全球能源基础设施数据库建设及 2019-2021 年碳锁定核算

Development of Global Energy Infrastructure Emissions Database (GID) and Assessment of 2019-2021 Committed Emissions

Development of Global Energy Infrastructure Emissions Database (GID) and Assessment of 2019-2021 Committed Emissions

清华大学

2023.3.28

Tsinghua University

March 28, 2023

目录

一、项目背景 3

二、项目目标及主要任务 5

三、方法学简介 8

3.1 全球能源基础设施基础信息数据库构建..... 8

3.2 碳排放动态表征..... 8

3.3 碳锁定效应核算..... 9

四、项目研究进展 10

4.1 全球重点行业能源基础设施建设发展现状..... 10

4.1.1 电力行业..... 10

4.1.2 钢铁行业..... 21

4.1.3 水泥行业..... 24

4.1.4 道路交通行业..... 29

4.1.5 炼油行业..... 31

4.2 全球能源基础设施碳排放变化..... 34

4.2.1 电力行业..... 34

4.2.2 钢铁行业..... 39

4.2.3 水泥行业..... 42

4.2.4 道路交通行业..... 46

4.2.5 炼油行业..... 49

4.3 全球能源基础设施碳排放锁定效应..... 51

4.3.1 2021 年能源基础设施碳排放锁定效应 51

4.3.2 2019-2021 年碳排放锁定效应变化趋势 54

4.3.3 2021 年能源基础设施锁定碳排放对全球气候目标的威胁 57

4.3.4 2021 年全球碳排放锁定效应的敏感性分析 58

4.4 中国能源基础设施发展及碳排放锁定效应..... 60

4.4.1 能源基础设施时空演变及现状..... 61

4.4.2 碳锁定演变及低碳转型挑战..... 67

4.4.3 落后产能淘汰及其碳锁定解除..... 78

4.4.4 解除“碳锁定”：迈向碳中和.....79
4.5 “一带一路”沿线国家能源基础设施碳排放锁定效应与绿色共建机遇.82
4.5.1 “一带一路”沿线国家发展概况.....82
4.5.2 主要能源基础设施发展情况.....84
4.5.3 能源基础设施碳排放演变.....100
4.5.4 能源基础设施碳锁定效应.....110
4.5.5 “一带一路”绿色共建挑战与机遇.....114
五、项目研究展望 118
参考文献 120

一、项目背景

能源基础设施是当今人类社会生产和消费能源的基本载体，是国民经济和社会生产发展的重要基石；但同时其也是化石燃料燃烧利用和二氧化碳等温室气体排放的基本单元，其发展和变化对气候环境产生重要影响。自工业化时代以来，为满足日益增长的能源需求和产品需求，全球能源基础设施规模不断扩张，碳排放量持续攀升。近十年来，尽管基于风光资源等的新能源基础设施取得突破性发展，大量以传统化石燃料为动力的能源基础设施仍在不断新建、投运和规划，全球气候治理和碳减排仍充满挑战。因此，理解能源基础设施历史发展规律、追踪其最新变化发展是当前进行气候决策和治理的重要科学基础。

根据联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）发布的第六次评估报告（AR6），2011-2020 年间全球地表平均温度相较 1850-1900 年已上升 1.09℃，全球温升与人为二氧化碳排放累积量之间的准线性关系再次得到系统验证和评估（IPCC, 2021）。最新测算显示，自 2020 年起，为实现 1.5℃全球温控目标全球碳排放预算（Carbon Budget）仅剩余 4000-5000 亿吨二氧化碳（50%-67%执行区间），即使在 2℃温控目标下，碳预算亦不足 15000 亿吨（11500-13500 亿吨）。然而仅在 2020-2021 年间，人类活动合计释放近 700 亿吨二氧化碳，碳预算空间正以惊人的速度缩减。同时，世界多地化石能源基础设施新建仍然活跃，其服役时间可长达几十年，考虑建设成本和就业等因素其一旦建成投产短时间内难以停产或退役，因此将在未来一定时间内不断产生二氧化碳排放，即产生了碳排放锁定效应（图 1-1）。定量理解碳排放锁定效应的变化，进而设计和实行相应的“解锁”方案，是实现全球温控目标的重要举措。

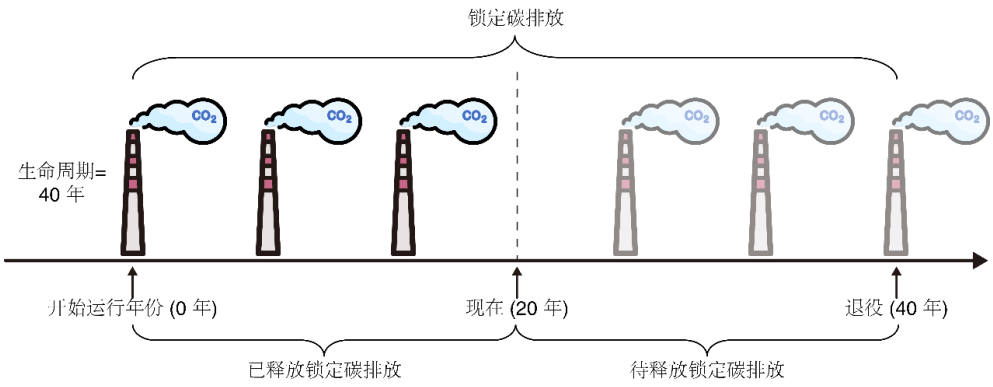

图 1-1 碳排放锁定效应概念图

2020 年全球范围新冠疫情爆发，而风电和光伏等新能源产业逆势增长再创新高，显著放缓了主要化石能源基础设施建设，后疫情时代“绿色复苏”一时备受期待。但是，2021 年新兴经济体能源基础设施扩张迅速重启，全球碳排放快速反弹，大量经济复苏资金仍然流向化石能源项目（O’Callaghan and Murdock, 2021），后疫情时代的能源基础设施发展是否“绿色”、碳排放及其锁定效应能否得到减缓仍存在巨大变数。因此，本项目依托全球能源基础设施排放数据库（Global Energy Infrastructure Emissions Database，简称 GID）中超过十万个能源基础设施信息，从理解全球电力、钢铁、水泥、道路交通和炼油等重点行业能源基础设施历史变化出发，聚焦最新（2019-2021 年）设施新建和退役情况，分析其近年碳排放变化趋势，并更新全球能源基础设施碳锁定效应核算结果，为科学评估和政策决策提供及时的科学支撑。

二、项目目标及主要任务

由能源基金会、清华大学碳中和研究院和清华大学全球变化研究院等机构支持，《全球能源基础设施锁定效应》系列项目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发展、排放和锁定效应的新方法，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。具体包括但不限于以下几个方面：构建并持续更新全球能源基础设施排放数据库（GID），逐步拓展行业覆盖，追踪全球能源基础设施发展及其碳排放动态变化；逐年更新全球能源基础设施碳排放锁定效应核算，及时评估其与碳预算空间的动态关系，揭示最新气候威胁；聚焦中国和“一带一路”国家能源基础设施发展和碳锁定效应变化，为新兴经济体低碳转型进程提供科学支撑。

第一期项目《全球能源基础设施锁定效应 2019-2020》顺利完成了任务目标，为后续的研究和拓展奠定了坚实基础。项目初步构建了覆盖火电、钢铁和水泥等重点行业和道路交通部门的全球能源基础设施排放数据库（GID），并更新至 2020 年；基于 GID 数据库，追踪近 30 年全球重点行业能源基础设施设备级碳排放并揭示其变化驱动因素；更新 2019-2020 年全球能源基础设施碳排放锁定效应核算，分析其与《巴黎协定》气候目标下碳预算空间的最新动态关系；聚焦中国和“一带一路”新兴经济体能源基础设施发展，针对其设施扩张特征和碳排放演变等开展细致研究。第一期项目成果以《全球能源基础设施碳排放及锁定效应 2021》报告形式公开发布，在科学界和相关行业取得较好反响。

通过第一期项目工作，项目团队深刻认识到全球能源基础设施发展的动态特征和时空异质性，由此显著影响其碳排放和锁定效应最新变化，因此每年及时追踪其发展动向、定量其排放水平并更新锁定效应核算具有重要的科学和政策指导意义；需要进一步拓展行业覆盖，开发石化和化工等高碳行业的排放数据库，从而更全面深入的追踪能源基础设施发展；面向各行业差异化的短期和中长期潜在低碳转型路径，应当考虑更多行业“个性化”的未来情景以更全面的量化其锁定效应；针对众多新兴经济体，可更深入开展重点国家调研，结合资源禀赋、产业

结构和社会形态等国家本地化特征进行细致的能源基础设施研究分析，提供更符合其国情和发展需要的低碳转型建议。

第二期项目《全球能源基础设施锁定效应 2019-2021》拟基于第一期项目建立的数据基础和技术方法，拓展和更新相关研究结果，并针对上述问题开展更为细致深入的研究。本项目拟通过大数据挖掘等方式收集海量最新能源基础设施关键信息（设施新建和退役、生产规模、地理位置等），完善已建立的火电、钢铁、水泥等重点行业设备级排放动态表征模型，将全球能源基础设施排放数据库更新至 2021 年，揭示能源基础设施发展及其碳排放最新动态；同时，通过多源大数据融合等方法构建全新的全球炼油厂排放数据库，扩充行业类型并开展相应分析。基于最新数据库设备级信息，更新 2019-2021 年全球能源基础设施碳排放锁定效应核算结果，以《巴黎协定》温控目标和 IPCC AR6 最新碳排放预算为重要指标，分析全球能源低碳转型和气候治理的挑战和机遇。进一步聚焦中国和“一带一路”国家等新兴经济体，重点分析其近年来能源基础设施发展情况并评估其碳排放锁定效应，为新兴经济体协调短期经济发展与长期气候目标提供科学支撑和政策建议。

本项目包括三个主要任务。第一，全球能源基础设施数据库建设：一方面，拓展 GID 行业覆盖，初步建立 2000-2018 年全球炼油厂排放数据库，并对全球炼油行业能源基础设施发展及碳排放变化展开分析；另一方面，由于 2021 年后疫情时代电力、钢铁、水泥等行业发展逐步复苏，本项目在已有的 2019-2020 年数据库基础上更新了 2021 年能源基础设施发展的最新变化，并重点对比分析全球疫情前和疫情后的能源基础设施建设变化趋势以及影响因素。此外，构建 1990-2021 年长时间序列的火电行业基础信息数据库和拟建电厂基础信息数据库，并分析重点国家和区域的技术变化等特征。第二，2019-2021 年全球能源基础设施碳锁定效应核算：在已有 2019-2020 年核算基础上，将全球在运行和已规划能源基础设施碳锁定效应核算更新至 2021 年并进行区域和行业尺度分析；根据《巴黎协定》的 1.5℃和 2℃温升目标及 IPCC 最新碳排放预算估计，比对分析不同目标下碳锁定效应与碳排放预算的关系，量化服役寿命等不同因素的敏感性。第三，中国和新兴经济体碳锁定效应核算。具体任务包括：对中国省级尺度能源基础设

施碳锁定效应分省和行业尺度分析，进一步量化探究不同能源基础设施退役路径等对中国碳锁定效应的影响；对“一带一路”新兴经济体 2019-2021 年碳锁定效应进行核算并分析其变化特征，综合考虑其未来发展和气候治理提供相应科学政策建议。

三、方法学简介

3.1 全球能源基础设施基础信息数据库构建

项目团队针对火电、钢铁、水泥等重点行业能源基础设施开展大数据挖掘，融合行业全球设备级基础信息数据库（如 WEPP 数据库）、非政府组织（NGO）数据库、重点国家高精度本地数据库（如美国 eGRID 数据库）和国家污染源清单等多源异构数据，获得覆盖全球电力、水泥、钢铁行业十万多个产耗能设施的基础信息数据库，包含设备级地理位置、投运和关闭时间、生产技术和产能等关键信息。其中，重点建立 1990-2021 年长时间序列电力行业基础信息数据库和拟建电厂基础信息数据库，覆盖已有、在建、拟建和已批准建设的各类电力能源基础设施的基础信息。在第一期数据库建设基础上（Qin et al., 2022; Chen et al., 2022, Xu et al., 2022），项目团队利用最新全球数据库（如 USGS 数据库）和国际组织报告，梳理、整合、校验设备级新建和退役信息，将火电、钢铁、水泥行业数据库及时更新至 2021 年。

项目团队针对炼油行业，初步建立 2000-2018 年全球工厂级基础信息数据库。团队融合 GlobalData 和 Enerdatabase 两大数据库，获取全球炼油厂名称、运营商和地理信息等关键基础数据，再结合 Industryabout 数据库、OpenStreet 地图和 A Barrel Full 数据库等补充缺失的产能、投产和退役时间、经纬度等信息（Lei et al., 2021）。通过多源数据融合，最终构建包括 2000-2018 年间约 1000 个炼油厂的全球基础信息数据库，包括所有权信息、地理位置数据、投产和退役时间、运行状态、产能等工厂级数据，覆盖 24 种工艺单元和轻度加氢型等 10 种配置类型。

3.2 碳排放动态表征

基于上述设备或工厂级基础信息，项目团队进一步收集各区域设备或工厂级产能利用率等数据，并以国际能源署（IEA）能源消费数据和多源产品产量数据为约束（IEA, 2022; USGS, 2022），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或工厂的能源消费数据。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 IEA 能源消费数据进行估计。其中，2021 年各行业能源消费数据基于 IEA 数据库和 bp 能源报告进行推算（IEA, 2022; BP, 2022），主要产品产量数据来自最新 USGS 和 bp 数据库（USGS, 2022; BP, 2022）。

在设备或工厂级能源消费量基础上，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, 2022; IPCC, 2006），计算得到逐个设备或工厂的二氧化碳排放量，实现了能源基础设施碳排放动态表征。其中，中国大陆地区火电、钢铁和水泥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）。

3.3 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。

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

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, 2022; USGS, 2022），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, 2022; IPCC, 2006）。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。为反映新建能源基础设施对碳排放锁定效应的影响，本报告核算 2020 年碳锁定效应时仍以 2019 年碳排放作为基准年碳排放。

本报告根据已有研究和历史设施退役数据（Davis et al., 2010; 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。

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），本报告基准碳锁定效应基于主要能源基础设施 40 年平均服役寿命和维持基准年平均产能利用率的假设进行核算。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，本报告进行了多组敏感性分析，并针对火电等重点行业设置不同未来情景更为全面的量化其碳锁定效应。

四、项目研究进展

4.1 全球重点行业能源基础设施建设发展现状

4.1.1 电力行业

4.1.1.1 全球火电基础设施新建与退役

电力行业是保障社会经济繁荣发展的基础行业。全球电力需求显著增长，行业总发电量从 1990 年的 7.6 百万吉瓦时增长到 2021 年的 18.0 百万吉瓦时，近三年电力行业总发电量在 2020 年受到疫情影响出现约 4%的小幅下降，在 2021 年又出现 6%的反弹。同时全球电力行业的发电结构不断动态变化。1990-2021 年间，可再生能源发电量显著增长，光能、风能和其他可再生能源的发电量占比从 1990 年的 2%增长到了 2021 年的 17%。其中光能和风能是主要的增长驱动因素。燃煤和燃油发电量出现紧缩，而燃气发电量占比扩大，到 2021 年，燃煤发电量占总发电量的 48%，燃气和燃油分别占 31%和 3%（图 4-1）。

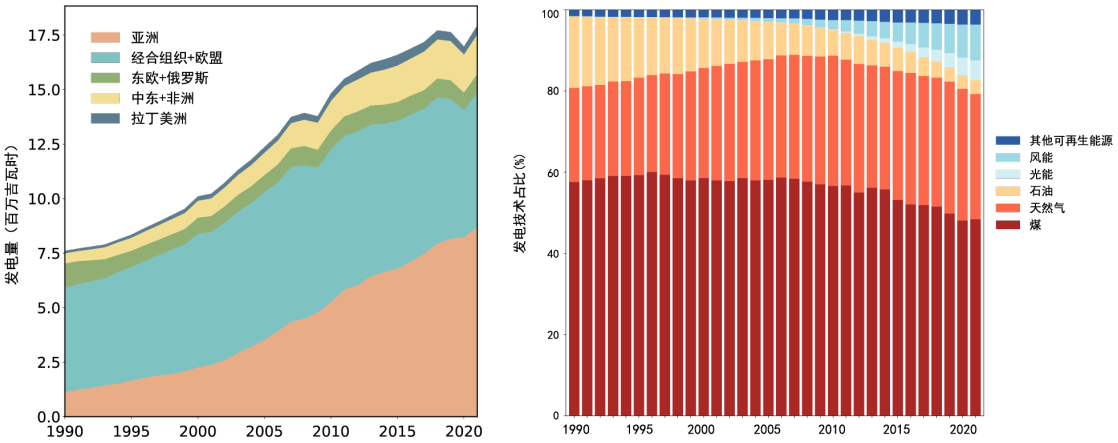

图 4-1 1990-2021 年全球分地区发电量以及不同发电技术的发电量占比

火电厂指以煤炭、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。近三十年来，全球火电基础设施快速扩张，以燃煤为主（图 4-2）。新建燃煤机组占全球新建火电装机容量的 49.7%，其次是燃气（39.9%）和燃油（7.3%）。全球新建火电基础设施装机容量呈现先上升再下降的趋势，经历了缓慢发展期（1990-2000 年）、快速增长期（2000-2010 年）和波动下降期（2010-2021 年）。在缓慢发展期，全球新建火电基础设施以年均 6.9%的速度缓慢上升。随后进入了快速增长期，10 年间全球新建火电基础设施装机容量增长了 89%（从 2000 年的 101 吉瓦增长至 2010 的 192 吉瓦），增速高达 6.6%。而自 2010 年之后，全球火电基础设施建设进入了波动下降期，以年均 7.1%的速度下降。

2019-2021 年，全球新建火电装机容量以年均 16.7%的速率持续下降。在新冠疫情以及全球新增光伏和风电装机容量持续增长的影响下，2020 年全球火电基础设施装机容量发生了明显下降，较上一年下降了 23.2%。2020-2021 年，全球火电基础设施装机容量仍表现为下降态势，随着全球疫情形势明显缓解，社会经济发展逐步回归常态，其下降速度变缓（较 2020 下降了 9.6%）。

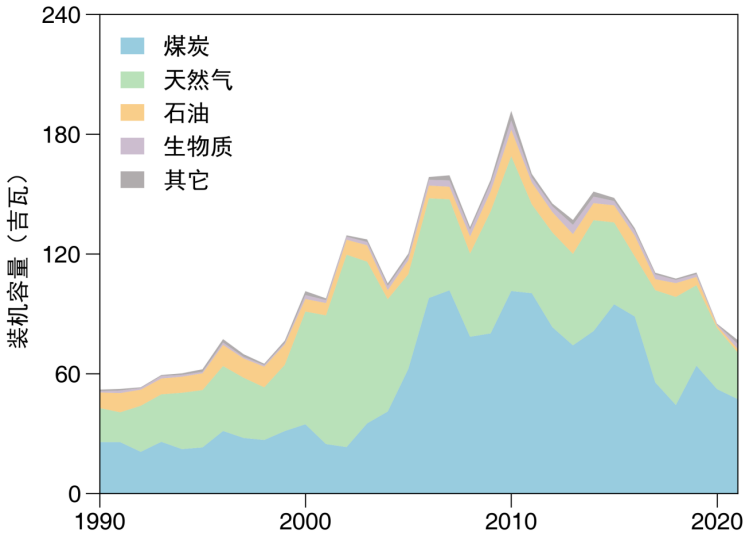

图 4-2 1990-2021 年全球新建火电装机容量

2019-2021 年全球新建煤电产能呈现下降趋势。总体而言，2015-2021 年全球新建煤电产能以年均 11.0%的速度下降，2021 年新建煤电产能约为 2015 年新建煤电产能的一半（图 4-3）。2019-2021 年全球新建煤电产能持续下降（年均速率为 14%），其中 2020 年下降速率最快。2019-2020 期间，全球煤电产能建设受到了疫情的阻碍，新建产能下降最快（年均速率为 18.4%）。随着复工复产的有序推进，2021 年，全球煤电新建产能下降速度放缓，较上一年下降了 9.6%。从 2019-2021 年重点地区煤电新建产能来看，以发展中国家为主的亚洲主导了全球煤电新建，占全球总装机容量的 86.9%，其次是以发达国家为主的经合组织与欧盟地区（8.6%）、中东和非洲（3.3%）。以发达国家为主的经合组织与欧盟地区同期淘汰了 57 吉瓦的煤电机组，对全球退役煤电装机容量的贡献最大（76.2%）。亚洲快速发展燃煤电厂的同时，也淘汰了低效、落后的燃煤机组，占 2019-2021 年全球退役煤电装机容量的 22.3%，仅次于经合组织与欧盟地区。从 2019-2021 年煤电退役分布情况来看，以中国为主的发展中国家和德国、英国、法国等发达国家均大力实施燃煤电厂有序退出的措施，美国和中国分别淘汰了 19 吉瓦和 11 吉瓦的煤电机组，占到全球总淘汰量的 41%。其次是德国、英国和法国，分别淘汰了 7 吉瓦、5 吉瓦和 1 吉瓦的煤电机组。

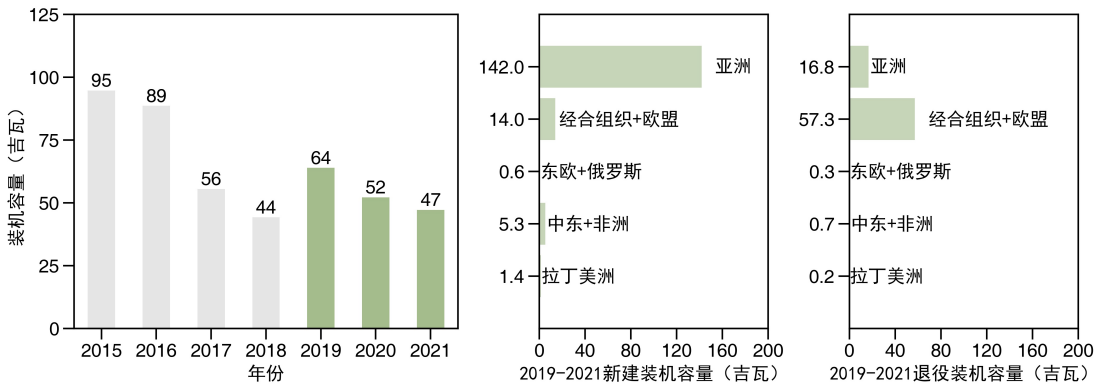

图 4-3 全球煤电基础设施新建和退役装机容量

4.1.1.2 1990-2021 年全球火电基础设施分布特征

为满足电力需求的增长，全球火电基础设施快速扩张。全球火电装机容量从 1990 年的 1774GW 增长到 2021 年的 4344GW。在区域层面，以发展中国家为主的地区在近三十年来经历了社会经济快速发展阶段和电力需求持续增长时期，火电装机容量增长速度比以发达国家为主的地区快（图 4-4）。以亚洲和经合组织与欧盟地区为例，1990-2021 年间，亚洲火电装机容量增加了 6.8 倍，而经合组织与欧盟地区电力需求相对稳定，火电装机容量仅增长了 44.5%。此外，受到能源资源禀赋和气候环境政策的影响，区域间火电基础设施扩张的燃料类型特征存在明显差异。例如，受煤电向气电转型政策的影响，经合组织与欧盟地区逐渐减少燃煤电厂建设，大力发展燃气机组，而煤炭资源丰富的亚洲国家，如印度和印度尼西亚，仍以建设燃煤机组为主，油气资源富足的中东国家（如沙特阿拉伯和伊朗）则持续致力于推动燃油和燃气机组的发展。

