S. J., Caldeira, K., & Matthews, H. D. (2010). Future CO_2 emissions and climate change from existing energy infrastructure. *Science, 329,* 1330-1333. https://doi.org/10.1126/science.1188566

Global Cement. (2012). Cement in Vietnam. Retrieved from https://www.globalcement.com/magazine/articles/687-cement-in-vietnam

Hoesly, R. M., Smith, S. J., Feng, L., Klimont, Z., Janssens-Maenhout, G., Pitkanen, T., Seibert, J. J., Vu, L., Andres, R. J., Bolt, R. M., Bond, T. C., Dawidowski, L.,Kholod, N., Kurokawa, J., Li, M., Liu, L., Lu, Z., Moura, M. C. P., O'Rourke, P. R., & Zhang, Q. (2018). Historical (1750–2014) anthropogenic emissions of reactive gases and aerosols from the Community Emissions Data System (CEDS). *Geoscientific Model Development, 11(1),* 369-408. https://doi.org/10.5194/gmd-11-369-2018

IEA. (2020). Iron and Steel Technology Roadmap. Retrieved from https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap

IEA. (2021a). World Enegy Statistics and Balances 2021. Retrieved from https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-statistics-and-balances

IEA. (2021b). Global EV Data Explorer. Retrieved from https://www.iea.org/articles/global-ev-data-explorer

IEA. (2021c). Global EV Outlook 2021. Retrieved from https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021

IPCC. (2006). IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Retrieved from https://www.ipcc.ch/report/2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/

IRENA. (2019). Renewable Capacity Statistics 2019. Retrieved from https://www.irena.org/publications/2019/Mar/Renewable-Capacity-Statistics-2019

IRENA. (2020). Renewable Power Generation Costs in 2019. Retrieved from https://www.irena.org/publications/2020/Jun/Renewable-Power-Costs-in-2019

IRENA. (2021a). Renewable Capacity Statistics 2021. Retrieved from https://www.irena.org/publications/2021/March/Renewable-Capacity-Statistics-2021

IRENA. (2021b). Renewable Power Generation Costs in 2020. Retrieved from https://www.irena.org/publications/2021/Jun/Renewable-Power-Costs-in-2020

Le Quéré, C., Jackson, R.B., Jones, M.W., Smith, A.J., Abernethy, S., Andrew, R.M., De-Gol, A.J., Willis, D.R., Shan, Y., Canadell, J.G., Friedlingstein, P., Creutzig, F., & Peters, G.P. (2020). Temporary reduction in daily global CO_2 emissions during the COVID-19 forced confinement. *Nature Climate Change, 10(7),* 647-653. https://doi.org/10.1038/s41558-020-0797-x

Liu, F., Zhang, Q., Tong, D., Zheng, B., Li, M., Huo, H., & He, K. (2015). High-resolution inventory of technologies, activities, and emissions of coal-fired power plants in China from 1990 to 2010. *Atmospheric Chemistry and Physics, 15(23),* 13299-13317. https://doi.org/10.5194/acp-15-13299-2015

Liu, J., Tong, D., Zheng, Y., Cheng, J., Qin, X., Shi, Q., Yan, L., Lei, Y., & Zhang, Q. (2021). Carbon and air pollutant emissions from China's cement industry 1990–2015: trends, evolution of technologies, and drivers. *Atmospheric Chemistry and Physics, 21(3),* 1627-1647. https://doi.org/10.5194/acp-21-1627-2021

Liu, Z., Ciais, P., Deng, Z., Lei, R., Davis, S. J., Feng, S., Zheng, B., Cui, D., Dou, X., Zhu, B., Guo, R., Ke, P., Sun, T., Lu, C., He, P., Wang, Y., Yue, X., Wang, Y., Lei, Y., ... Schellnhuber, H. J. (2020). Near-real-time monitoring of global CO_2 emissions reveals the effects of the COVID-19 pandemic. *Nature communications, 11(1),* 5172. https://doi.org/10.1038/s41467-020-18922-7

Qin, X., Tong, D., Liu, F., Wu, R., Zheng, B., Zheng, Y., Liu, J., Xu, R., Chen, C., Yan, L., & Zhang, Q. (2022). Global and regional drivers of power plant CO_2 emissions over the last three decades. https://doi.org/10.31223/X5XC90

Rogelj, J., Shindell, D., Jiang, K., Fifita, S., Forster, P., Ginzburg, V., Handa, C., Kheshgi, H., Kobayashi, S., Kriegler, E., Mundaca, L., Séférian, R., & Vilariño, V.M. (2018). Mitigation pathways compatible with 1.5 C in the context of sustainable development. In Global warming of 1.5° C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty (eds. Masson-Delmotte, V. et al.). Retrieved from https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/05/SR15_Chapter2_Low_Res.pdf