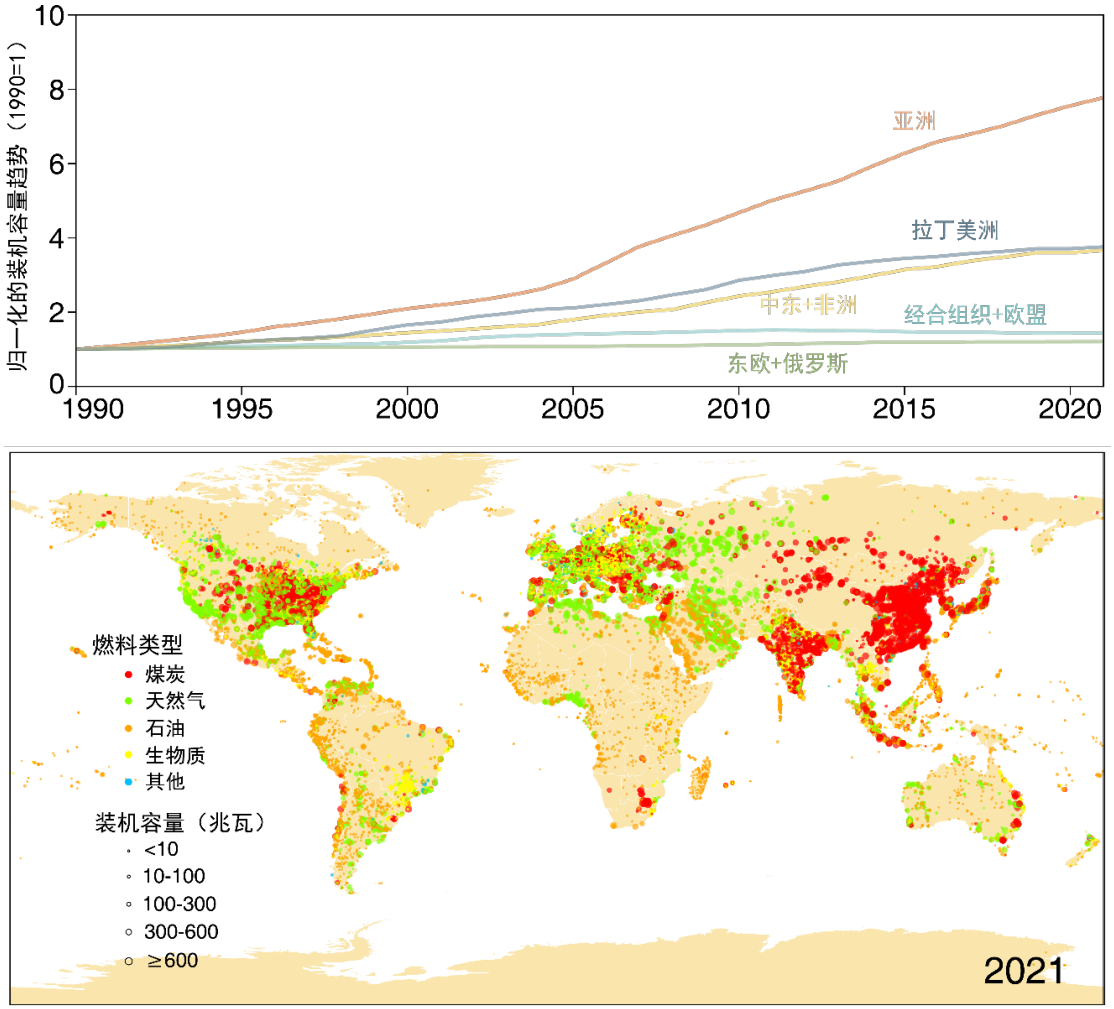

图 4-4 全球火电厂产能演变趋势及空间分布

在火电行业迅速发展的背景下，当前全球火电机组呈现年轻化分布的特征。2021 年全球服役年限在 20 年以内的新机组占火电总装机容量的 59.3%，而服役年限在 40 年以上的老旧机组仅占 15.5%（图 4-5）。火电机组建设存在显著的时空差异和燃料类型差异，体现了区域间经济发展、资源禀赋和环境政策的不同。年轻化的分布格局由亚洲的煤电机组、经合组织与欧盟和中东和非洲地区的燃气机组和燃油机组主导，贡献了全球服役年限在 20 年以内的火电装机容量的 82.2%。而经合组织与欧盟地区主导了服役年限在 40 年以上的老旧煤电机组，占全球服役年限在 40 年以上的老旧煤电机组装机容量的 73.7%。

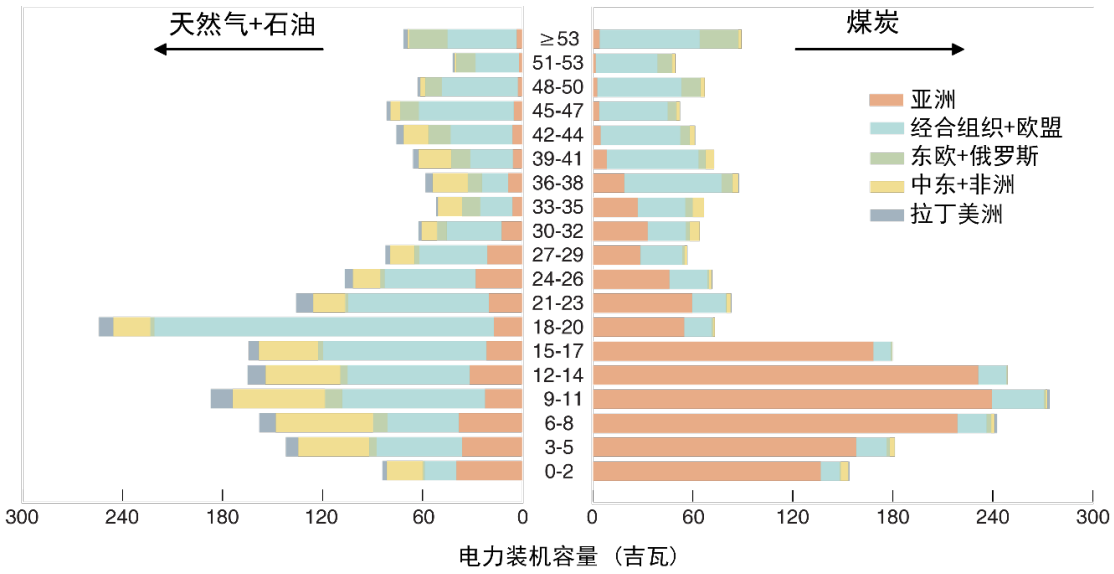

图 4-5 2021 年全球不同服役年限火电机组装机容量分布

在火电基础设施快速增长的背景下，燃煤电厂主导了全球火电装机容量增长的趋势。全球燃煤电厂装机容量在近三十年间增长了 1.4 倍（图 4-6），约占 2021 年全球火电总装机容量的一半，对火电装机容量增量的贡献也最大（49.2%）。尽管燃气电厂装机容量增量低于燃煤电厂，但从增长速度来看，燃气电厂年均增长速度（4.1%）比燃煤电厂（2.8%）快。燃气电厂的快速建设使其占全球火电总装机容量的比例明显上升（从 1990 年的 27%增加到 2021 的 37%）。而燃煤电厂占火电总装机容量的比例在过去三十年间基本保持稳定，在 50%的范围内波动。与燃煤和燃气电厂的增长趋势不同，全球燃油电厂装机容量呈下降趋势，其占全球火电装机容量的比例也随之下降。截至 2021 年，燃油电厂仅占全球火电装机容量的 10.1%。

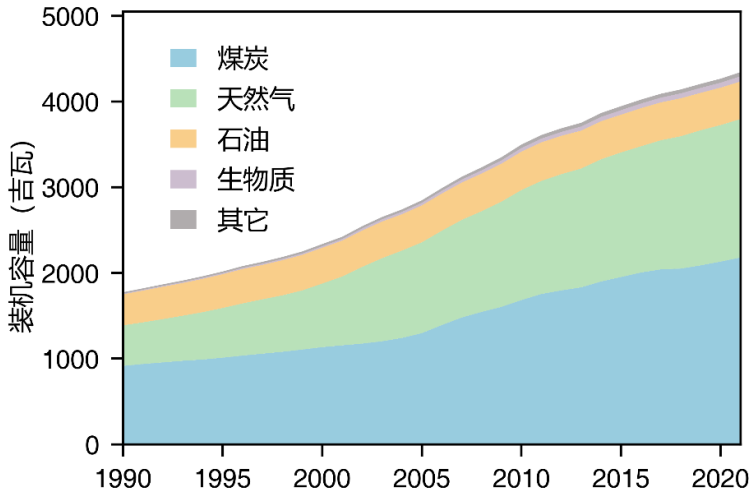

图 4-6 1990-2021 年全球火电厂分燃料类型的装机容量

通过大力发展装机容量较大的火电机组，火电装机结构不断优化。火电装机结构呈现出由小型火电机组（＜100MW）向大型火电机组（≥300MW）转变的特点（图 4-7）。随着时间的推移和火电机组的扩张，新建小型火电机组不断减少，小型火电机组占全球新建火电机组个数的比例从 1990 年的 93.3%下降至 2021 年的 66.5%。从在役火电装机结构来看，全球小型火电机组占总装机容量的比例呈现下降趋势，目前仅占 19.9%。全球大型火电机组装机容量增长显著，近三十年增长了 188.5%（从 1990 年的 778.2 吉瓦上升至 2021 年的 2245.4 吉瓦）。大型火电机组占总装机容量的比例明显提升，从 1990 年的 43.9%上升至 2021 年的 49.7%。

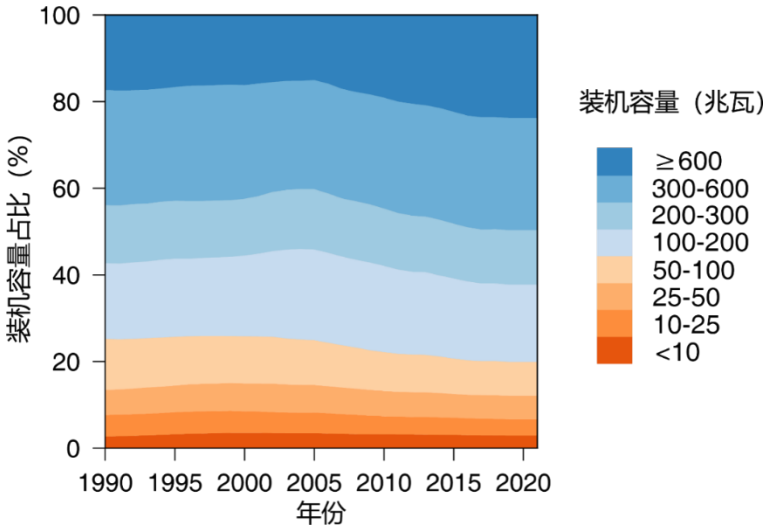

图 4-7 1990-2021 年全球火电机组装机容量分布

4.1.1.3 后疫情时代全球拟新建火电厂分布特征

全球拟新建火电装机容量为 982.5 吉瓦，主要分布在亚洲、经合组织与欧盟地区、中东和非洲（图 4-8）。其中，亚洲拟新建火电厂为 584.9 吉瓦，对全球拟新建火电装机容量的贡献最大（59.5%），其次是经合组织与欧盟地区（22.1%）和中东与非洲（14.7%）。依托丰富的煤炭资源，亚洲拟新建火电装机容量以燃煤为主，燃煤电厂占其规划总装机容量的 72.0%。而经合组织与欧盟地区正在减少燃煤电厂的建设，燃煤电厂仅占其规划总量的 8.2%。同时，经合组织与欧盟地区大力推进燃气电厂建设，拟新建燃气电厂占主导地位，贡献了该地区拟新建火电总装机容量的 86.1%。由于天然气资源储量充足，中东和非洲地区燃气电厂建设发展迅速，其拟新建燃气装机容量（112.6 吉瓦）仅次于经合组织与欧盟地区，占中东和非洲地区拟新建火电装机容量的 78.1%。

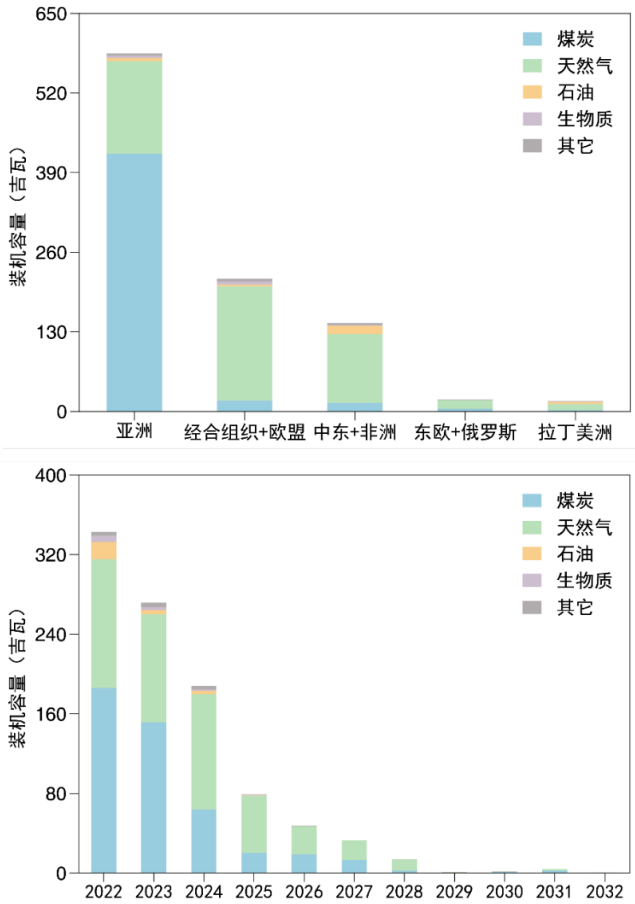

图 4-8 全球拟新建火电装机容量的区域分布和燃料类型分布

全球拟新建火电装机容量在早期以燃煤电厂为主，后期以燃气电厂为主。未来十年，计划在 2022 年建设的火电装机容量最多，约 342.8 吉瓦，计划在 2032 年建设的火电装机容量最少（0.7 吉瓦）。不同时期拟新建火电厂的燃料类型特征分布不同。例如，燃煤电厂主导了 2022-2023 年拟新建火电装机容量（占拟新建总装机容量的 54.9%），而燃气机组主导了 2024-2032 年拟新建火电装机容量，贡献了该阶段拟新建总量的 64.2%。总体而言，全球范围内拟新建燃气电厂装机容量最大，约 474.9 吉瓦，其次是拟新建燃煤电厂（459.1 吉瓦）。拟新建燃油电厂、生物质电厂和其他化石燃料电厂装机容量较少，总共仅占全球拟新建火电装机容量的 4.9%。

4.1.1.4 后疫情时代全球新能源基础设施发展概况

近十年来全球光伏和风电产业实现跨越式发展，2019-2021 年仍然增长迅速。自 2010 年起，随着可再生能源成本下降，全球新增光伏和风电装机容量快速增长（图 4-9），其中，新增光伏装机容量最多，约 823.0 吉瓦。2019-2021 年全球新增光伏装机容量 358.0 吉瓦，超过了新增风电装机容量（262.6 吉瓦）。尽管 2020 年新冠疫情在一定程度上影响了工业生产的顺利开展，但全球新增光伏和风电装机容量仍保持增长趋势。2020 年全球新增光伏装机容量为 126.8 吉瓦，较 2019 年增长了 28.9%，而全球新增风电装机容量增速高达 90%。后疫情时代下全球新增光伏装机容量仍呈现增长趋势，2020-2021 年增长势头强劲，创历史新高（132.8 吉瓦），而同期全球新增风电装机容量有所下降，同比下降 16.1%。尽管 2021 年全球新增风电装机容量下降至 93.1 吉瓦，但 2019-2021 年全球新增风电装机容量仍表现为上升趋势，其年均增长量仍高于平均水平。

亚洲可再生能源开发利用规模快速扩大，主导了近年来全球新增光伏和风电装机容量。总体而言，以发展中国家为主的亚洲和以发达国家为主的经合组织与欧盟地区共同主导了近十年全球新增光伏和风电装机容量。例如，亚洲贡献了 2010-2021 年全球新增光伏装机容量的 47.9%，与经合组织与欧盟的贡献（46.7%）相当。随着亚洲可再生能源的迅速发展，2019 年亚洲新增光伏和风电装机容量已超过经合组织与欧盟，贡献了全球新增光伏装机容量的 46.0%和新增风电装机

容量的 48.0%。尽管受到 2020 年新冠疫情的影响，亚洲仍大力发展可再生能源，特别是风电，贡献了 2020 年全球新增风电装机容量的 66.7%。在后疫情时代下，亚洲仍是全球新增光伏和风电装机容量的主要贡献地区。以光伏为例，2021 年亚洲建设了 67.9 吉瓦的光伏，贡献了全球新增光伏总装机容量的 51.1%。

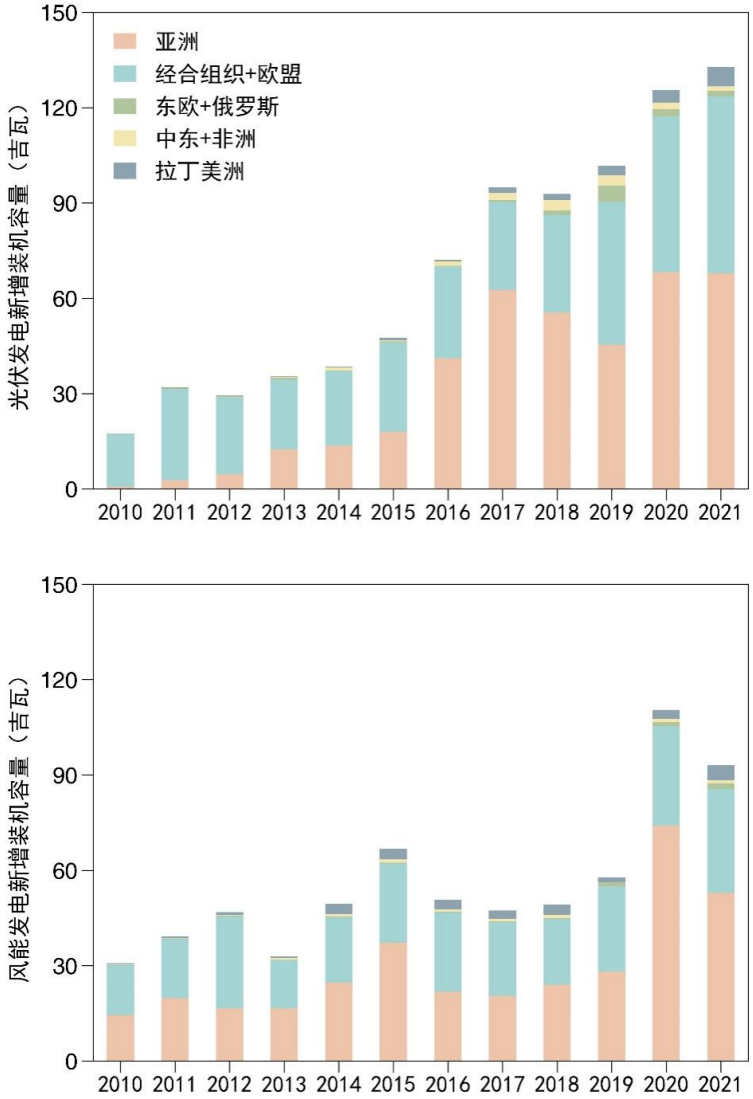

图 4-9 2010-2021 年全球光伏和风电新增装机容量

后疫情时代下，中国新增光伏/风电装机容量仍居世界首位。2020 年，中国新增光伏装机容量 48.8 吉瓦，新增风电装机容量 72.5 吉瓦，是对全球新增光伏/风电装机容量最大的国家，其次是美国（占全球新增光伏装机容量的 15%和新增风电装机容量的 13%）。2021 年，中国新增光伏和风电装机容量仍处于领先地位，建设了 53 吉瓦的光伏（表 4-1）和 46.9 吉瓦的风电（表 4-2），贡献了全

球新增光伏装机容量的 40.0%和新增风电装机容量的 50.3%。发展中国家可再生能源开发的潜力较大，除中国之外，印度和巴西也均位于全球新增光伏/风电装机容量前十的行列。但目前全球新增光伏/风电装机容量前十的国家中，仍以经合组织与欧盟地区的国家为主，例如美国、德国、日本、韩国、法国、瑞典等。

表 4-1 2021 年新增光伏装机容量前十的国家

国家	装机容量（吉瓦）	国家	装机容量（吉瓦）
1. 中国	53.0	6. 日本	4.4
2. 美国	19.9	7. 韩国	3.6
3. 印度	10.3	8. 西班牙	3.4
4. 巴西	5.2	9. 荷兰	3.3
5. 德国	4.7	10. 法国	2.7

表 4-2 2021 年新增风电装机容量前十的国家

国家	装机容量（吉瓦）	国家	装机容量（吉瓦）
1. 中国	46.9	6. 土耳其	1.8
2. 美国	14.0	7. 德国	1.6
3. 巴西	4.0	8. 印度	1.5
4. 英国	2.6	9. 法国	1.2
5. 瑞典	2.1	10. 墨西哥	1.2

4.1.2 钢铁行业

近年来全球钢铁行业迅速扩张，发展中国家基础设施建设拉动钢铁需求是其主要驱动力。全球粗钢产量在 1990-2021 年经历了快速的增长，从 7.7 亿吨增长到 19 亿吨，其中亚洲粗钢产量占比从 15%增长到 63%，经合组织和欧盟地区的粗钢产量占比从 60%下降到 26%，东欧和俄罗斯地区的粗钢产量则从 19%下降到 5%左右，近三年在疫情期间粗钢产量增势放缓，疫情后恢复增长态势（图 4-10）。

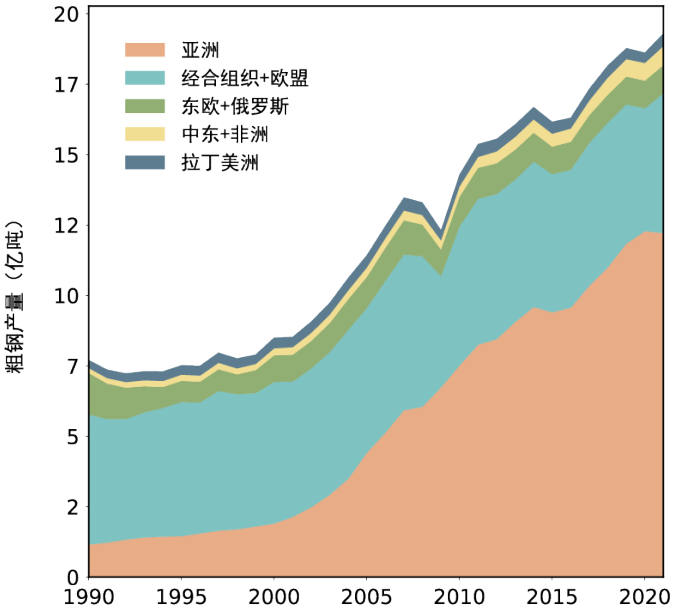

图 4-10 1990-2021 年全球粗钢产量地区分布

全球粗钢产能也快速增长，在 2021 年已经超过了 24 亿吨，其中以发展中国为主的亚洲、中东与非洲地区粗钢产能超过了全球总产能的 60%（图 4-11）。以转炉为核心设备的长流程炼钢工序是全球钢铁生产的主要工序，其产能占比是短流程炼钢工序的两倍以上。尽管以废钢作为主要原料的短流程炼钢过程更具有绿色效益，但受技术成本高昂和废钢资源短缺等因素的限制，亚洲和中东与非洲地区钢铁行业新增产能在近年来仍然高度依赖于长流程炼钢过程，且难以在短时间内向发展短流程炼钢过程快速转型。投运时间小于 20 年的钢铁企业是全球钢铁生产的主力军，贡献了近 57%的粗钢产能（图 4-12），但粗钢产能的投运时间分布存在明显的区域差异性。由于发展中国家钢铁行业起步普遍较晚，亚洲地区有超过 80%的粗钢产能来自于服役时间不满 20 年的设施。而钢铁行业起步较早的

经合组织+欧盟和东欧+俄罗斯地区的产能平均投运时间均超过 35 年，其中投运时间大于 30 年的企业贡献了近 70%的粗钢产能。

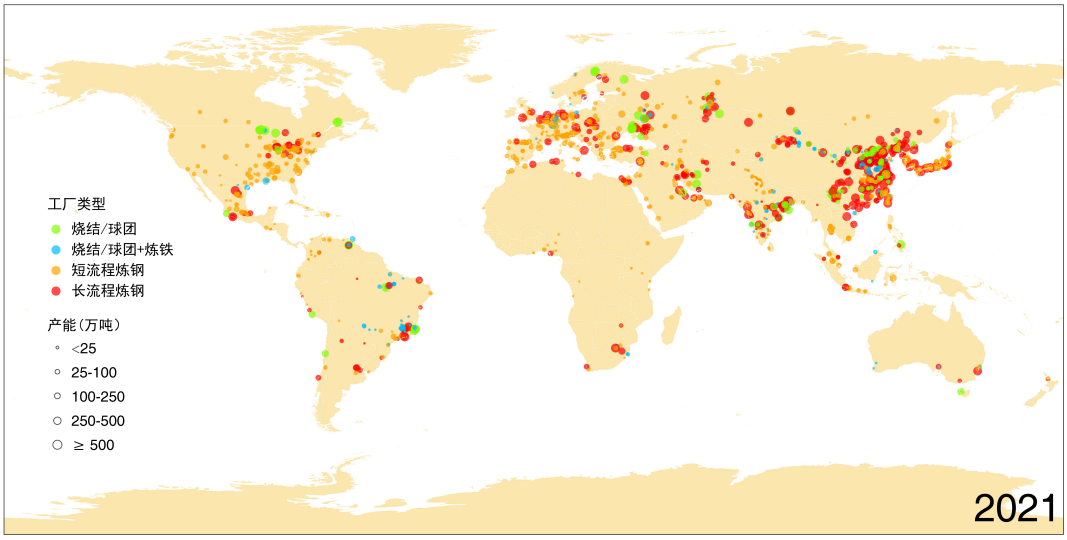

图 4-11 2021 年全球钢铁企业空间分布

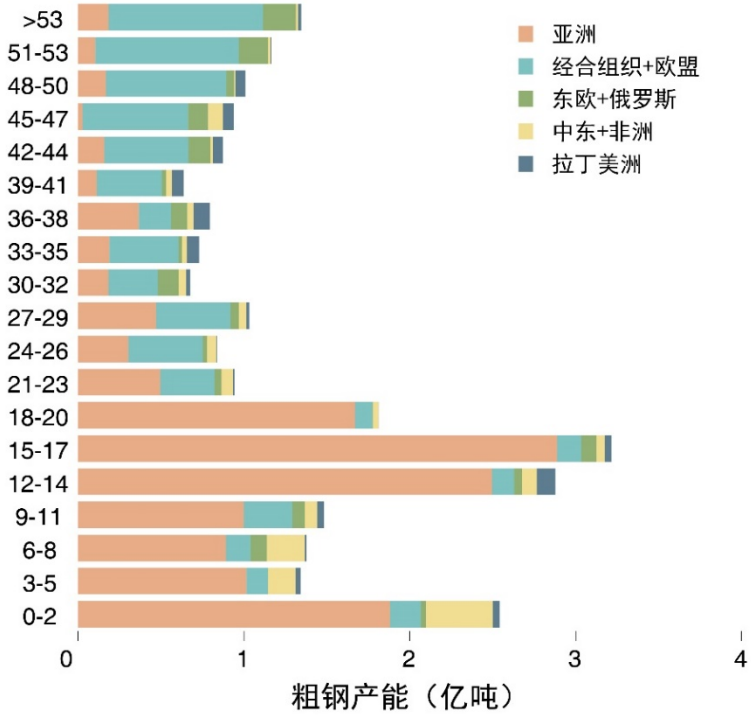

图 4-12 2021 年全球不同服役年限粗钢产能分布

全球钢铁行业基础设施的新建受新冠疫情冲击较为有限，2019 年后新建产能仍在持续上升。尽管 2018 年全球钢铁行业基础设施的新建产能明显减缓，较 2017 年减少了 14%，但全球钢铁行业在随后几年内加速扩张，新建粗钢产量仍

然保持着坚挺的上升趋势（图 4-13）。在 2019-2021 年间，全球钢铁行业新建粗钢产能共计 2.3 亿吨，年均增长率接近 20%，与近五年来（2016-2021 年）新建产能的年均增幅基本持平。在此期间，全球钢铁行业基础设施的新建步伐受到新冠疫情的影响甚微，2019-2020 年间钢铁行业新建粗钢总产能高达 1.4 亿吨，是 2015-2018 年间年均新建产能的 1.8 倍。在后疫情时代经济复苏的背景下，2020-2021 年间钢铁行业新建粗钢产能共计 1.7 亿吨，较 2019-2020 年间增长了 20%。在 2019-2021 年期间，以新型经济体和发展中国家为主的亚洲和中东与非洲地区是当前钢铁行业基础设施扩建的主要驱动力，分别贡献了全球新建粗钢产能的 71%和 17%。以中东与非洲地区为例，“一带一路”的重要支点国家伊朗、埃及两国加大对基础设施的投入，主导了该地区钢铁行业基础设施的新建产能，建设了大批以电炉技术为主的短流程节能炼钢项目。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新建钢铁行业基础设施较少，仅占据了全球粗钢产能新建量的 8%。

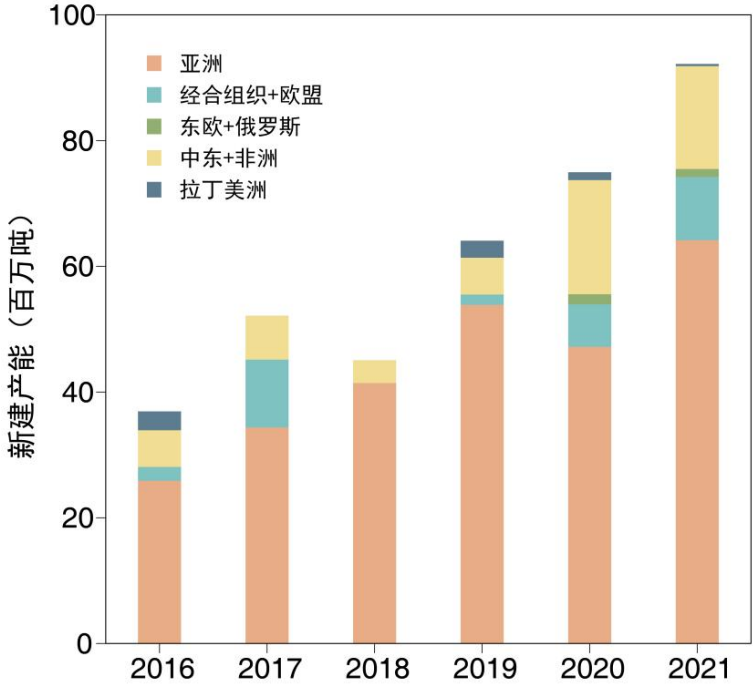

图 4-13 2016-2021 年全球各区域钢铁行业新建粗钢产能变化

从各重点区域能源基础设施的退役情况来看，全球钢铁行业在 2019-2021 年期间共淘汰 1.6 亿吨粗钢产能（图 4-14）。亚洲占据了钢铁行业基础设施淘汰的绝对主导地位，亚洲钢铁淘汰产能超过了全球钢铁淘汰产能的 95%，其中中国占

比超过 95%，主要原因在于近年来中国在供给侧结构性改革和落后、过剩产能淘汰等工作中取得了显著成效。工信部发布实施并于 2021 重新修订的《钢铁行业产能置换实施办法》，有效遏制了中国钢铁行业的无序扩张，并在推动技术升级、存量优化和节能减排等方面起到积极的作用。相比于亚洲地区而言，其他地区（如经合组织+欧盟、中东+非洲和拉丁美洲）在 2019-2021 年间钢铁行业基础设施淘汰力度较小，以上三个地区共计淘汰了 240 万吨粗钢产能。

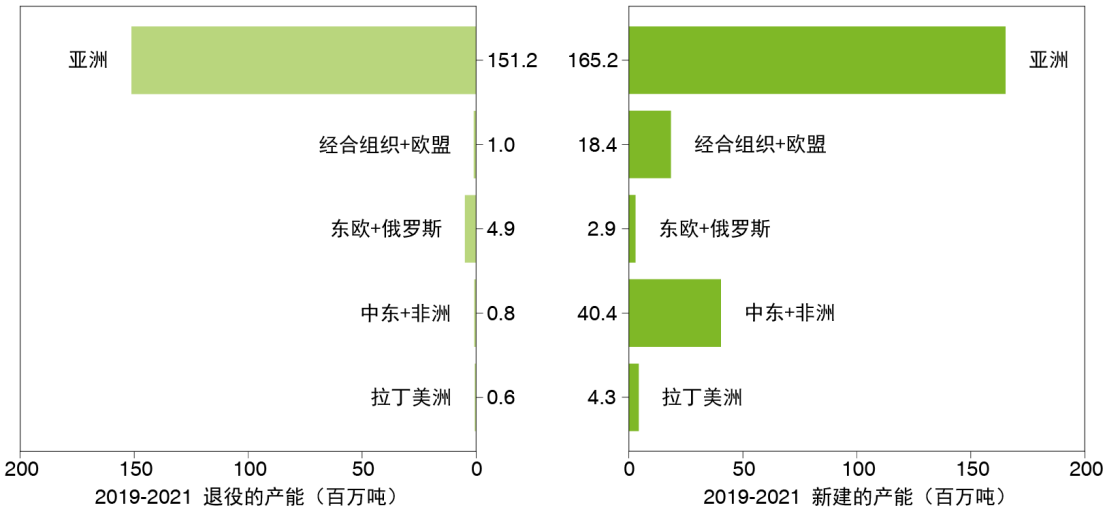

图 4-14 全球钢铁行业基础设施退役产能和新建产能

4.1.3 水泥行业

近年来全球水泥行业迅速扩张，发展中国家基础设施建设拉动水泥需求是其主要驱动力。全球水泥产量在 1990-2021 年经历了快速上升阶段并在近几年出现平稳发展的态势（图 4-15）。亚洲水泥产量增长迅速，从 1990 年的占比 32%增长到 2021 年的 73%，经合组织和欧盟地区从 1990 年的占比 45%下降到 2021 年的占比 13%。受到 2020 年疫情因素的影响，近年来各地区的水泥产量也进入了平稳发展阶段。

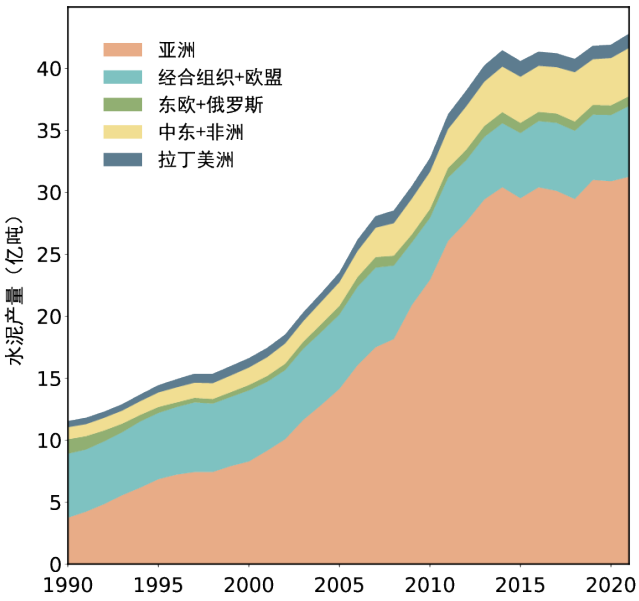

图 4-15 1990-2021 年全球水泥产量地区分布

全球水泥产能在 2021 年达到 37.8 亿吨，其中以发展中国家为主的亚洲、中东与非洲地区水泥产能超过了全球总产能的 80%（图 4-16）。以新型干法窑（带悬浮预热和与分解）的窑炉类型是全球水泥生产的主要方式。2021 年，服役少于 20 年的水泥行业基础设施产能为 25.3 亿吨，占全球水泥基础设施总产能的 67%（图 4-17）。水泥基础设施建设存在显著的地区差异，年轻化的分布格局主要由亚洲地区主导，服役少于 20 年的水泥行业基础设施产能中有 84%都来自亚洲，表明以发展中国家为代表的经济快速发展时期对能源基础设施的刚性需求。而服役大于 50 年的水泥行业基础设施产能为 3.7 亿吨，其中经合组织和欧盟贡献了 51%的产能，这些地区工业化和城镇化发展进程较早，水泥基础设施已从快速建设阶段步入平稳发展阶段。

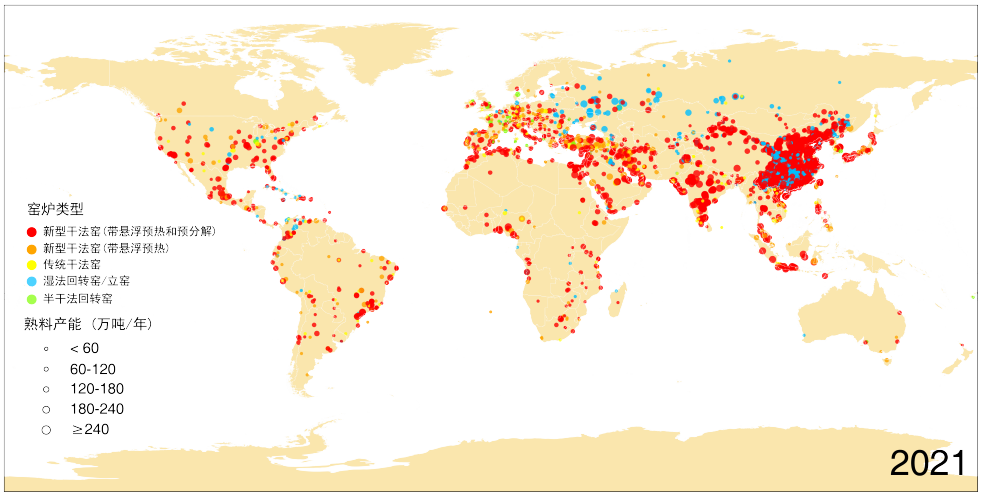

图 4-16 2021 年全球水泥企业空间分布

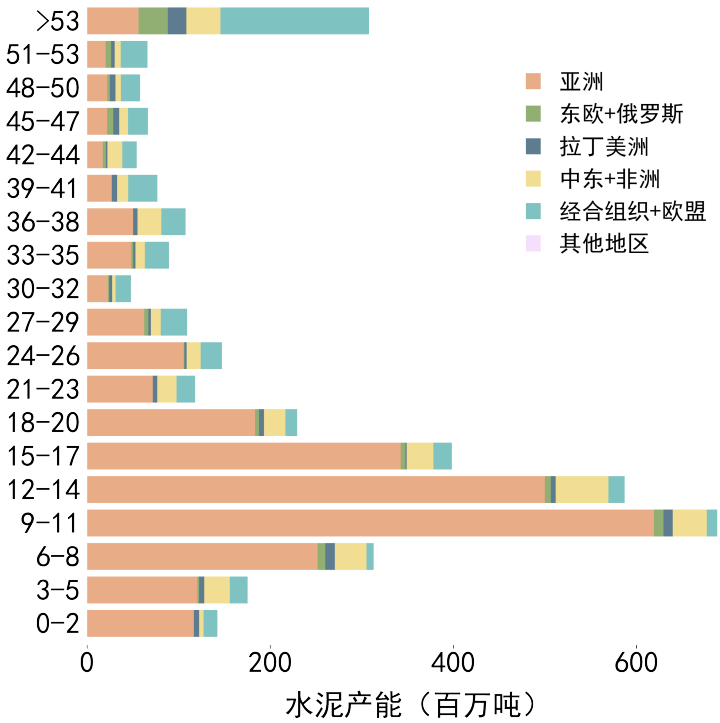

图 4-17 2021 年全球不同服役年限水泥产能分布

近年来全球水泥行业熟料新建产能先呈现下降趋势后小幅回升（图 4-18）。其中下降阶段出现在疫情前，即 2020 年及之前，从 2016 年的 0.67 亿吨以 10% 的年均降速持续下降至 2020 年，降至 0.4 亿吨，达到近几年的最低值。但随着后疫情时代经济复苏，水泥行业基础设施的扩建带来水泥新建产能的增长，2020-2021 年全球熟料新建产能小幅度上升，到 2021 年增长至 0.5 亿吨，相较 2020 年增长了 13.4%，和疫情前的熟料新建产能（2019 年）相比增长了 1.8%，可以说

全球水泥行业熟料的新建产能在后疫情经济复苏之后基本维持在了疫情前的水平。

全球水泥行业发展区域差异性显著。亚洲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，非洲和中东地区等地熟料产能也显著增加，但新增生产线规模普遍较小，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。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 2019-2020 和 2020-2021 年的新增产能均维持在 0.8 亿吨左右，占全球总新增产能的超过 86%，主导了全球水泥行业扩张进程。而同期经合组织和欧盟地区熟料产能增长同样迅速，在 2020-2021 年的熟料新增产能达到 0.1 亿吨，相较 2019-2020 年的 0.04 亿吨增长了将近 2 倍，拉丁美洲的熟料产能增长态势则有一定程度的缓解，从 2019-2020 年的新增产能 0.06 亿吨下降到了 2020-2021 年的新增产能 0.01 亿吨。

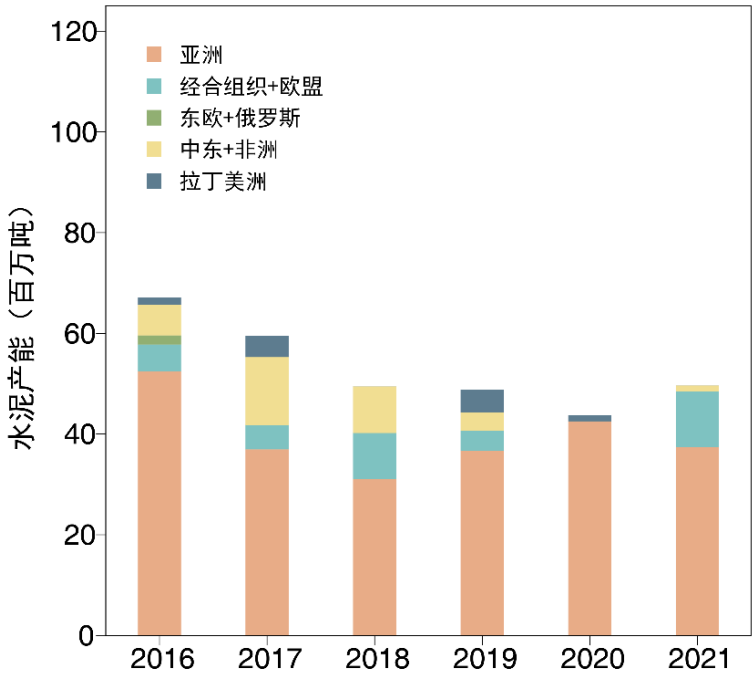

图 4-18 2016-2021 年全球各区域水泥行业新建产能变化

越南是亚洲地区水泥行业快速扩张的代表性国家，其近五年水泥行业扩张尤为迅速，累计熟料新增产能达到 0.18 亿吨，超过印度成为近五年的全球第二大水泥生产国，仅次于中国。中东和非洲地区的熟料产能增长主要是由阿尔及利亚

带动，该国的产能近五年的增长量占到了总增长量的 35%。土耳其是经合组织和欧盟地区熟料产能增长的最重要的国家，其近五年的累计熟料新增产能达到 893 万吨，占该区域总熟料产能增长量的 30.7%。

水泥行业基础设施的新建和退役在不同地区有着显著差异（图 4-19）。2019-2021 年亚洲地区能源需求快速增长，主导了水泥基础设施的建设，同时得益于产业结构的升级，亚洲也是淘汰低效基础设施的重点地区。其近三年累计淘汰熟料产能达到 0.79 亿吨，占全球水泥行业淘汰熟料总产能的 84%，其次是经合组织、欧盟地区以及中东、非洲等地区，分别淘汰数量产能 730 万吨和 660 万吨。

中国是全球水泥行业熟料产能淘汰第一大国，2019-2021 年累计淘汰 0.75 亿吨熟料产能，占全球熟料淘汰总产能的 80%，这得益于中国近年来在基础工业落后与过剩产能淘汰方面取得的显著成效。其次是美国，其主导了 86%的经合组织和欧盟地区的熟料产能淘汰，近三年累计淘汰熟料产能 629 万吨。而阿尔及利亚、叙利亚和约旦则是中东和非洲地区熟料淘汰产能的主导国家，三者 2019-2021 年累计淘汰熟料产能占到了该地区的接近 70%。

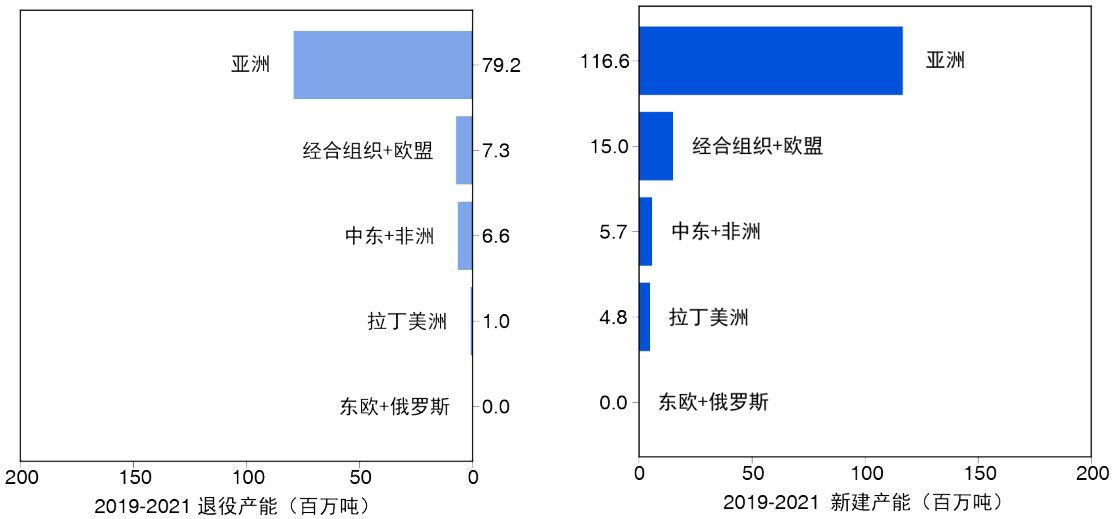

图 4-19 2019-2021 年全球水泥行业能源基础设施新建产能和退役产能

4.1.4 道路交通行业

本节的道路能源基础设施指以化石能源为燃料的机动车。2020 年疫情冲击下全球机动车新车注册量呈现大幅下降，尽管 2021 年显著回升，但仍不及 2019 年水平（图 4-20）。2019 年前，全球机动车注册量以年均 1%的增速稳步增长，增长至 2019 年的 1.21 亿辆。2020 年，由于受到居家办公、限制流动等新冠疫情防控措施的影响，人们的日常出行方式和行为习惯发生了巨大的变化，全球机动车注册量大幅缩减，在 2019 年的基础上削减了 11%，降低至 1.07 亿辆。新冠疫情给全球发展带来巨大挑战，交通行业在经受疫情考验的同时，也在协同保障防疫物资运输和全球产业链供应链稳定方面发挥了关键作用。2021 年随着后疫情时期全社会经济复苏，道路交通行业重新全球机动车注册量迅速反弹上升，在 2020 年的基础上增长了接近 7%，达到 1.15 亿辆左右，但仍然比疫情前即 2019 年减少了 5%，这意味着新冠疫情对道路交通行业的影响较大，其对全球机动车注册量的重大冲击仍然需要一定的时间来缓解。