Tong, D., Zhang, Q., Davis, S.J., Liu, F., Zheng, B., Geng, G., Xue, T., Li, M., Hong, C., Lu, Z., Streets, D. G., Guan, D., & He, K. (2018). Targeted emission reductions from global super-polluting power plant units. *Nature Sustainability, 1,* 59-68, doi: https://doi.org/10.1038/s41893-017-0003-y

Tong, D., Zhang, Q., Zheng, Y., Caldeira, K., Shearer, C., Hong, C., Qin, Y., & Davis, S.J. (2019). Committed emissions from existing energy infrastructure jeopardize 1.5 ℃ climate target. *Nature, 572(7769),* 373-377. https://doi.org/10.1038/s41586-019-1364-3

USGS. (2021). Mineral commodity summaries 2021. Retrieved from https://pubs.er.usgs.gov/publication/mcs2021

Wang, X., Lei, Y., Yan, L., Liu, T., Zhang, Q., & He, K. (2019). A unit-based emission inventory of SO_2, NOx and PM for the Chinese iron and steel industry from 2010 to 2015. *Science of the Total Environment, 676,* 18-30. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.241

World Steel Association. (2021). Steel Statistical Yearbook 2021. Retrieved from https://www.worldsteel.org/steel-by-topic/statistics/steel-statistical-yearbook.html

Xu., R, Tong, D., Zheng B., Davis, S. J., Qin, X., Cheng, J., Shi, Q., Liu, Y., Chen, C., Yan, L., He, K., & Zhang, Q. Trends and inertia in CO_2 emissions from the global steel industry 1990-2019. In preparation.

Yan, L., Zheng, B., Geng, G., Hong, C., Tong, D., & Zhang, Q. (2021). Evaporation process dominates vehicular NMVOC emissions in China with enlarged contribution from 1990 to 2016. Environmental Research Letters. http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/ac3872

Zhang, Q., Zheng, Y., Tong, D., Shao, M., Wang, S., Zhang, Y., ... Hao, J. (2019). Drivers of improved $PM_{2.5}$ air quality in China from 2013 to 2017. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 116(49),* 24463-24469. https://doi.org/10.1073/pnas.1907956116

Zheng, B., Tong, D., Li, M., Liu, F., Hong, C., Geng, G., Li, H., Li, X., Peng, L., Qi, J., Yan, L., Zhang, Y., Zhao, H., Zheng, Y., He, K., & Zhang, Q. (2018). Trends in China's anthropogenic emissions since 2010 as the consequence of clean air actions. *Atmospheric Chemistry and Physics, 18(19),* 14095-14111. https://doi.org/10.5194/acp-18-14095-2018

国家发展改革委、外交部、商务部 . (2015).《推动共建丝绸之路经济带和 21 世纪海上丝绸之路的愿景与行动》. Retrieved from http://hr.mofcom.gov.cn/article/jmxw/201503/20150300925991.shtml

绿色和平组织 . (2021). 绿色复苏全球进行时 —— 疫后复苏国际案例集 . Retrieved from https://www.greenpeace.org.cn/green-recovery-policy-brief-pr-20210604/

商务部 . (2020).《越南跻身世界最成功的 16 个新兴经济体行列》. Retrieved from http://www.mofcom.gov.cn/article/i/jyjl/j/202008/20200802995190.shtml

推进“一带一路”建设工作领导小组办公室 . (2021). 中国一带一路网 . Retrieved from https://www.yidaiyilu.gov.cn/info/iList.jsp?cat_id=10037

新华社 . (2018). 我国钢铁行业在创新中加快推进高质量发展 . Retrieved from https://baijiahao.baidu.com/s?id=1601126243836429739&wfr=spider&for=pc

闫柳 . (2021). 道路移动源精细化排放清单构建及未来排放情景研究 [博士论文]. 北京：清华大学 .

中国电力企业联合会 . (2021). 中国电力统计年鉴 2020. 中国统计出版社 .

中国钢铁工业年鉴编辑委员会 . (2021). 中国钢铁工业统计年鉴 2020. 中国冶金出版社 .

2021

全球能源基础设施碳排放及锁定效应

免责声明

本报告受方法和数据所限，不当之处在所难免。报告相关结论和政策建议仅代表作者团队个人观点，不代表作者所在单位和机构及报告资助方观点。