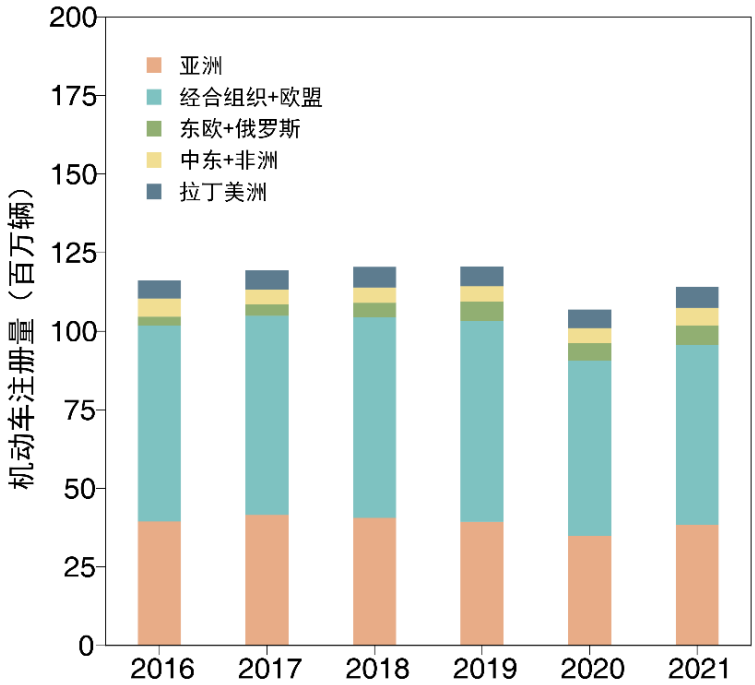

图 4-20 2016-2021 年全球各区域全球机动车注册量变化趋势

从区域分布看，全球机动车注册量的增长主要来自于经合组织与欧盟和亚洲两个区域（图 4-21）。2021 年两个区域的机动车注册量分别为 0.57 亿辆和 0.38

亿辆，合计贡献了全球 80%以上的机动车注册量。拉丁美洲的机动车注册量占比为 6%，东欧与俄罗斯、中东与非洲地区的机动车注册量占比则均约 5%。2020 年的机动车注册量的全球区域分布与 2021 年一致，但受到疫情的冲击，各区域的机动车注册量都有不同程度的下降。

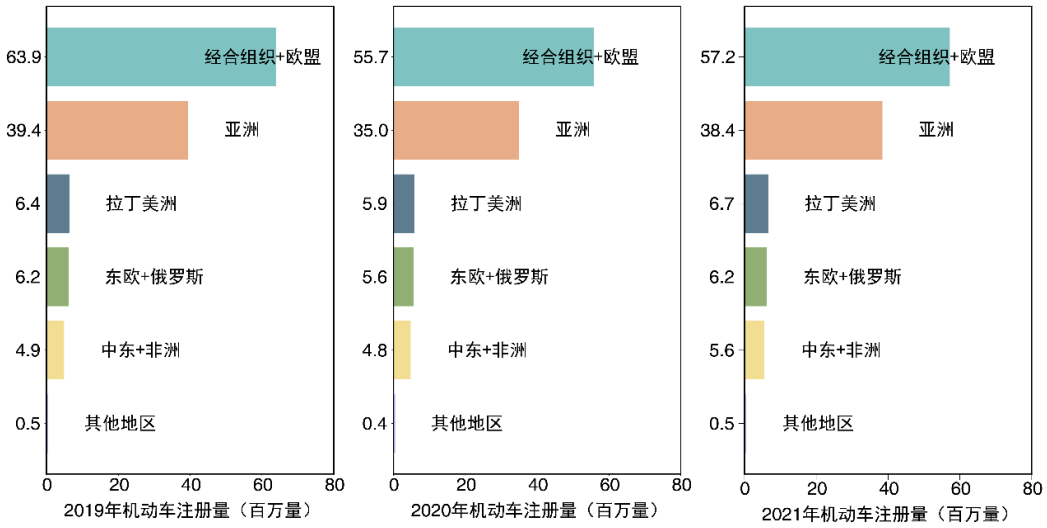

图 4-21 2019-2021 年全球各区域机动车注册量

2021 年全球机动车呈现相对年轻化分布的特征（图 4-22）。服役年限在 2-5 年的机动车最多（不考虑服役年限大于 14 的机动车），经合组织和欧盟以及亚洲是全球机动车年轻化分布的主要主导地区，这些地区的机动车保有量占全球总机动车保有量的超过 80%，得益于这些地区的国家快速增长的经济和道路交通基础设施的建设，较早推广机动车出行的方式。

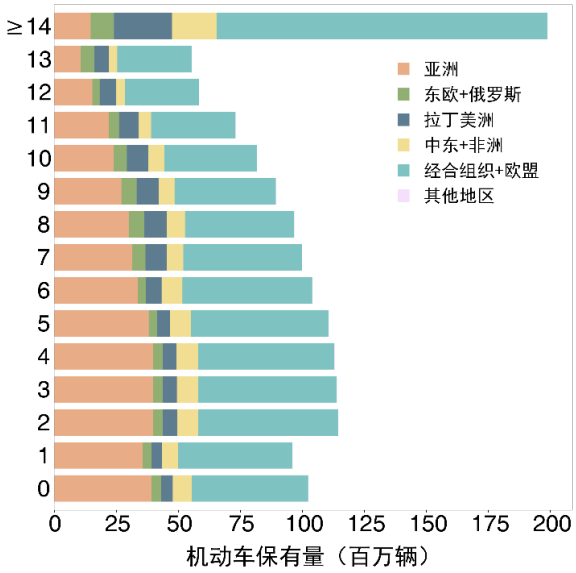

图 4-22 2021 年全球不同服役年限机动车保有量分布

4.1.5 炼油行业

2000-2018 年炼油行业产能整体呈现稳定上升趋势（图 4-23）。2000 年全球有 755 家炼油厂在运营，总产能约为 43.5 亿吨/年；2018 年，正在运营的炼油厂数量增加到 946 家，总产能也增加至约为 49 亿吨/年。2000 年以来，由于炼油厂利用率波动，全球炼油行业发展出现两个转折点。第一个拐点发生在 2003 年前后，中国和印度炼油行业利用率显著增长，驱动全球炼油行业利用率整体上升。以中国为例，在石油需求激增的推动下，中国炼油厂产量在 2003 年和 2004 年分别增长 11%和 12%，炼油厂利用率大幅提高。第二个拐点出现在 2008 年前后，由于全球金融危机爆发，成品油需求下降，全球炼油厂利用率大幅下降，2008-2009 年炼油产能和各地区在运炼油厂数量下降。此外，自 2009 年以来全球炼油行业空间分布格局发生显著变化。亚太地区特别是中国和印度炼油能力快速增长，其主要归因于国内成品油需求增长和现代大型炼油厂建设。与之相反，由于欧盟环境和能源政策影响和国内精炼石油产品需求下滑，欧洲在 2009 年后陷入“炼油危机”。整体来看，自 2009 年以来全球炼油行业的发展重心加速向新兴经济体转移。

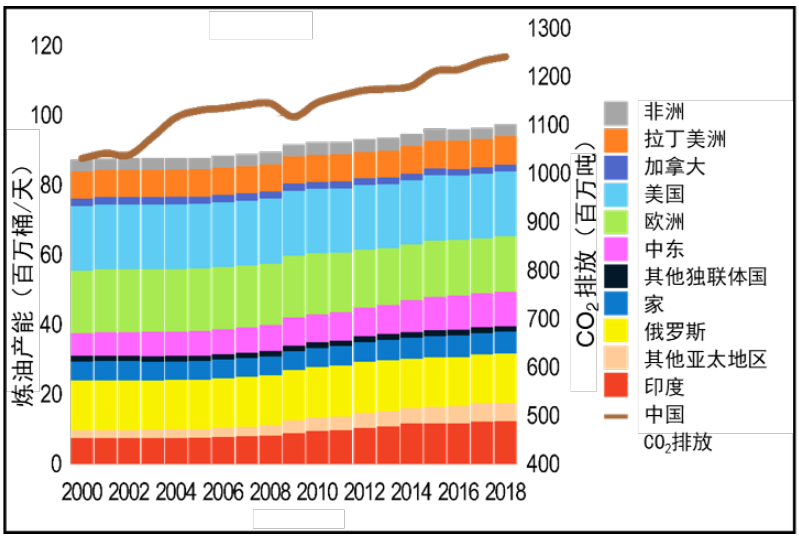

图 4-23 2000-2018 年全球炼油行业分地区产能变化

2018 年全球有约 1000 个炼油厂正在运营，此外还有约 150 个拟建炼油厂（21 个已批准，9 个正在投标过程，70 个在计划中，52 个在建），约 75 个炼油厂建设被搁置（49 个被取消，26 个被冻结）。2000-2018 年间有 266 个炼油厂停运或退役（257 个停用，9 个废弃）。上述在运、拟建、搁置和停运炼油厂的总产能分别为 49.3 亿吨/年，12.8 亿吨/年，6.6 亿吨/年和 7.4 亿吨/年（图 4-24）。

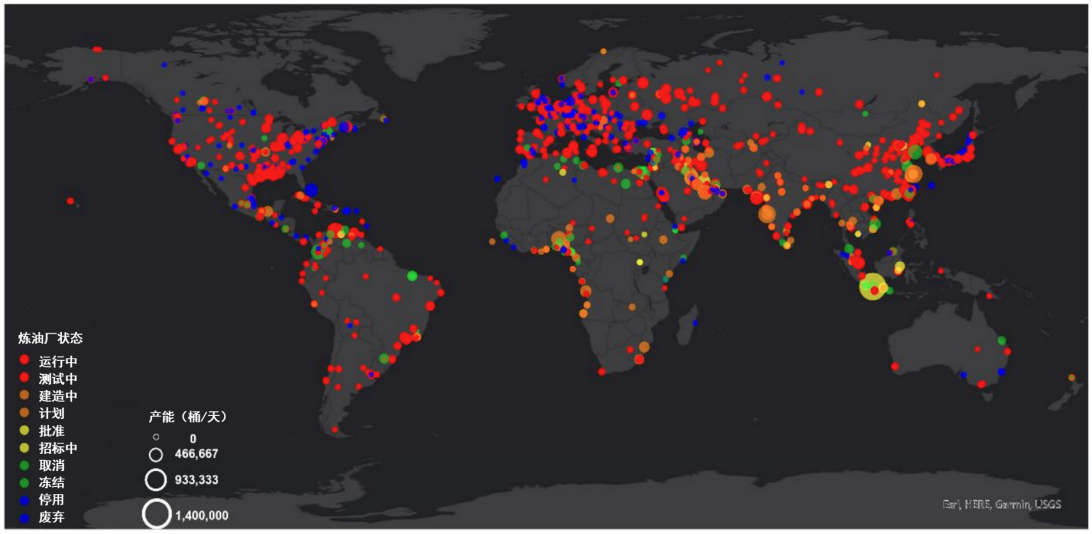

图 4-24 全球炼油行业空间分布（地理分布、运行状态、产能）

2018 年全球炼油行业设施服役年限的区域差异性显著。中国、印度和中东地区的炼油厂普遍建设较晚（服役年限小于 40 年），而欧洲、美国和日本等发达地区的炼油厂大多已投运超过 40 年。两者产能分别占 2018 年总产能的 22% 和 35%。此外，各地区不同配置构型的年龄结构存在差异性。在炼油行业起步较早的发达国家，炼油厂深加工构型特征更为明显，且主要为服役年限 40 年以上的炼油厂。在炼油业起步较晚的中国、印度和中东地区，深加工炼油厂数量占比相对较小（图 4-25）。

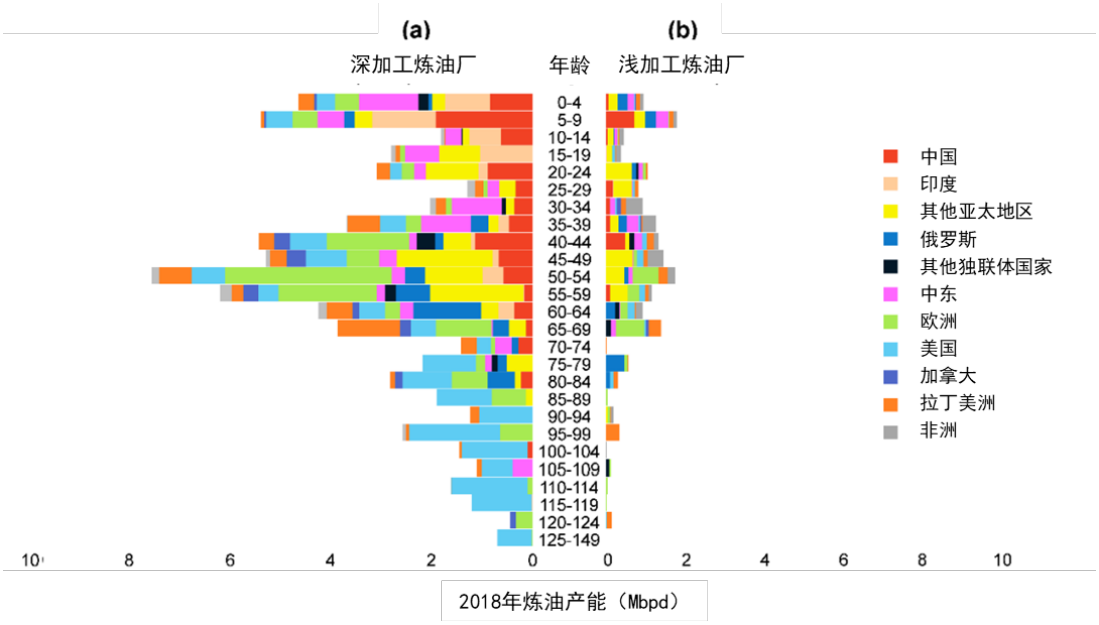

图 4-25 全球炼油行业深加工和浅加工炼油厂产能分地区年龄分布

4.2 全球能源基础设施碳排放变化

4.2.1 电力行业

4.2.1.1 1990-2021 年全球火电行业碳排放

随着社会经济的快速发展和电力需求的日益增长，全球火电行业碳排放在 1990-2021 年期间总体呈现增长趋势（图 4-26）。全球火电行业碳排放从 1990 年的 70.4 亿吨增长到 2021 年的 139.3 亿吨。与火电机组装机容量增长的比例相比（144.9%），全球火电行业碳排放仅增加了 97.9%，这种不成比例的增长是由于碳排放强度较低的火电机组（如燃气发电）的快速扩张。随着早期电力需求的快速增长，全球火电行业碳排放在 1990-2010 年间不断攀升，以年均 2.8%的速度上升。近十年来全球火电行业碳排放进入缓慢增长期，年均增长速率下降至 1.7%。这是由于发达国家电力行业碳排放总体呈现下降趋势，减缓了全球碳排放增长速率。例如，2010-2021 年期间，以发展中国家为主的亚洲、中东和非洲以及拉美地区火电行业碳排放均表现为上升趋势，其中亚洲火电行业碳排放年均增长速度最快（4.1%），而以发达国家为主的经合组织与欧盟地区火电行业碳排放以年均 1.9%的速度下降（从 54.4 亿吨下降至 43.6 亿吨），一定程度上抵消了发展中国家带来的碳排放增长。

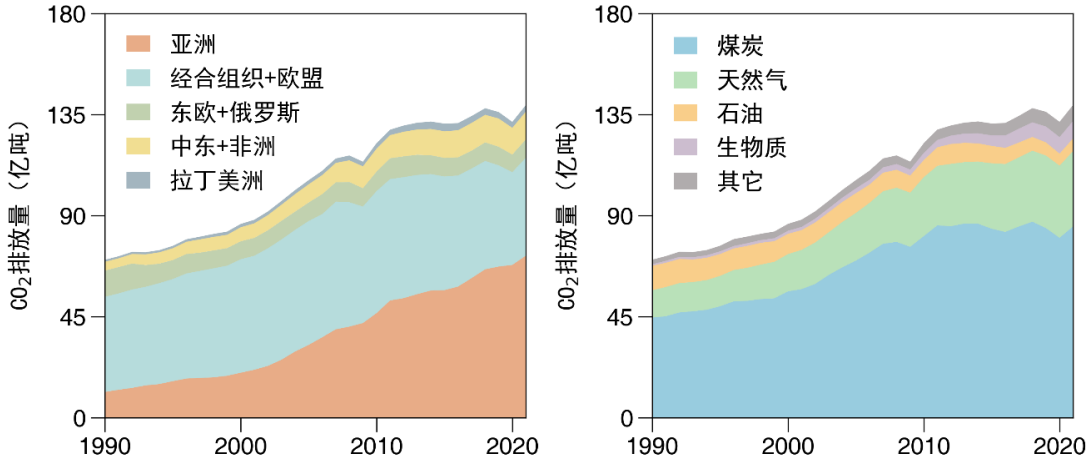

图 4-26 1990-2021 年全球火电分重点地区和分燃料类型 CO_2 排放量

1990-2021 年全球火电行业碳排放的主要贡献区域发生了显著的变化。经合组织与欧盟地区火电行业碳排放已达到峰值，并表现为下降的趋势，而新兴经济

体火电行业碳排放稳步提升。不同经济体火电行业的碳排放发展路径导致了全球火电行业碳排放的主要贡献区域从经合组织与欧盟地区向亚洲转移。例如，以发达国家为主的经合组织与欧盟地区主导了 1990 年全球火电行业碳排放（贡献了总量的 60.2%），而以发展中国家为主的亚洲对 2021 年全球火电行业碳排放贡献最大（51.8%）。2019-2021 年，随着发达国家火电行业碳排放的下降和发展中国家火电行业碳排放的上升，经合组织与欧盟地区占全球火电行业碳排放的比例继续下降（从 33.1%下降至 31.3%），亚洲占全球碳排放的比例进一步上升（从 49.4%上升 51.8%）。

燃煤电厂依然是全球火电行业碳排放的主力。1990 年，全球燃煤电厂产生了 44.5 亿吨碳排放，贡献了全球火电行业碳排放的 63.3%，其次是燃气电厂（17.3%）和燃油电厂（15.5%）。随着燃气电厂的快速发展，燃气电厂碳排放从 1990 年的 12.2 亿吨增长至 2021 年的 33.6 亿吨，增长了 1.8 倍。尽管燃气电厂发展速度较快，但燃煤电厂装机容量和碳排放强度均高于燃气电厂，燃煤电厂仍主导了全球火电行业碳排放变化趋势，对全球碳排放总增量的贡献最大（59.0%）。2021 年，燃煤电厂贡献了全球火电行业碳排放的 61.2%，其次是燃气电厂（24.1%）。

4.2.1.2 2019-2021 年全球火电行业碳排放变化

2019-2021 年全球火电行业碳排放先下降后上升，总体呈增长趋势。随着发达国家火电行业碳排放持续下降和发展中国家火电行业碳排放增速放缓，2019 年全球火电行业碳排放下降了 1.2%。在疫情影响下，2020 年全球火电行业碳排放继续下降（图 4-27），从 2019 年的 136.2 亿吨下降至 131.7 亿吨，下降速度（3.3%）明显高于去年同期水平。随着疫情逐步稳定和企业复工复产的顺利推进，全球电力需求逐渐恢复正常，2021 年全球火电行业碳排放较 2020 年上升了 5.7%，增长至 139.3 亿吨，仍高于 2019 年全球火电行业碳排放水平（较 2019 年增长了 2.3%）。

受区域间疫情发展形势和经济发展水平影响，各地区火电行业碳排放变化及对全球碳排放变化的贡献也有明显差异。2019-2020 年，虽然亚洲火电行业碳排放增速在疫情影响下进一步放缓，但仍较 2019 年上升了 1.1%，使 2019-2020 期

间全球碳排放下降速度变缓，而经合组织与欧盟地区、中东和非洲等其他 5 个地区火电行业碳排放均表现为下降趋势，其中，经合组织与欧盟地区火电行业碳排放降幅最大，下降了约 3.8 亿吨。在后疫情时代，与全球火电行业碳排放趋势一致，2021 年各地区火电行业碳排放均表现出上升趋势，其中，拉美地区火电行业碳排放上升最快（11.7%），其次是亚洲（6.2%）。从同期贡献量来看，亚洲和经合组织与欧盟地区主导了 2021 年全球火电行业碳排放的反弹，总共贡献了 6.5 亿吨碳排放（占全球火电行业碳排放增量的 85.6%）。

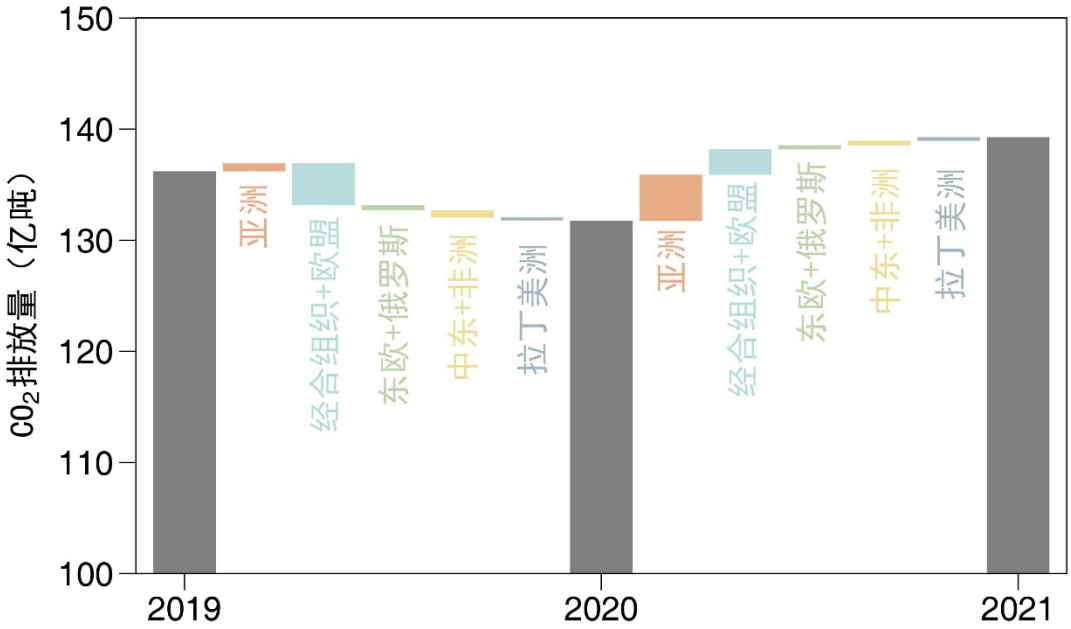

图 4-27 2019-2021 年全球火电行业 CO_2 排放变化分区域驱动因素

4.2.1.3 1990 和 2021 年全球火电机组碳排放年龄结构

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。服役年限较短的火电机组代表着在目标年份附近建设的火电机组，这些新建的火电机组一方面满足了电力需求的增长，另一方面也产生了碳排放（图 4-28）。随着火电机组的快速扩张，服役年限在 20 年以内的火电机组占全球碳排放的比例居高不下，占 1990 年全球碳排放的 67.6%和 2021 年全球碳排放的 61.3%。然而，服役年限较短的火电机组的区域特征发生了显著的变化，主要贡献地区从经合组织与欧盟地区向亚洲转移。例如，随着大部分发达国家对燃煤电厂投资和建设的不断减少及发展

中国家燃煤电厂的快速扩张，亚洲逐渐主导了服役年限较短的燃煤机组碳排放。2021 年，亚洲占全球服役年限在 20 年以内的火电机组碳排放的 66.7%，而经合组织与欧盟地区仅占 20.3%。此外，区域间不同燃料类型的火电碳排放分布特征能反映化石能源资源禀赋的差异。例如，与亚洲主导煤电碳排放不同，中东和非洲地区依托丰富的油气资源，大力发展燃油和燃气机组，贡献了全球燃油和燃气机组碳排放的 25.1%。

全球服役年限超过 40 年的燃煤机组碳排放呈上升趋势，从 1990 年的 0.4 亿吨上升至 2021 年的 11.5 亿吨。通常认为全球范围内燃煤机组的平均服役寿命为 40 年，超过平均服役寿命的机组可认为是老旧机组。1990 年，以发达国家为主的经合组织与欧盟地区主导了全球燃煤机组碳排放的分布，其中老旧煤电机组仅占全球碳排放的 0.9%。随着近年来发达国家电力需求趋于稳定，发达国家基本不再新建燃煤电厂，并且提出加快燃煤电厂淘汰的目标，尽管一些发达国家（如法国、英国、加拿大等）明确了燃煤电厂的退役路线图，但燃煤机组的淘汰速度不足以抵消在役燃煤机组服役年限随时间增长的影响，因此老旧燃煤机组增多，拉动了全球老旧燃煤机组碳排放的上升。经过近三十年的演变，受到不同经济体经济发展阶段、电力需求变化和气候环境政策的差异，目前这些老旧煤电机组主要分布在经合组织与欧盟地区，贡献了 2021 年全球老旧燃煤机组碳排放的 69.1%。这些老旧燃煤机组通常效率较低，碳排放强度较高，对电力行业低碳转型造成较大威胁。

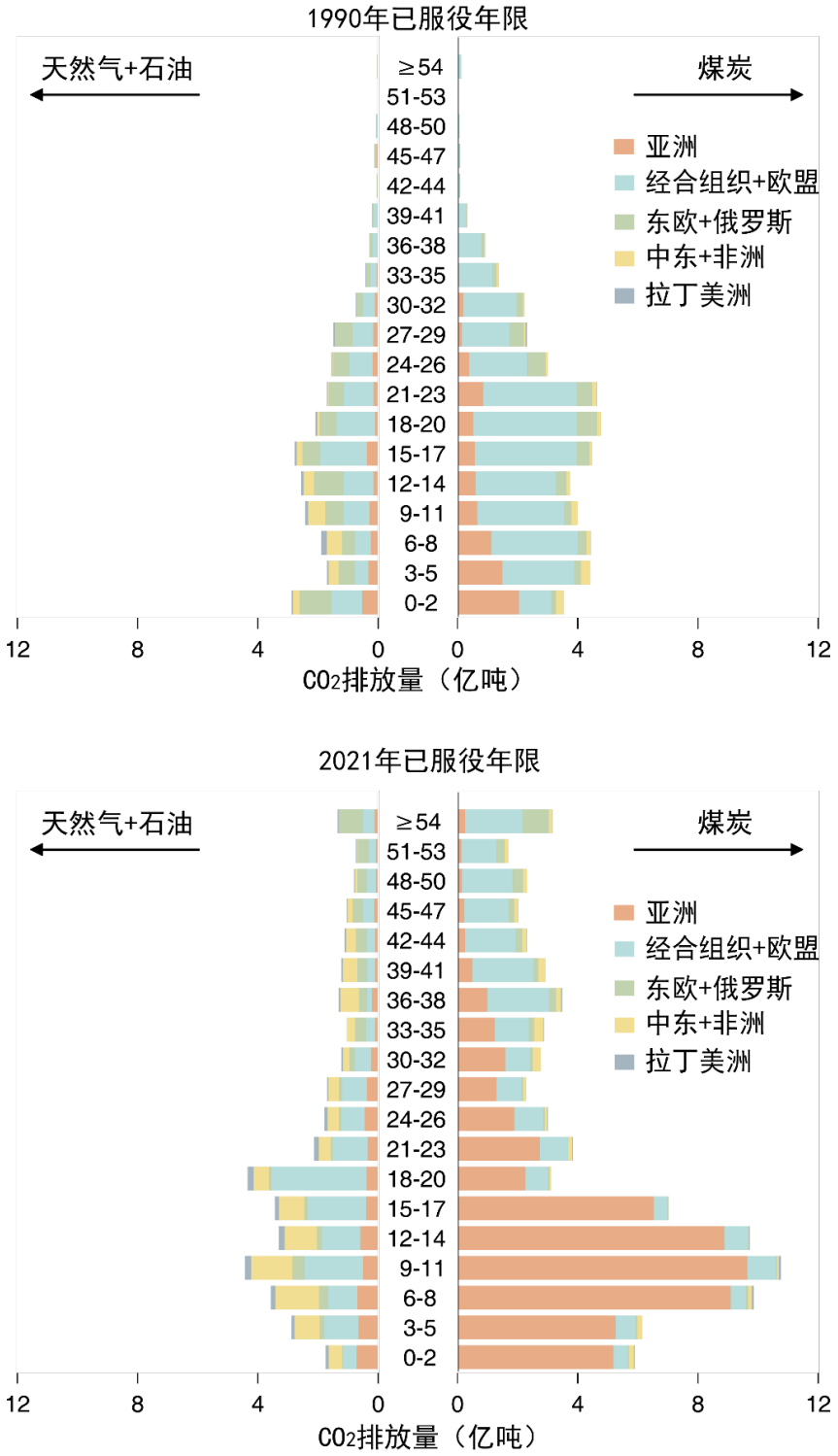

图 4-28 1990 年和 2021 年全球不同服役年限火电机组的 CO_2 排放分布

4.2.2 钢铁行业

4.3.2.1 1990-2021 年间全球钢铁行业能源基础设施碳排放

近三十年全球钢铁行业碳排放整体大幅增长，但不同区域的变化特征差异显著（图 4-29）。2021 年全球钢铁行业共排放 27.5 亿吨 CO_2，是 1990 年碳排放的 2.4 倍。随着发展中国家在基础设施建设方面的大力投入，亚洲地区钢铁行业碳排放量从 2000 年的 4.9 亿吨激增到 2021 年的 18.5 亿吨，目前已经占据了全球钢铁产业碳排放的 73.7%，是近些年间钢铁基础设施碳排放增长的主要驱动力。与亚洲钢铁行业不同，经合组织与欧盟钢铁行业碳排放在全球钢铁行业碳排放的占比持续下降。至 2021 年，经合组织与欧盟地区的钢铁行业碳排放总量是 1990 年碳排放水平的 70%，仅占当前全球钢铁行业碳排放总量的 13%。东欧与俄罗斯地区钢铁行业碳排放自 1990 年苏联解体以来急剧下降，在 1998 年后进入了波动上升的阶段，但 2021 年该地区钢铁行业碳排放仅为 1990 年碳排放水平的 68%。

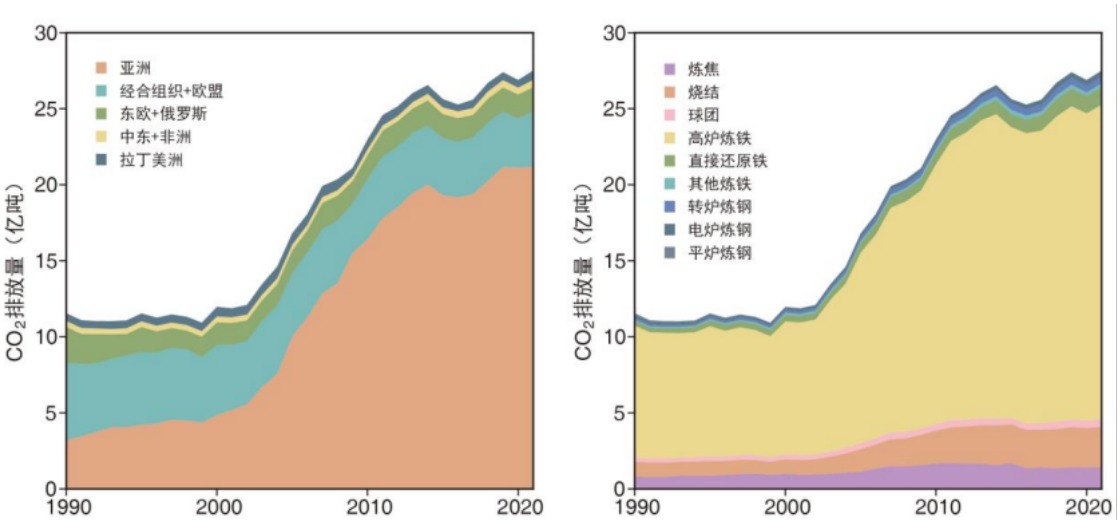

图 4-29 1990-2021 年全球钢铁行业分区域和分生产工序 CO_2 排放量

全球钢铁行业碳排放的增长主要来源于长流程炼钢过程。由于涉及到多个碳排放强度较高的铁矿石处理及冶炼工序，长流程过程中以炼焦、烧结、球团为代表的炼铁前工序和以高炉炼铁、直接还原铁为代表的炼铁工序在 2021 年间钢铁行业碳排放分别占据了全球钢铁行业碳排放的 17%和 75%。相对地，短流程炼钢过程碳排放仅占当前全球钢铁行业碳排放总量的 1%，该过程以电炉作为核心设

备、采用废钢为主要原料，省去了焦化、烧结、高炉等高能耗冶炼工序，能够实现节能减排和提供生产效率的目的。

4.3.2.2 2019-2021 年间全球钢铁行业能源基础设施碳排放

近年来钢铁行业碳排放增长速度明显放缓。全球钢铁行业碳排放在近三年间（2019-2021 年）以 0.2%的增长率缓慢上升，远低于 2009-2019 年期间 2.7%的年均碳排放增长率。受疫情影响，2020 年全球钢铁行业碳排放相比于 2019 年下降了 1.8%，在 2021 年回升了 2% （图 4-30）。各重点区域钢铁行业碳排放在 2019-2021 年间均呈现出先减后增的趋势。其中，以发达国家为主的经合组织和欧盟地区钢铁行业碳排放在 2019-2021 年间发生剧烈波动，年变化幅度超过 10%，但该地区 2021 年钢铁行业碳排放量尚未恢复到 2019 年的排放水平。而以发展中国家为主的亚洲、拉丁美洲地区钢铁行业碳排放量在 2021 年已经超过了 2019 年的碳排放量水平。

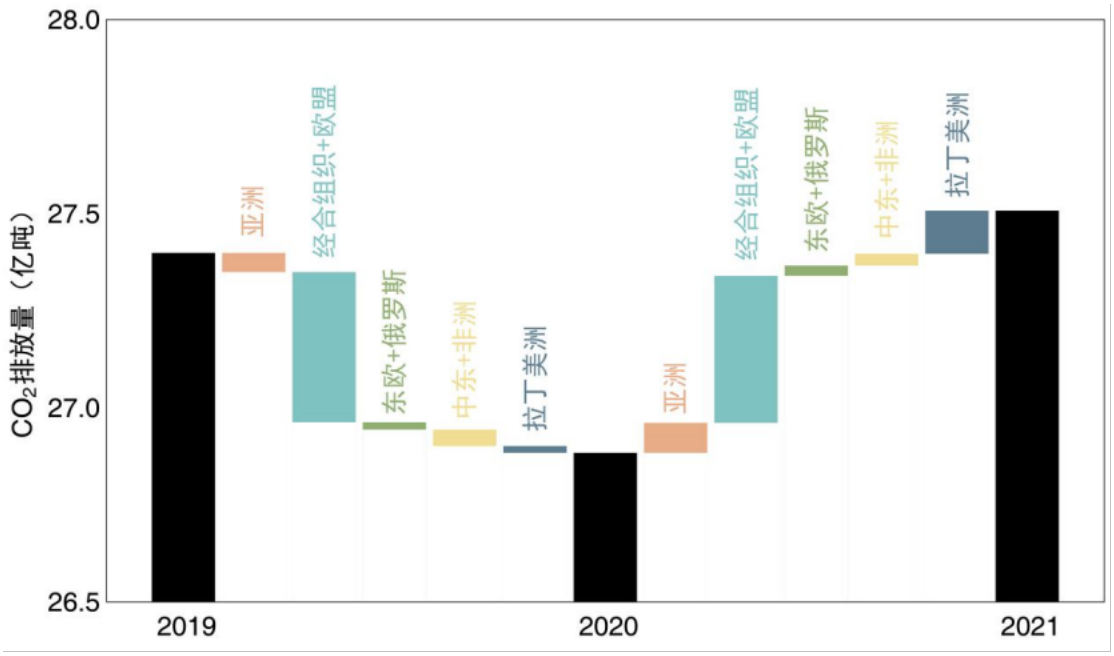

图 4-30 2019-2021 年全球钢铁行业 CO_2 排放变化分区域驱动因素

新冠疫情影响下，2019-2021 年间各国钢铁行业碳排放变化趋势迥异（图 4-31）。在亚洲地区，印度钢铁行业在 2021 年粗钢产量相比 2020 年产量上升了 17.8%，驱动 2021 年钢铁行业碳排放同比增长 20%，成为了亚洲地区钢铁行业碳排放在 2021 年增长的主要动力。越南、印度尼西亚钢铁行业碳排放则在 2019-

2021 年间年均增长率超过了 12%，以上两国钢铁行业在 2019-2020 年间增长率在 25%左右。得益于落后产能置换、节能减排和结构优化等工作的推进，2019-2020 年间中国钢铁行业碳排放仅增长了 0.1%。在产能置换和产量下降的双重驱动下，2021 年中国钢铁行业碳排放同比下降了 3 个百分点。拉丁美洲地区中，阿根廷、巴西两国钢铁行业碳排放在 2019-2021 年间增长速度较快，增幅接近 10%。作为经合组织和欧盟地区的代表国家，日本、美国、德国的钢铁行业碳排放从疫情到后疫情期间（2019-2021 年）波动较大。在疫情的影响下，以上三个国家钢铁行业碳排放在 2019-2020 年间降幅分别为 14%、12%、15%，随后在后疫情期间（2020-2021 年间）增幅为 9%、19%、22%。

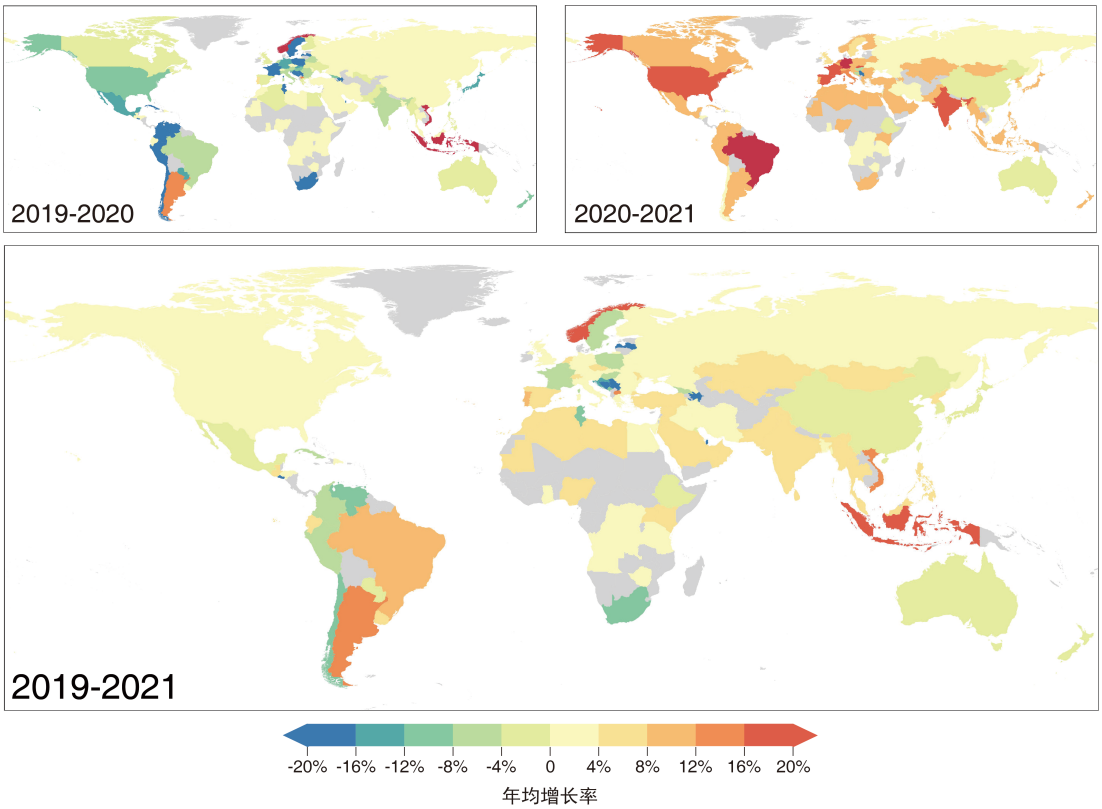

图 4-31 2019-2021 年全球钢铁行业 CO2 排放增速空间分布

4.2.3 水泥行业

4.2.3.1 1990-2021 年间全球水泥行业能源基础设施碳排放

近三十年全球水泥行业碳排放快速增长，但不同区域的变化特征差异显著（图 4-32）。在 1990 年至 2021 年全球水泥行业碳排放增加了 1.95 倍，2021 年排放达到 24.6 亿吨 CO_2。

由于基础设施建设进程不同，水泥行业碳排放变化存在显著区域差异性。发达国家的基础建设起步较早，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。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达到 46%。但随着全球水泥需求趋于饱和，近三十一年水泥生产规模较为稳定，2021 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 3.8 亿吨 CO_2。而亚洲地区是全球水泥行业碳排放增长的主要推动力，其水泥行业在过去三十年迅速发展，由于大量发展中国家和新兴经济体的发展需要新建大量的基础设施，对水泥需求激增拉动其产量增加，成为驱动亚洲地区水泥行业碳排放增长的主要因素。2021 年亚洲地区水泥行业碳排放比 1990 年增长约 5.2 倍，达到 17.4 亿吨，排放占全球水泥行业排放总量的 71%。同时，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，2005-2021 年水泥行业排放年均增速达 5%，2021 年碳排放量为 2.2 亿吨。

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 62%（5.2 亿吨），到 2021 年已上升至 66%（16.1 亿吨）。

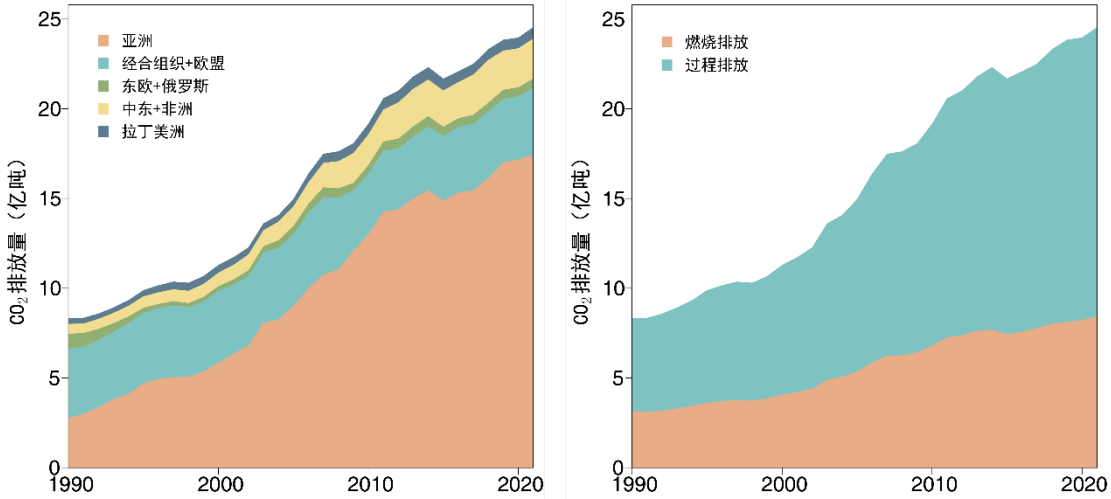

图 4-32 1990-2021 年全球水泥行业分区域和分来源 CO_2 排放量

4.2.3.2 2019-2021 年间全球水泥行业能源基础设施碳排放

近年来水泥行业碳排放依旧保持增长趋势（图 4-33）。全球水泥行业碳排放在 2019-2020 年增长了 0.5%，而 2020-2021 年则增长了 2.4%。从地区分布来看，2019-2020 年除了亚洲排放量增长，其他地区均出现小幅下降，而在 2020-2021 年，所有地区则均出现了增长趋势。其中亚洲增长最多，贡献了 43%的增长量，其次是经合组织和欧盟，贡献了 40%的增长量，其他地区增长贡献均在 10%以下。

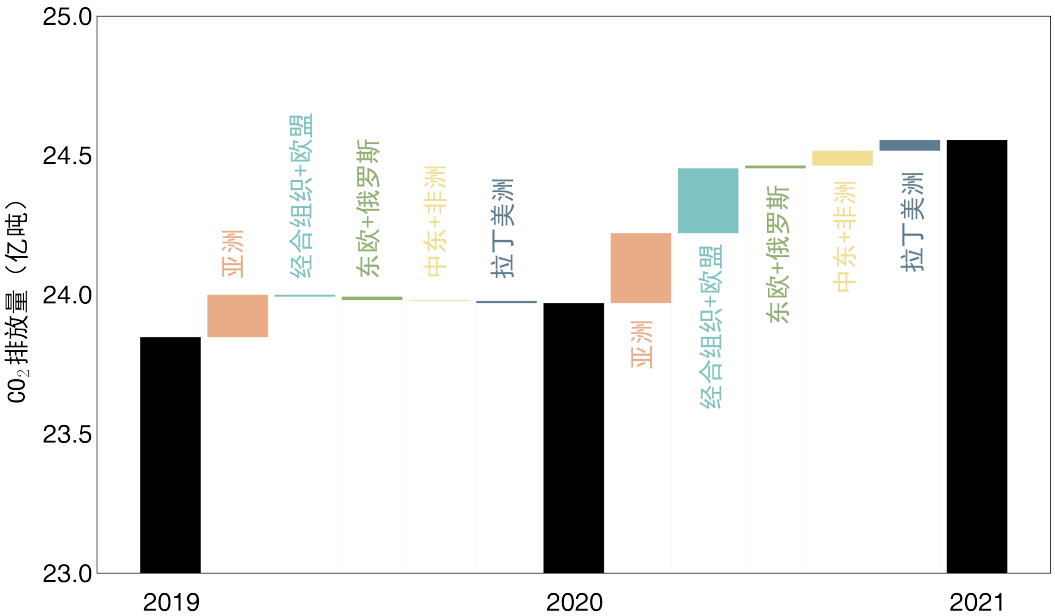

图 4-33 2019-2021 年全球水泥行业 CO_2 排放变化分区域驱动因素

4.2.3.3 1990-2021 年水泥行业能源基础设施碳排放国家增长变化情况

不同阶段各国的水泥行业能源基础设施碳排放的各不相同（图 4-34）。1990-2000 年年均排放增长率最大的是乌干达，达到了接近 30%，其次是亚洲的孟加拉国和越南，分别为 21%和 17.6%。2000-2010 年均排放增长率最大的是老挝和巴林，均达到了 29.5%，东欧的阿尔巴尼亚是年均增长率排名第四的国家，达到了 26.3%。2010-2021 年排名比较靠前的主要是撒哈拉以南非洲、东南亚和中亚的欠发达或发展中新兴国家，包括卢旺达（21%）、柬埔寨（23.9）、缅甸(28%)、塔吉克斯坦（36.7%）、纳米比亚（69.1%）等。从近三年来看，年均排放增长率最大的国家为非洲国家布隆迪，超过了 70%，其次是马里（26.4%）、肯尼亚（17.3%）、亚美尼亚（15.6%）和土耳其（15.0%），五个增长率最快的国家分有 60%都来自于中东和非洲地区。预计未来几十年这些地区的水泥需求将继续增长，这表明它们在未来有很大的潜力发挥更大的主导作用。

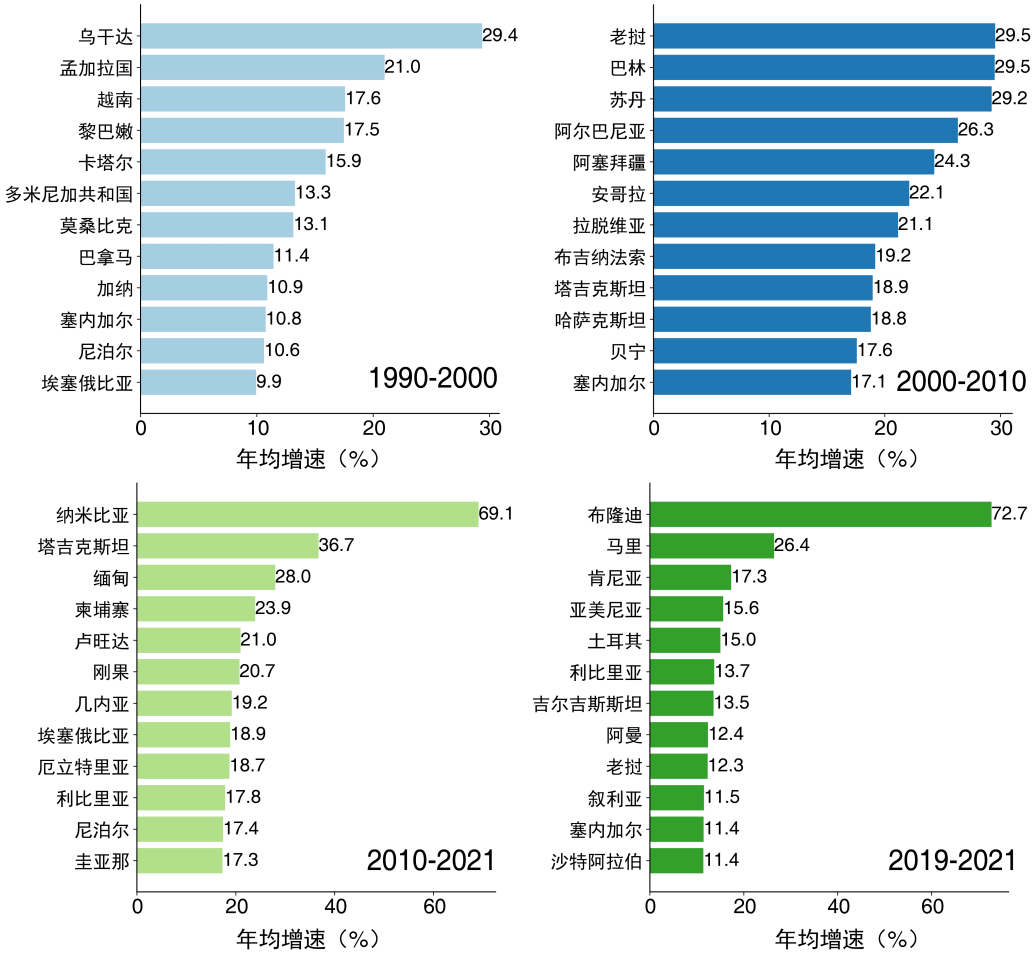

图 4-34 1990-2021 年不同时间段全球水泥行业 CO_2 排放年均增速前 12 国家

4.2.3.4 1990-2021 年水泥行业能源基础设施年龄分布情况

近三十年不同年龄生产线的 CO_2 排放比例发生显著变化（图 4-35）。2000 年以后，亚洲 10 年龄以下生产线的排放比例急剧增加，在 2010 年前后达到峰值（72.6%），然后逐渐下降。这一增长趋势与带有预热器和预分解炉的干法装置的大规模扩张相一致，后来比例的下降主要是由于中国的需求饱和以及相关的新生产线建设放缓。然而，由于印度和越南继续进行新的建设，年轻生产线的排放比例可能会反弹。至于中东和非洲，15 岁以下年轻生产线的贡献在 2000 年后有所增加，没有明显减少，反映出需求不断增长和基础设施不断扩大。与新兴国家不同，经合组织和欧盟的特点是 30 年以上生产线的排放比例稳步增加，尽管新生产线也是小规模建造的，反映在年轻生产线相对稳定的贡献上。2000 年后，世界其他地区的年轻生产线所占比例有所增加，但与此同时，30 岁以上生产线的贡献也略有上升，这归因于发达国家和发展中国家水泥行业演变的混合。总体而言，单位容量和年龄的时变排放量都详细揭示了区域排放模式和变化，表明了需求演变、技术改造和结构优化等各种潜在影响因素。

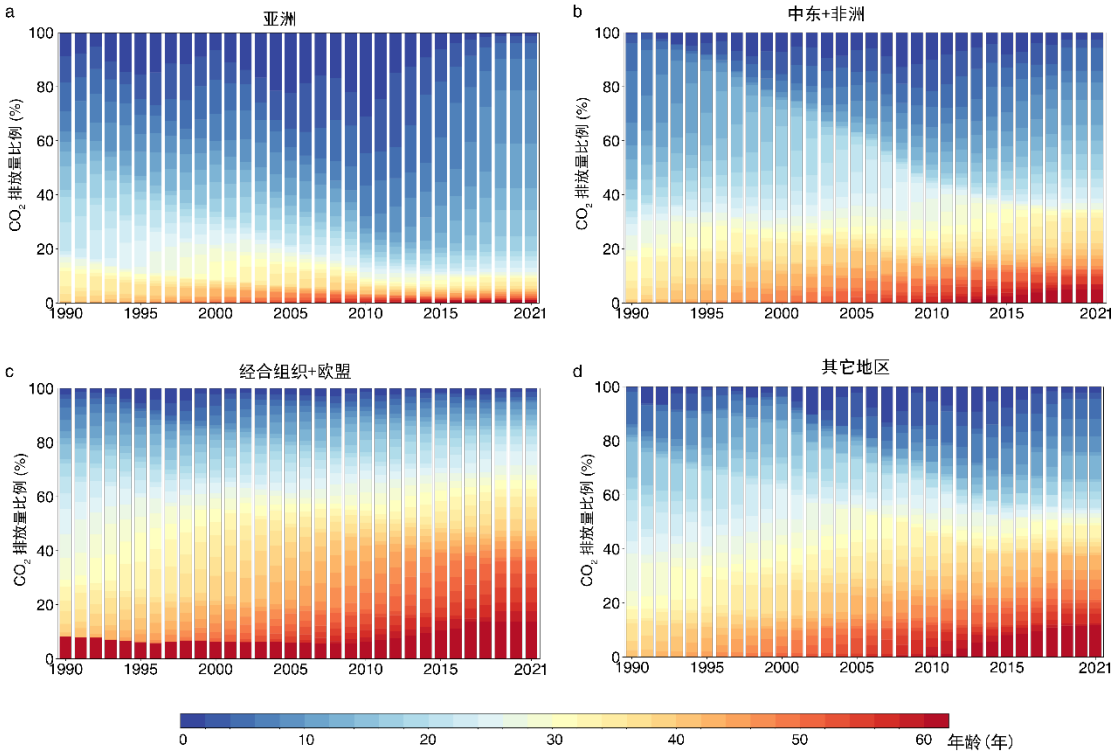

图 4-35 1990-2021 年全球各区域不同服役年限水泥生产线 CO_2 排放贡献变化

4.2.4 道路交通行业

近三十年全球机动车碳排放持续上升（图 4-36）。从 1990 年的 33 亿吨 CO_2 增长至 2021 年的 60 亿吨 CO_2，增加了 78%。从区域贡献来看，不论历史累积排放还是各年实际排放，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。自 1990 年以来（1990-2021 年）全球机动车累积排放 1548 亿吨 CO_2，其中 62%来自经合组织与欧盟。而亚洲近三十年机动车碳排放增长显著，由 1990 年的 3.0 亿吨 CO_2 增加至 2021 年的 14.6 亿吨 CO_2，在全球机动车碳排放中的占比增加了接近 2 倍，2021 年对全球机动车碳排放的贡献为 24%。

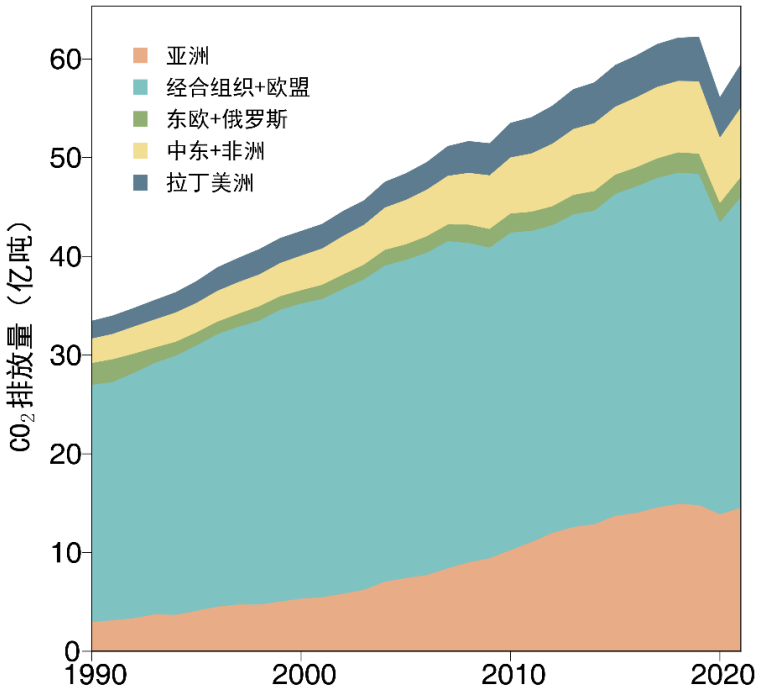

图 4-36 1990-2021 年全球道路交通行业分区域 CO_2 排放量

近三年道路交通行业受疫情影响较大（图 4-37）。2020 年全球道路机动车碳排放同比下降了 9.8%，但随着疫情稳定后复工复产的稳步推进，全球道路机动车碳排放在 2021 年同比增长 6.0%，对疫情的冲击有较大程度的缓解。尽管近年来经合组织与欧盟的排放占比逐年降低，但 2021 年依旧贡献了 53%的全球机动车碳排放。

从国家层面来看，近三十年来亚洲机动车的碳排放增长主要受到中国、印度、印度尼西亚、泰国和马来西亚的需求驱动，它们的累计碳排放量占到了全球的接

近 80%。2021 年经合组织和欧盟区域的碳排放贡献主要来自于美国、日本、德国、加拿大、法国等发达国家，这些国家道路交通行业发展完备，有更多的机动车注册量和流动量，这些国家的碳排放占到了经合组织和欧盟总排放的 65.8%，全球总排放的 34.8%。

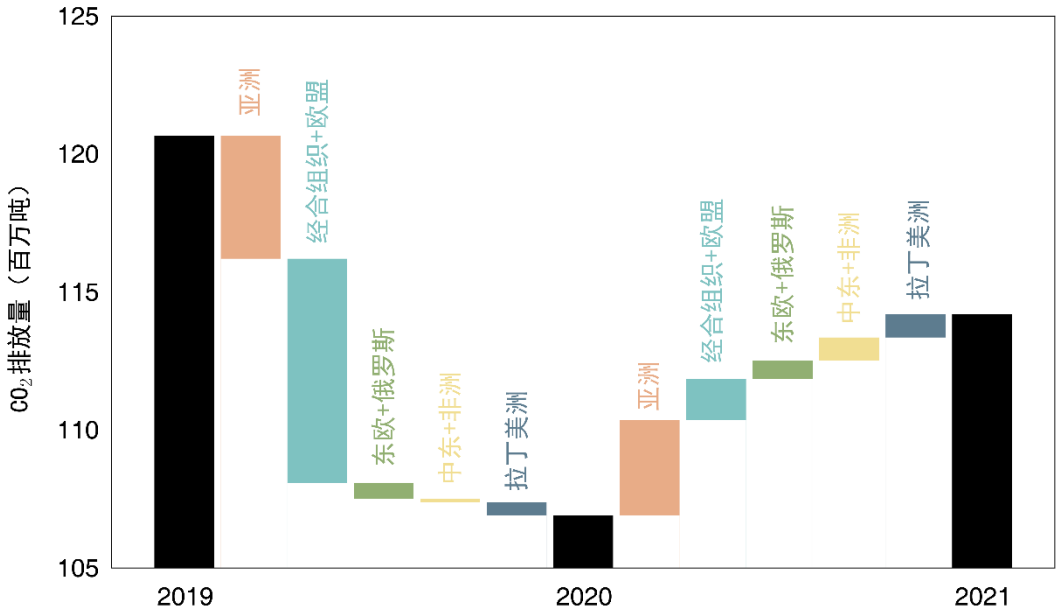

图 4-37 2019-2021 年全球道路交通行业 CO_2 排放变化量分区域驱动因素

不同车型在机动车排放量中的贡献也各不相同（图 4-38）。小型客车在 2019-2020 年的接近 6 亿吨总的碳排放下降中贡献了接近 60%的下降量，其次是重型货车和轻型货车，分别贡献了 18%和 16%。同样在 2020-2021 年的碳排放回升中，小型客车承担了最大的增长贡献，其在总增长量中占到了 52%，其次是重型货车和轻型货车，分别带动了 26%和 14%的机动车二氧化碳排放。

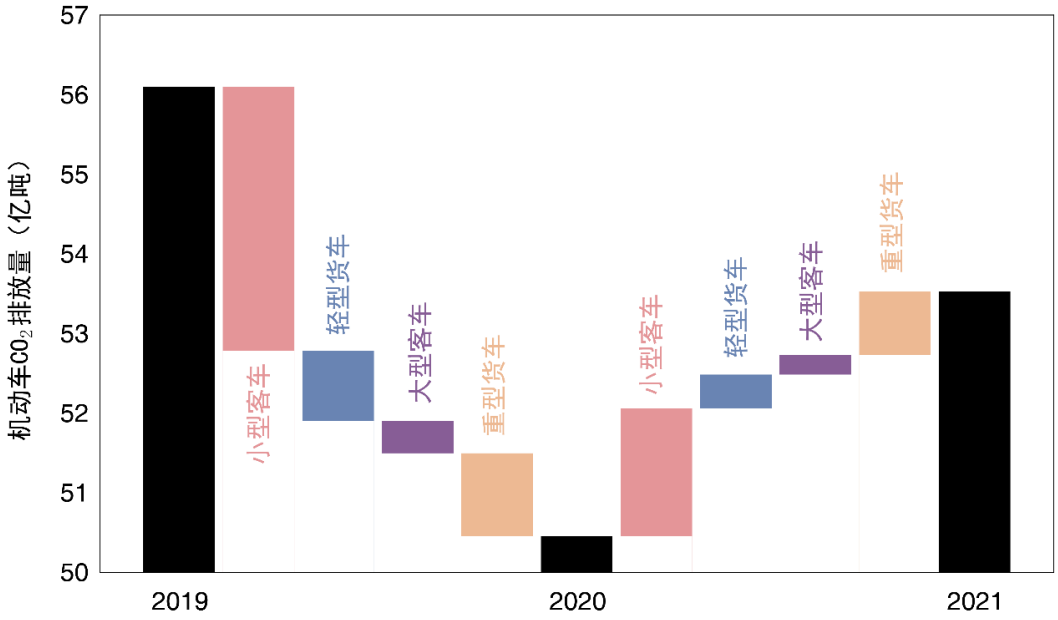

图 4-38 2019-2021 年全球道路交通行业 CO_2 排放变化量分车型驱动因素

从车型分布来看，全球道路交通行业碳排放主要是由小型客车和重型货车所贡献（图 4-39）。对于汽油车而言，自 1990 年以来，小型客车产生的碳排放在汽油车中就始终起到主导作用，1990 年全球汽油车 73%的碳排放来自小型客车，2021 年其占比增长至 78%，这也是由于大部分国家的小型客车主要以汽油为燃料。其次是轻型货车和重型货车，在 2021 年两者的碳排放占比分别为 18%和 3%。对于柴油车而言，由于其年均行驶里程远高于其他车型，2021 年重型货车对柴油车碳排放的贡献达 50%，即使在 1990 年也占到了 45%。其次是小型客车和大型客车，在 2021 年两者的碳排放占比分别为 23%和 16%。

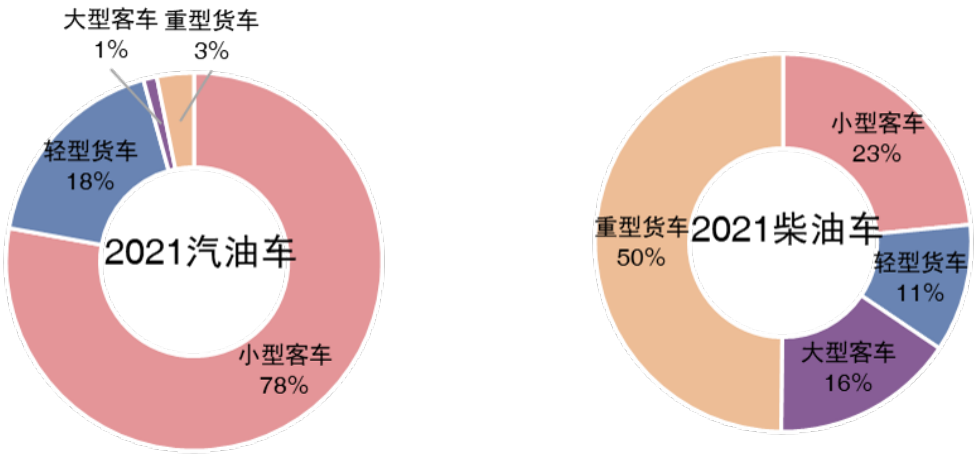

图 4-39 2021 年全球道路交通行业分车型 CO_2 排放分布

4.2.5 炼油行业

在 2000-2018 年间，全球炼油行业碳排放显著增长，从 2000 年的 10.5 亿吨增长至 2018 年的 12.4 亿吨。同时碳排放空间分布发生显著变化，排放热点地区逐渐从欧美转移至亚洲地区。中国和印度的炼油厂碳排放持续稳定增长，全球排放占比分别从 2000 年的 6%和 3%攀升到 2018 年的 16%和 7%。相比之下，欧洲和美国炼油厂的碳排放占比分别从 2000 年的 22%和 24%下降到 2018 年的 17%和 21%。该趋势在 2003 年前后开始呈现，且在 2009 年全球经济危机后更为显著。2009 年前后也是全球炼油厂碳排放年龄结构转变的关键节点（图 4-40）：在 2009 年之前，碳排放主要来自发达国家服役年限达 50 年左右的炼油厂；而在 2009 年以后，新兴经济体大量新建炼油厂涌现，服役年限在 20 年以下的炼油厂逐渐成为全球炼油行业碳排放的主要贡献者。

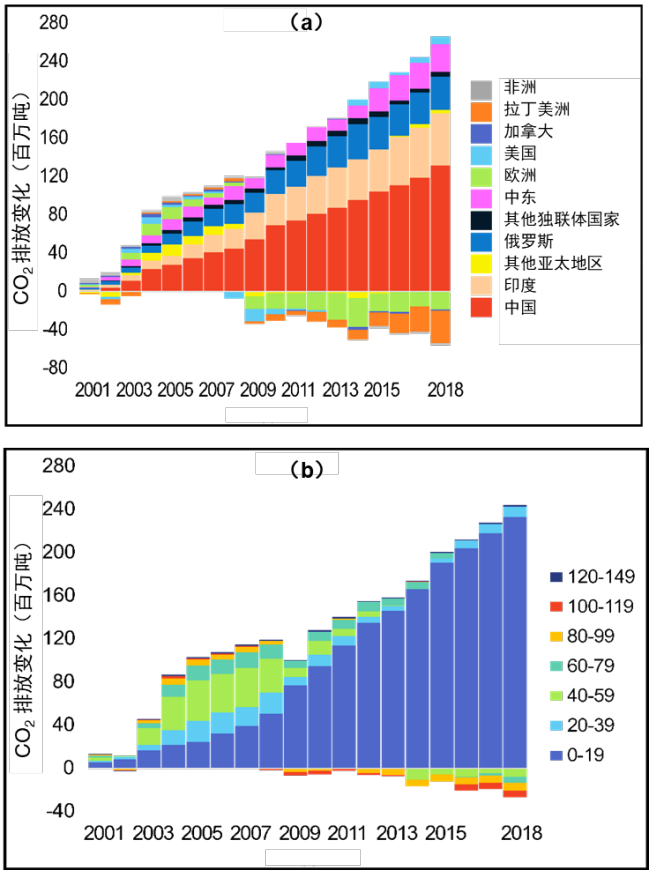

图 4-40 2000-2018 年全球炼油行业分地区、分服役年限碳排放变化

2018 年全球炼油行业设施不同服役年限的碳排放区域差异性显著：中国、印度和中东地区的炼油厂普遍建设较晚（服役年限小于 40 年），碳排放占炼油

行业总排放量的 22%；而欧洲、美国和日本等发达地区的炼油厂大多已投运超过 40 年，碳排放占炼油行业总排放量的 37%。除年轻化外，发展中地区炼油厂还呈现出显著的大型化特征。例如，中国拥有全球近一半在 2000- 2018 年间投产的、年产能达千万吨级的大型炼油厂（图 4-41.c）。这些年轻的大型炼油厂装备先进的工艺技术，运营效率高，可精炼重质原油，生产多类型轻质油产品。

与此相反，2018 年日本（图 4-41.d）、欧洲（图 4-41.e）和北美（图 4-41.b）在役炼油厂的平均服役年限均在 50 年以上，已经接近或超过其炼油厂平均使用寿命。因此，尽管日本、欧洲和美国的老旧炼油厂在 2018 年仍产生大量碳排放，但其可能在未来几年被关闭。在 2018 年或之前已经关停的炼油厂（图 4-40 中的灰色点）亦主要集中分布在上述三个地区。非洲和拉丁美洲的炼油厂主要分布在海岸线附近特别是港口地区，其年龄结构复杂，单个炼油厂的碳排放量较小。各地区差异化的年龄结构揭示了全球炼油行业的发展趋势：20 世纪 30 到 40 年代在美国发展迅速，50 年代发展重心转移至欧洲，90 年代以来在亚洲和中东兴起。年龄结构的地区差异也驱动了不同配置构型的炼油厂碳排放占比的区域差异性。

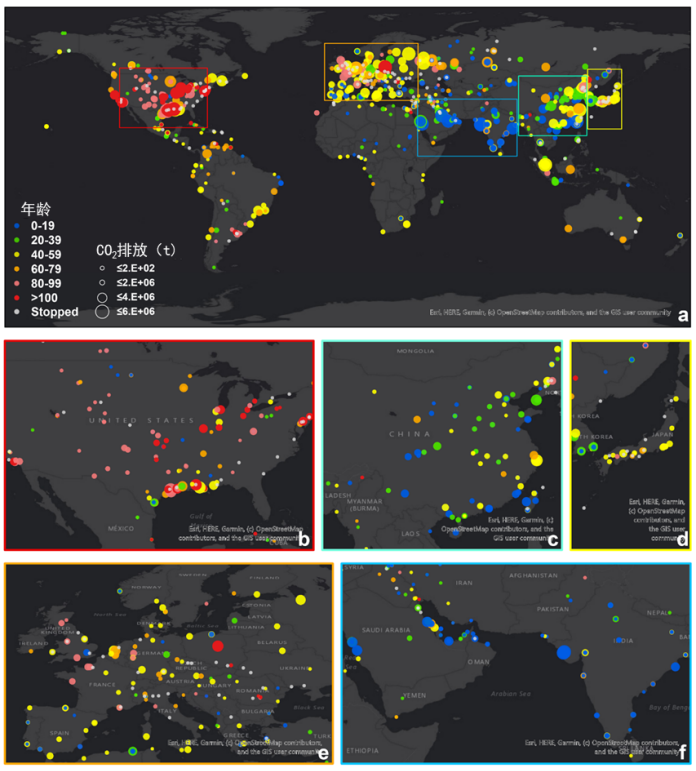

图 4-41 2018 年全球 1056 家炼油厂的地理位置、服役年限和碳排放

从配置构型的角度出发，深加工炼油厂通常相比浅加工炼油厂具有更大的炼油能力、更高的碳排放量和更长的服役寿命（图 4-42）。随着炼油厂的老化，深加工炼油厂碳排放占比逐渐增加，其分别占服役年限为 0~9 年、40~64 年和 75 年以上的工厂碳排放量的 80%、88%和 93%。因此，由于其更长的服役寿命，深加工炼油厂不仅在目前碳排放中占据主导地位，在未来也很可能将保持较高的碳排放占比。

各地区不同配置构型的碳排放存在差异性。在炼油行业起步较早的发达国家，炼油厂深加工构型特征更为明显，且主要为服役年限 40 年以上的炼油厂。在炼油业起步较晚的中国、印度和中东地区，深加工炼油厂数量和碳排放占比相对较小，但是其深加工炼油厂的平均排放量明显高于欧洲和美国等发达国家。 由此可见，当前中国、印度和中东地区年轻的深加工炼油厂是全球炼油行业生产和碳排放的重点区域。

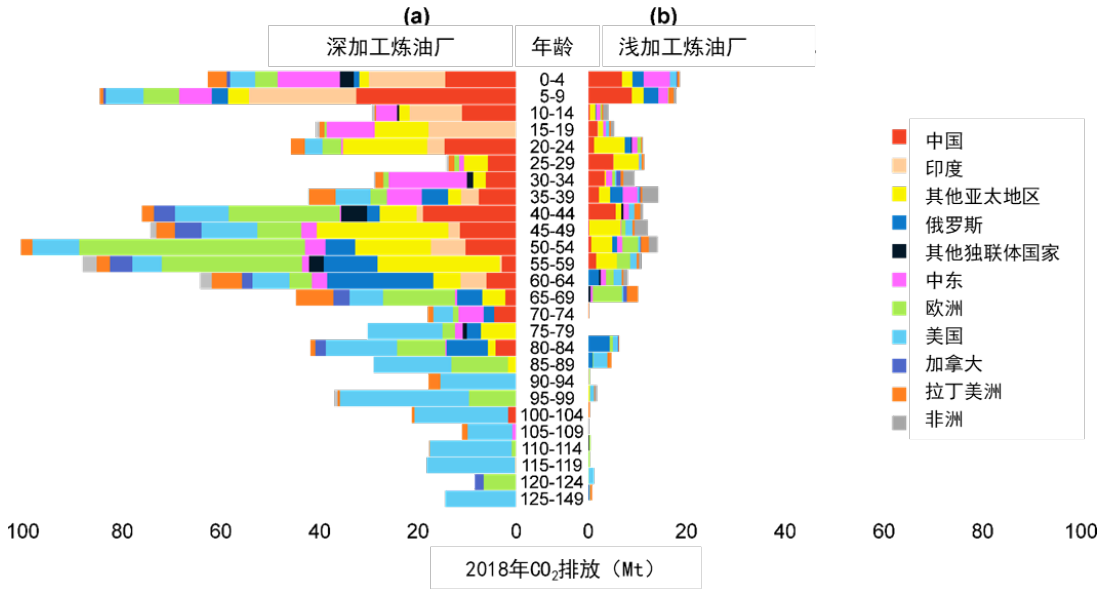

图 4-42 2018 年全球深加工炼油厂（a）和浅加工炼油厂（b）的碳排放年龄结构分布

4.3 全球能源基础设施碳排放锁定效应

4.3.1 2021 年能源基础设施碳排放锁定效应

能源基础设施的碳排放锁定效应是指现有能源基础设施在其生命周期内累

积排放的二氧化碳量。2021 年，全球火电、钢铁、水泥和道路交通行业共计排放了 242 亿吨二氧化碳，占全球碳排放总量的 69%。不仅如此，这些行业的能源设备在未来还会运行数十年并持续排放二氧化碳，形成碳排放锁定效应，严重地阻碍了低碳经济的发展。本研究首先通过假设现役及拟建能源基础设施的服役寿命与历史平均服役寿命相等，刻画出现役及拟建能源基础设施的存活曲线。基于现役及拟建能源基础设施的未来投运率与当前设备投运率保持一致的假设，本研究以 2021 年全球能源基础设施碳排放量作为基准排放数据，使用自下而上的排放核算方法量化了现有和拟建能源基础设施的碳排放锁定效应。

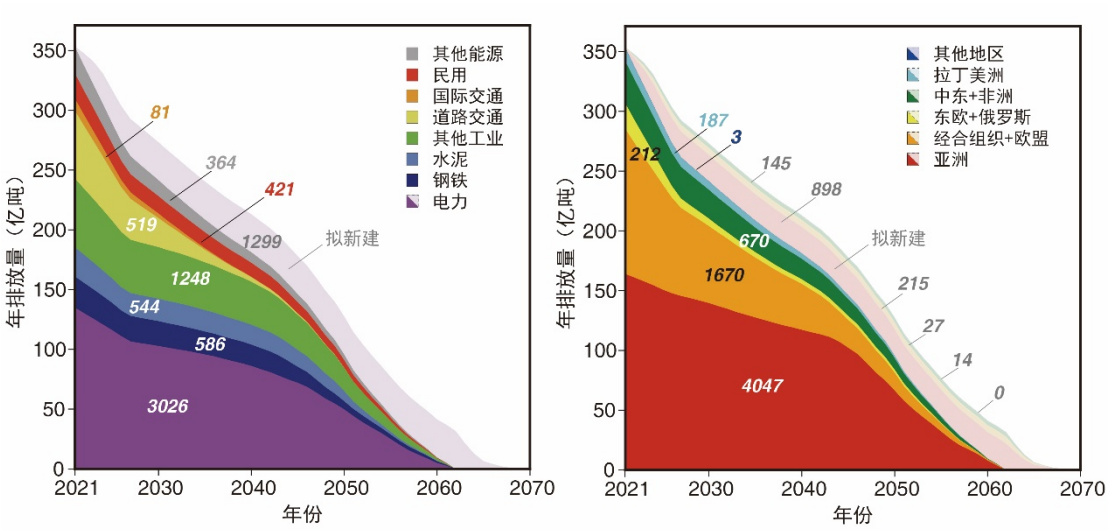

图 4-43 2021 年全球能源基础设施分行业和分地区的碳排放锁定效应

如能源基础设施按照历史平均服役寿命和设备投运率运行，2021 年全球现役和拟建能源基础设施共计锁定了 8089 亿吨碳排放量（图 4-43）。电力、工业（钢铁、水泥及其他工业）和道路交通行业主导了当前全球能源基础设施的碳排放锁定效应。其中，电力部分锁定效应最大，其碳排放锁定效应为 3026 亿吨，占全球能源基础设施锁定碳排放的 37.4%。钢铁、水泥行业在未来分别锁定了 586、544 亿吨碳排放量，贡献了全部锁定碳排放的 7.2%和 6.7%。相较于钢铁和水泥行业，道路交通行业在 2021 年排放了更多二氧化碳，但道路交通行业仅锁定了 519 亿吨碳排放，略低于钢铁和水泥行业。这是因为机动车平均服役寿命为 15 年，是钢铁、水泥等工业行业能源基础设施平均服役寿命的三分之一左右。除此之外，其他行业的能源基础设施总共锁定了 3413 亿吨碳排放，主要来自于其他

工业源、拟建火电厂以及民用源。

针对火电行业，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。为此我们设置了三个不同的年发电小时数情景，假定 2030-2040 年其排放量呈线性变化来进行分析。如自 2030 年起将火电年发电小时数逐步降低到 3000 小时，则火电行业锁定碳排放将相较基准情景减少 13%（下降至 2639 亿吨），而降到 2000 小时和 1000 时分别减少 24%（下降至 2292 亿吨）和 36%（下降至 1945 亿吨）（图 4-44）。对于钢铁和水泥等工业行业，新兴低碳生产技术和 CCS 技术等的应用也可以在未来显著减少其锁定碳排放。以水泥行业为例，CCS 技术应用是其未来脱碳的主要手段，如自 2035 年起全球在役水泥生产线以每年 5%和 10%的速度大规模安装 CCS，其锁定碳排放可分别减少 18%和 29%；如果利用其它低碳生产技术进一步替代现有高碳生产线，缩短其服役周期，将进一步解除其碳锁定效应。钢铁行业则可通过电炉短流程炼钢转型、CCS 技术、绿色氢能冶金技术等减少其碳锁定效应。

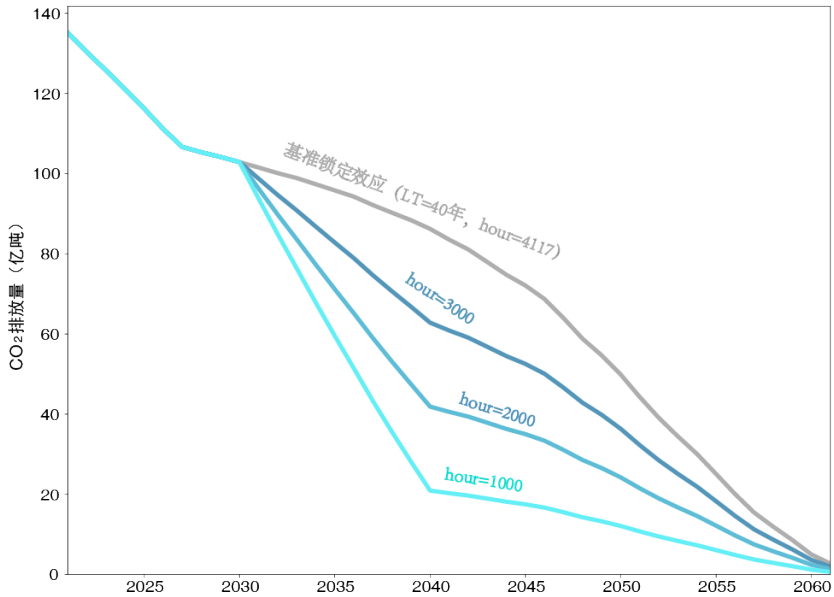

图 4-44 火电行业碳锁定效应敏感性分析

在区域层面上，亚洲和经合组织与欧盟国家的能源基础设施碳排放锁定效应占据了全球碳排放锁定效应的绝对主导地位。以上两个地区分别贡献了全部锁定碳排放的 50.0%、20.6%。中东与非洲地区能源基础设施锁定了 670 亿吨碳排放量，占全部锁定碳排放的 8.2%。其次，全球能源基础设施碳排放锁定效应的区

域分布与当前全球碳排放的区域分布之间存在一定的差异。以发达国家为主的经合组织与欧盟在 2021 年碳排放贡献率为 34.3%，是该地区的碳排放锁定效应贡献率的 1.5 倍以上。这是因为发达国家能源基础设施建设起步较早，现役设备投运时间普遍较长，在未来锁定的碳排放较少。与经合组织与欧盟不同，近年来以发展中国家和新兴经济体为主的亚洲地区大力投入能源基础设施建设，驱动能源基础设施年龄结构年轻化，致使碳排放锁定效应加剧。在 2021 年，亚洲能源基础设施贡献了全球近 46%碳排放量，并占据了超过一半的全部碳排放锁定效应。

拟新建电力行业能源基础设施对碳排放锁定效应的贡献不容小觑。根据本报告 3.1.1.3 小节，当前全球拟新建火电装机容量超过 980 吉瓦。假设这些拟新建火电厂按照历史平均服役寿命和设备投运率运行，它们将锁定 1299 亿吨碳排放量，进一步危及气候目标的实现。由于亚洲拟新建火电厂装机容量最大，该地区将主导全球拟新建火电厂的碳排放锁定效应，贡献率接近 70%。而经合组织与欧盟地区仅贡献了拟新建火电厂碳排放锁定效应的 16.5%，其中美国拟建火电项目在该地区中位列第一，共锁定了 57 亿吨碳排放。此外，一带一路重要成员国印度、越南、印尼、土耳其的电力需求随着经济快速发展而大幅上涨，规划了大批火力发电厂新建项目。据统计，以上四国拟建火电项目共锁定了 311 亿吨碳排放量，接近全球拟建火电厂碳排放锁定效应的四分之一。

4.3.2 2019-2021 年碳排放锁定效应变化趋势

2019-2020 年期间，全球现有能源基础设施锁定碳排放出现全方面的小幅下降（降幅为 1.7%，约 121 亿吨）（表 4-3）。从行业尺度来看，电力和钢铁、水泥等工业行业的锁定碳排放下降幅度较大，全球电力基础设施锁定碳排放在 2019-2020 年下降了 46.5 亿吨，占全球总下降幅度的 38.4%，钢铁和水泥则分别下降了 10.3 亿吨和 16.2 亿吨。

表 4-3 2019-2020 年全球能源基础设施分行业和分地区的锁定碳排放变化（亿吨）

地区/行业	电力	钢铁	水泥	其他工业	道路交通	国际交通	民用	其他能源
亚洲	-4.6	-9.9	-12.9	-4.9	-3.0	-0.4	-0.6	-0.8

东欧+俄罗斯	-3.9	-0.1	-0.1	-0.9	-0.3	-0.1	-0.9	-0.3
拉丁美洲	-1.8	-0.2	-0.2	-1.7	-0.6	0.4	-0.5	-0.3
中东+非洲	-10.2	0.3	-1.6	-6.3	-0.1	-0.1	-1.9	-0.7
经合组织+欧盟	-26.0	-0.4	-1.4	-11.2	-1.8	-0.1	-5.9	-4.8
其他地区	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

不同地区的锁定碳排放变化也具有明显差异。所有地区的电力基础设施锁定碳排放均出现不同程度的下降，经合组织和欧盟地区电力基础设施建设在疫情期间放缓，其锁定碳排放下降了 26 亿吨，贡献了全球电力行业基础设施锁定碳排放下降量的 55.9%。中东和非洲电力基础设施锁定碳排放减少了 10.2 亿吨，其次是亚洲地区电力基础设施锁定碳排放减少了 4.6 亿吨，从而驱动了 31.9%的全球电力基础设施锁定碳排放下降。对于钢铁行业而言，除了中东和非洲基础设施锁定碳排放增加了 0.3 亿吨以外，其他地区的钢铁基础设施锁定碳排放均出现下降趋势，主要驱动力来自亚洲地区，在 2019-2020 年期间该地区下降了 9.9 亿吨的锁定碳排放，占到了全球钢铁基础设施锁定碳排放变化量的 96%。而不同地区的水泥行业基础设施锁定碳排放均有所下降，亚洲地区钢铁基础设施锁定碳排放下降了 12.9 亿吨，占全球水泥基础设施锁定碳排放下降总量的 79.2%。其次是中东和非洲以及经合组织和欧盟，分别下降了 1.6 亿吨（10%）和 1.4 亿吨（8.9%）。对于道路交通而言，全球道路交通能源基础设施的锁定碳排放下降了 5.7 亿吨，这与新冠疫情影响下机动车注册量大幅减少有关。其中，亚洲和经合组织与欧盟地区受新冠疫情对居民出行的影响较大，主导了全球道路交通锁定碳排放的下降。这些地区的道路交通锁定碳排放共下降了 4.8 亿吨，占全球总下降量的 84%。而国际交通基础设施锁定碳排放在 2019-2020 年拉丁美洲地区增加了 0.4 亿吨，其他地区均小幅下降。全球民用部门基础设施锁定碳排放共下降 9.7 亿吨，其中经合组织与欧盟地区起到主导作用，下降达到 5.9 亿吨。

2020-2021 年期间，全球现有能源基础设施锁定碳排放趋于稳定（降幅为

0.3%，约 22 亿吨）（表 4-4）。受到后疫情时代经济复苏的影响，全球电力和钢铁行业的基础设施锁定碳排放出现了增长，电力行业基础设施锁定碳排放增长了 31.1 亿吨，而钢铁行业基础设施锁定碳排放增长了 5.1 亿吨。水泥行业基础设施锁定碳排放出现小幅下降，下降了 3.5 亿吨。道路交通行业受疫情冲击较大，机动车注册量大幅减少带来的锁定碳排放的削减作用在 2020-2021 年期间贡献了 28.5 亿吨。全球民用基础设施锁定碳排放则在此期间内增长了 12 亿吨。

不同地区的锁定碳排放变化对不同行业的贡献也具有明显差异。经合组织与欧盟地区电力基础设施建设放缓致使碳锁定效应下降了 46 亿吨碳排放，抵消了一部分亚洲电力基础设施建设带来的锁定碳排放增加，亚洲电力基础设施锁定碳排放增加了 86.7 亿吨，从而驱动全球电力基础设施锁定碳排放上升。与电力行业不同，尽管亚洲地区钢铁基础设施锁定碳排放有所下降（2.4 亿吨），其他地区钢铁基础设施锁定碳排放都有不同程度的增长，经合组织与欧盟地区增长了 3.2 亿吨，东欧和俄罗斯地区增长了 3.0 亿吨。对于水泥行业而言，除了经合组织与欧盟地区基础设施锁定碳排放增长了 0.6 亿吨，其他地区的水泥基础设施锁定碳排放均出现下降趋势，其中亚洲起到主导作用，下降了 3.3 亿吨，占全球水泥基础设施锁定碳排放下降量的 94%。道路交通行业的基础设施锁定碳排放在所有地区都有不同程度的下降，经合组织与欧盟地区道路交通基础设施锁定碳排放下降了 18.7 亿吨，占全球总下降量的 65.7%，其次是亚洲和中东与非洲地区，分别下降了 4.6 亿吨和 3.9 亿吨。国际交通的基础设施锁定碳排放的整体变化趋势和道路交通一致，经合组织与欧盟地区下降了 13.8 亿吨，亚洲和中东与非洲地区分别下降了 5.4 亿吨和 3 亿吨。与其他行业不同，民用部门基础设施锁定碳排放在大多数地区都呈现出小幅上升，亚洲起到主导作用，拉动了 10.4 亿吨的锁定碳排放增长。

表 4-4 2020-2021 年全球能源基础设施分行业和分地区的锁定碳排放变化（亿吨）

地区/行业	电力	钢铁	水泥	其他工业	道路交通	国际交通	民用	其他能源
亚洲	86.7	-2.4	-3.3	8.6	-4.6	-5.4	10.4	0.9

东欧+俄罗斯	-1.6	3.0	-0.2	-0.5	-0.3	-0.9	0.6	-0.5
拉丁美洲	-3.2	0.4	0.1	-0.5	-0.9	-1.0	0.9	-0.3
中东+非洲	-4.5	0.8	-0.7	-0.3	-3.9	-3.0	0.6	-0.8
经合组织+欧盟	-46.0	3.2	0.6	-8.4	-18.7	-13.8	-0.5	-12.1
其他地区	-0.3	0.0	0.0	-0.3	0.0	0.0	0.0	0.0

4.3.3 2021 年能源基础设施锁定碳排放对全球气候目标的威胁

动态追踪锁定碳排放与碳排放预算的差距有助于评估实现气候目标需要做出的努力。随着人为源不断地排放二氧化碳到大气中，全球碳排放预算正在迅速地缩减。根据最新的联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）的第六次评估报告（AR6），2020 年起 1.5℃温控目标下的碳排放预算进一步减少至 4000-5000 亿吨（50%-67%概率），2℃温控目标下的碳排放预算则更是减少至 11500-13500 亿吨（50%-67%概率）（IPCC, 2021），锁定碳排放与剩余碳预算之间的紧张关系日益加剧（图 4-45）。全球电力、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约 4700 亿吨碳排放超过全球 1.5℃目标下剩余的碳排放空间，约占到 2℃目标下剩余碳排放空间的 35%-40%。全球所有现存排放源在未来锁定的约 6800 亿吨碳排放将超过全球 1.5℃目标下剩余碳排放 2000-3000 亿吨，约占到 2℃温控目标碳空间的 50%-60%。这意味着假设人为源维持现有的排放水平，1.5℃温控目标下的碳排放预算将在未来 10-15 年内消耗殆尽，实现 1.5℃温控目标任重道远。即使未来不新建以化石燃料为主的能源基础设施，现有的电力、钢铁和水泥等基础设施也需要提前退役或采用碳捕获与封存技术（Carbon Capture and Storage，CCS）进行改造才能帮助 1.5℃温控目标的实现。在新兴经济体的能源基础设施建设仍然持续增长的背景下，加快产业转型，有效减少传统能源基础设施建设带来的二氧化碳排放是当前亟需探索的手段。

同样值得关注的是，全球已有 130 个国家或地区提出净零排放目标，覆盖近

90%碳排放，超过 90%的 GDP 和约 85%的人口，包括了较多锁定效应较强的新兴经济体（Lang et al., 2023），共计占 2021 年碳锁定效应的 91%。因此，如果这些国家面向全球气候目标共同努力，可能极大缓解能源基础设施锁定碳排放对全球气候目标的威胁。锁定碳排放与国家气候目标之间的国家也值得持续追踪。

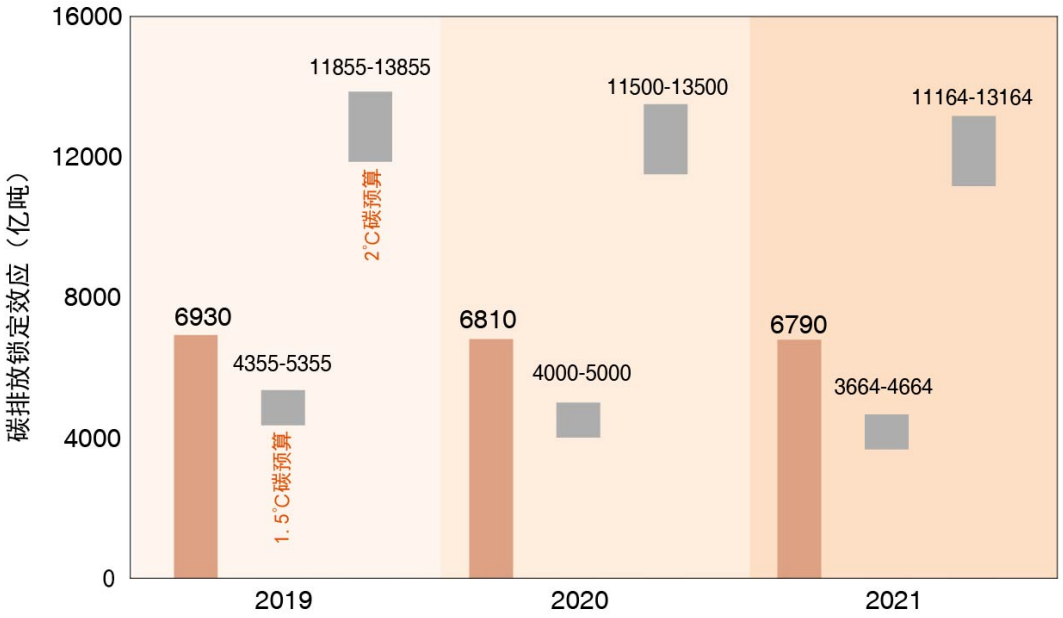

图 4-45 2019-2021 年全球锁定效应与剩余碳排放空间

4.3.4 2021 年全球碳排放锁定效应的敏感性分析

能源基础设施的生命周期和利用率是影响碳排放锁定效应的重要因素。在不考虑拟建电厂的情况下，假设能源基础设施以历史平均服役寿命和设备投运率运行，2021 年在役能源基础设施共计锁定了 6790 亿吨碳排放，远超出 1.5℃温控目标下剩余的碳预算（图 4-46）。为解除能源基础设施的碳排放锁定效应，提前退役现有能源基础设施、降低设备利用率是两种行之有效的措施。若将能源基础设施的运行年限从 40 年降低至 30 年且保持现有的设备利用率，则全球碳排放锁定效将下降到 4914 亿吨，降幅高达 27.6%。反之，通过能源结构转型，现役能源基础设施的设备利用率降低 30%且维持能源设备的运行寿命，则可以解锁超过 1621 亿吨碳排放量。

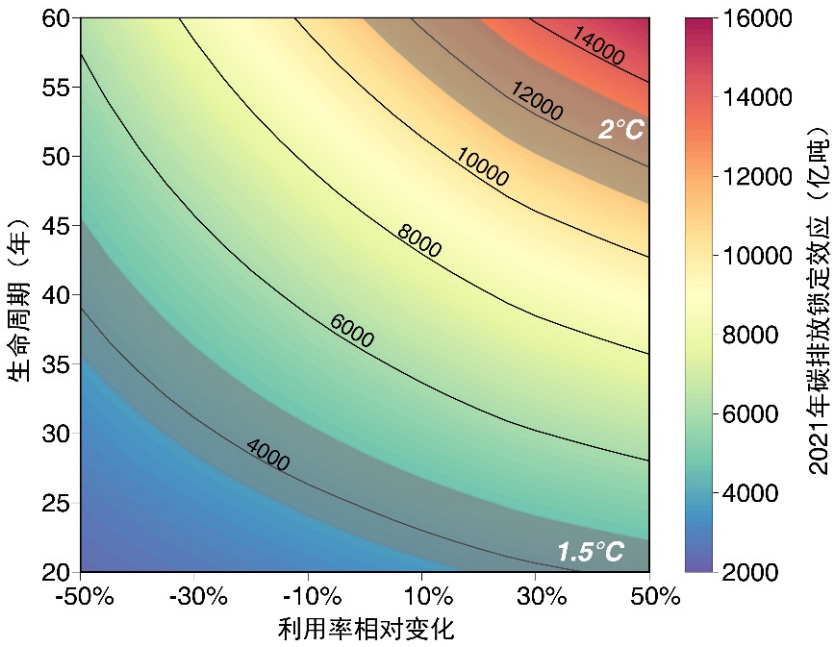

图 4-46 2021 年全球碳排放锁定效应的敏感性分析

火电行业是解除能源基础设施碳排放锁定效应的关键抓手。在役火电厂贡献了全球在役能源基础设施锁定碳排放的 44.6%。如图 4-47 所示，若提前退役现役火电机组，将火电机组的平均服役年限从 40 年降低至 30 年，火电行业的碳排放锁定效应将从 3026 亿吨下降到 1986 亿吨，降幅接近 35%。在当前风电、光伏等新能源发电快速发展的背景下，火电机组的灵活性改造将持续推进，未来火电机组的平均年发电小时数也将会大幅降低。如果火电机组的利用率下降 30%，则火电行业碳排放锁定效应将减少至 2119 亿吨。

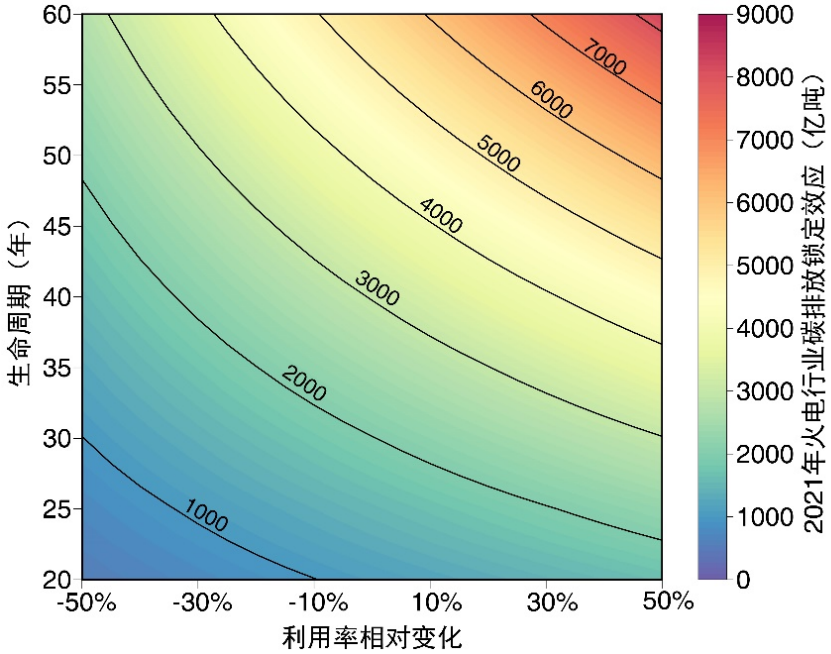

图 4-47 2021 年全球火电行业碳排放锁定效应的敏感性分析

钢铁、水泥和其他工业是解除能源基础设施碳排放锁定效应的重要行业。在不使用 CCS 的假设下，若将钢铁、水泥行业的能源设备平均服役年限从 40 年降低至 30 年，则两者的碳排放锁定效应分别下降至 375、354 亿吨，降幅均在 35%左右。如果钢铁、水泥行业能源设备的平均利用率下降 30%，则两者锁定碳排放将会分别减少至 410、381 亿吨。针对其他工业行业，能源设备运行年限减少 10 年或设备利用率降低 30%两种解除碳排放锁定效应的措施，能够分别削减该行业锁定的 435、375 亿吨二氧化碳排放。

因此，为解除现有能源基础设施的碳排放锁定效应，探寻成本最优化的高碳能源基础设施提前退役路径、制定降低高碳基础设施利用率的有效方案，将会成为实现 1.5℃温控目标的重要议题。

4.4 中国能源基础设施发展及碳排放锁定效应

过去三十年中国经济社会飞速发展，工业化和城市化进程大步向前，推动国内生产总值（GDP）增加 50 余倍，突破 100 万亿元（国家统计局，2021）。为满足快速增长的基础建设、生产活动和人民生活需求，以煤炭为主的能源消费总量增长幅度超过 400%（国家统计，2021），同时我国大规模新建高能耗能源基

础设施（Liu et al., 2015; Tong et al., 2018; Liu et al., 2021; Wang et al., 2019），碳排放也因此不断攀升（Zheng et al., 2018）。但是我国幅员辽阔，在这一发展进程中受到政策导向、区位条件和人才流动等因素影响，各地区发展存在显著的时空差异性：东部许多地区在八九十年代就开始了较快的经济社会发展进程，中西部地区则在新世纪伊始启动的“西部大开发”等计划的推动下，逐步由东部地区带动其发展，因此地区之间碳排放变化和能源基础设施新建并不同步。上述因素共同塑造了我国近三十年来快速变化的碳排放和能源基础设施发展时空格局。

2020 年，中国明确了“二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值，努力争取 2060 年前实现碳中和”的“双碳目标”。在全球气候治理的浪潮中，我国承担起大国责任，将深度推进能源结构转型，从资源依赖型转向技术依赖型发展模式，在“双碳目标”驱动下开展广泛而深刻的社会经济系统性变革。但是，当前我国碳排放量仍处于高位，依赖化石能源的能源基础设施体量庞大，地区经济社会发展差异显著，如何实现平稳、有效而全面的低碳转型仍是一个巨大挑战。

本章节将追踪中国高碳能源基础设施近三十年的发展与时空演变；从部门、地区和省份等多角度揭示与之密切相关的碳排放锁定效应的时空变化；介绍我国在淘汰落后产能和解除“碳锁定”方面的重要成效；最后探讨碳排放锁定效应与“双碳目标”实现的相互联系以及潜在的挑战和机遇。

4.4.1 能源基础设施时空演变及现状

过去三十年，伴随着经济社会的快速发展，我国煤电、钢铁、水泥和道路交通等行业部门的能源基础设施体量快速增加，其增长势头在 2000 年后尤为显著（见图 4-48）。华北、华东等东部发达地区是能源基础设施增长的热点。

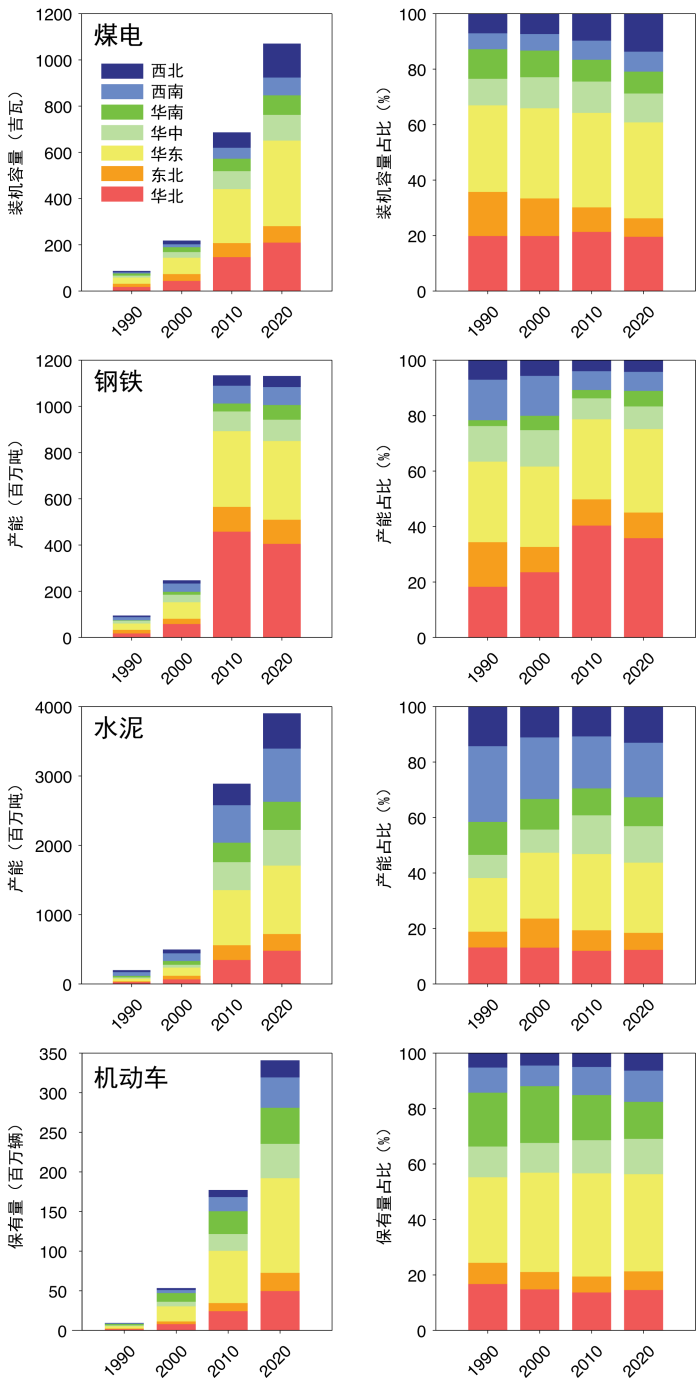

图 4-48 我国各地区 1990、2000、2010 和 2020 年煤电装机容量、钢铁产能、水泥产能和机动车保有量及其占比变化

1990 年全国煤电装机容量不足 100 吉瓦，到 2020 年已经超过 1000 吉瓦。全国各地区煤电装机容量均显著增长，除西北、东北等地区，各地区装机容量占比较为稳定。为了满足高速发展推动下本地用电需求的大幅上涨，华东和华北地区煤电装机容量扩张最为显著，其内部个别省份增长尤为迅速，如内蒙古、山东

和江苏等，1990-2020 年平均增速可达 10%左右。一些省份（如内蒙古）煤电的蓬勃发展除了与本地用电需求的增长有关，还归因于其依托自身资源优势而快速发展的外输电力产业（中国电力企业联合会，2021）。

我国钢铁行业在 2000 年后迅速发展，2020 年全国拥有超过 11 亿吨炼钢产能，二十年间增加了 4 倍。华北地区的炼钢产能增长最为显著，产能占比在 2020 年接近全国的 40%（1990 年<20%），其增长主要归因于河北钢铁行业的迅速扩张（平均增速 9%）。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港口辐射范围之内，进出口运输便利；京津冀地区的快速发展又催生了巨大的本地钢铁需求（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。尽管不及华北地区，由于江苏和山东等省份近二十年钢铁产能的大量新增，华东地区成为另一个炼钢产能的增长热点。2010-2020 年间华北等地区炼钢产能略有下降，主要得益于我国近年来化解落后和过剩钢铁产能的行动（Zheng et al., 2018; Zhang et al., 2019）。

我国水泥行业过去三十年间以 10%左右的产能增长率蓬勃发展，在 2020 年总产能接近 40 亿吨。不同于钢铁行业地理上更为集中的发展特征，水泥行业在多个地区都出现大量产能新增，且不局限于东部发达地区。2020 年，除华东地区拥有接近 10 亿吨水泥产能外，华北、华中、西南和西北均有接近或超过 5 亿吨的水泥产能。从省份角度看，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巨大市场快速发展水泥行业（Liu et al., 2021），1990-2020 年平均产能增速超过 13%，在 2020 年产能接近 3 亿吨；此外，四川、山东和广东等省份近二十年水泥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的优势企业和产能中心（中国水泥协会，2016），区域性特征明显，相比钢铁行业空间分布的集中度较低。近年来，我国水泥行业产能新建仍然保持高位，且存在“批小建大”等情况，其新建态势和环境影响值得持续关注。

我国机动车保有量在 1990 年不足 1000 万辆，到 2020 年我国已经拥有超过 3 亿辆机动车的庞大车队。与工业行业发展受到资源禀赋和运输条件等的限制不

同，机动车的发展主要受到人民出行需求和道路系统建设等因素的影响。随着我国快速的城市化进程，各地区人民生活水平普遍提高，道路系统不断完善，出行需求的激增推动了机动车保有量在各个地区较为同步的增长，因此机动车的地区占比随时间变化不大。从增长量来看，华东地区增长最为显著，在 2020 年已有接近 1.2 亿辆机动车（全国总量的 35%），其中山东、江苏和浙江为该地区增长的主要贡献者。其他省份中，广东、河北等是机动车保有量增长的热点。整体来看，东部发达省份在机动车保有量增长中占据主导，这与其经济发展水平较高和人口稠密等特征相一致。

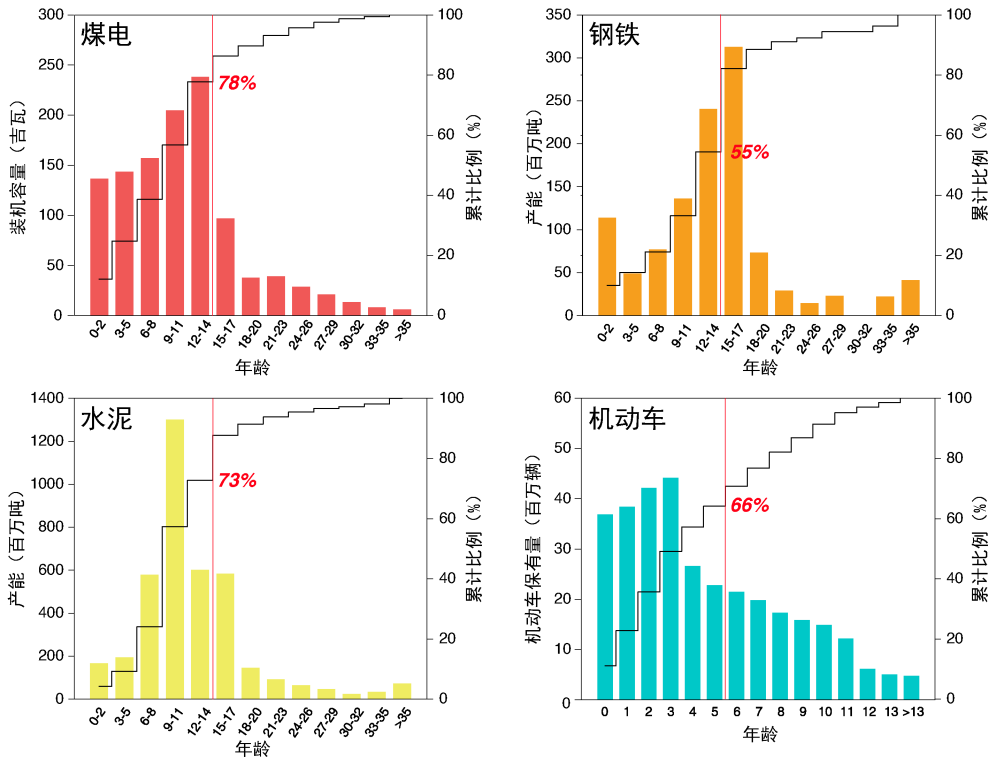

图 4-49 2020 年我国煤电装机容量、钢铁产能、水泥产能和机动车保有量年龄分布和累计比例

经过近二十年的快速发展，我国现有能源基础设施规模庞大，年龄结构高度年轻化（见图 4-49）。2020 年煤电、钢铁和水泥等重点碳排放行业中，服役少于 15 岁的能源基础设施装机容量或产能占比均超过 50%，其中煤电、水泥等行业比例更是超过了 70%。煤电装机容量年龄结构的峰值出现在 12-14 年，反映了“十一五”期间用电需求快速增长和“煤电一体化”开始大规模发展等因素对装机容量

增长的促进作用；钢铁产能年龄结构的峰值略大于煤电装机容量，出现在钢铁行业快速扩张的“十五”计划中后期，在这一时间段前后我国钢铁行业存在一定的盲目投资、产能盲目扩张的现象；水泥产能年龄结构的峰值出现在 9-11 年，与 2010 年左右新型干法水泥生产线的大量新建密切相关（Liu et al., 2021）。在道路交通方面，全国有接近三分之二的机动车服役少于或等于 5 年。高度年轻化的年龄结构意味着在设施自然退役的条件下（服役寿命大约 40 年），大量长寿命的煤电和工业能源基础设施仍可服役 20-40 年，可能对我国中短期气候治理产生持续的影响。相比之下，服役寿命较短的机动车等能源基础设施影响较小。

由于大量能源基础设施的服役时间仍然未达自然退役条件下服役寿命的一半，如果在中短期内将其提前退役以减少气候影响，或将造成大量搁浅资本（Pfeiffer et al., 2018），这给我国未来短期内的基础设施建设规划敲响了警钟。不过，近十年来我国能源基础设施建设已经出现一定放缓的趋势。以现有煤电装机容量为例，在服役 12-14 年的年龄结构峰值之后，随着服役时间减小装机容量逐渐下降。尽管出现了一定的积极信号，整体来看我国年轻的长寿命能源基础设施体量庞大，在气候治理背景下其巨大的排放惯性和潜在的经济损失风险不容乐观。

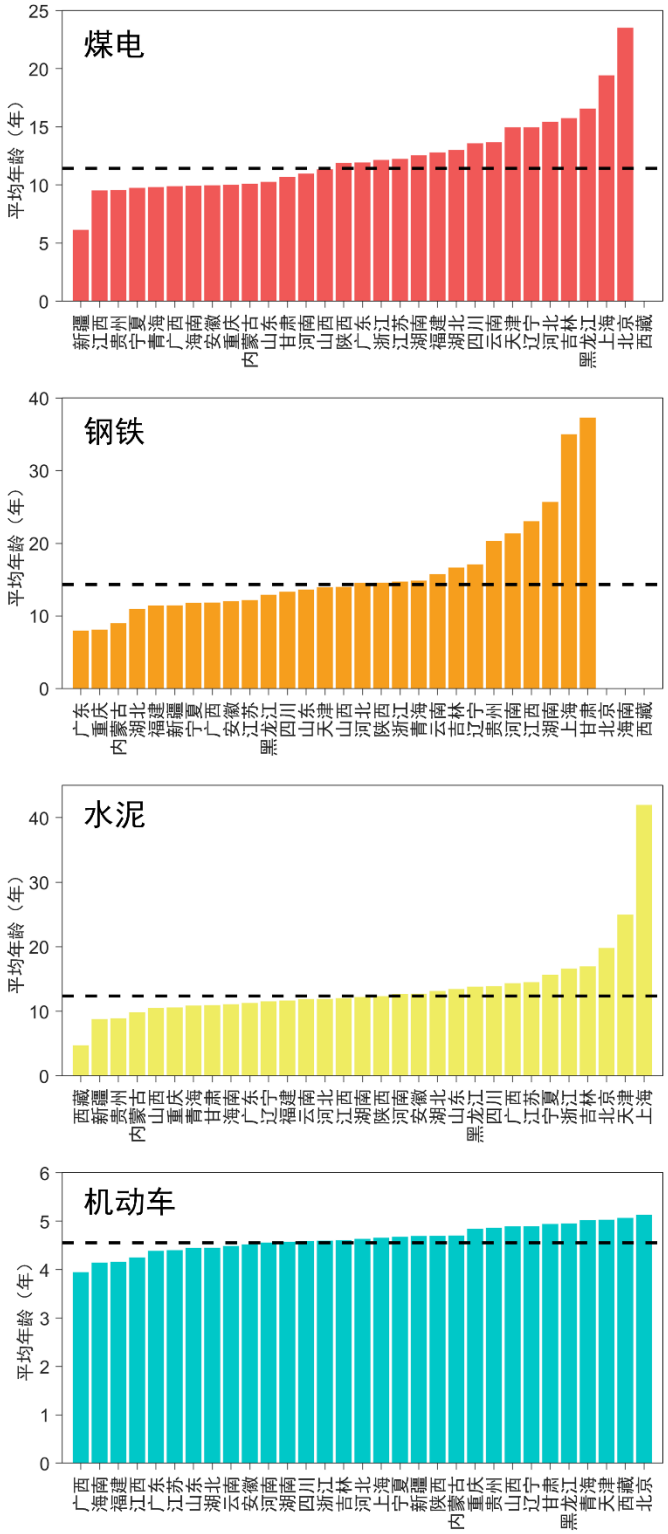

图 4-50 2020 年各省份煤电装机容量、钢铁产能、水泥产能和机动车保有量的平均年龄。黑色虚线代表全国平均年龄。

图 4-50 展示了 2020 年各省份煤电、钢铁、水泥和道路交通能源基础设施的平均年龄。我国能源基础设施年龄结构高度年轻化，全国煤电、钢铁和水泥能源

基础设施的平均年龄都在 10-15 岁之间，但是不同地区和省份之间能源基础设施的年龄结构有所差异。共有 8 个省份的煤电装机容量平均服役时间小于 10 年，主要分布在西北和华南地区。相较东部发达省份，这些省份经济发展普遍较晚，电力需求快速增长和相应设施新建也较晚，因此电力能源基础设施年龄结构较为年轻。大部分省份（17 个）的煤电装机容量平均年龄在 10-15 年之间；一些经济社会发展较早的省份则平均年龄偏大，主要位于东北和华北地区。钢铁行业中，大部分省份（16 个）的产能平均年龄在 10-15 年之间，其中包括钢铁生产大省河北、山东和山西等，这归因于我国 21 世纪前十年钢铁行业的快速扩张。一些钢铁行业发展较早的省份，如上海等则产能平均年龄较大。相比钢铁行业，水泥行业年龄结构年轻化更为显著，有 21 个省份平均年龄在 10-15 年之间。西藏、新疆和贵州等西北、西南省份近十年水泥行业快速发展，其产能平均服役时间小于 10 年。我国各个省份的机动车平均年龄都在 4-5 年左右，其中华南、华东和华中地区的省份平均年龄普遍较小，而西南和西北地区的省份普遍偏大，但是整体相较电力和工业部门省份间差异不大。省份间的能源基础设施平均年龄差异指示着排放惯性的差异，更为年轻的年龄结构可以作为碳排放到碳排放锁定效应的“放大器”（Tong et al., 2019），使得该省份显示出更强的锁定效应。

4.4.2 碳锁定演变及低碳转型挑战

过去三十年能源基础设施的迅速扩张和碳排放的大幅增长促进了我国碳排放锁定效应的显著增长：1990 年我国碳排放锁定效应约为 541 亿吨，而 2020 年已经达到 2890 亿吨（见图 4-51）。我国近三十年的碳排放锁定效应时间变化经历了三个典型阶段：缓慢增长期（1990-2000 年）、快速上升期（2000-2010 年）和平稳变化期（2010-2020 年）。1990-2000 年碳排放锁定效应年均增速接近 5%，2000 年总量达到 867 亿吨；新世纪前十年我国经济社会的蓬勃发展推动了碳排放锁定效应的激增，其年均增速达到 12%，2010 年总量接近 2700 亿吨；2010 年后随着碳排放增速和能源基础设施新建的放缓（Zheng et al., 2018; Guan et al., 2018），我国碳排放锁定效应在 2013 年达到峰值（约 3001 亿吨），之后在 2800-2900 亿吨左右维持相对稳定。

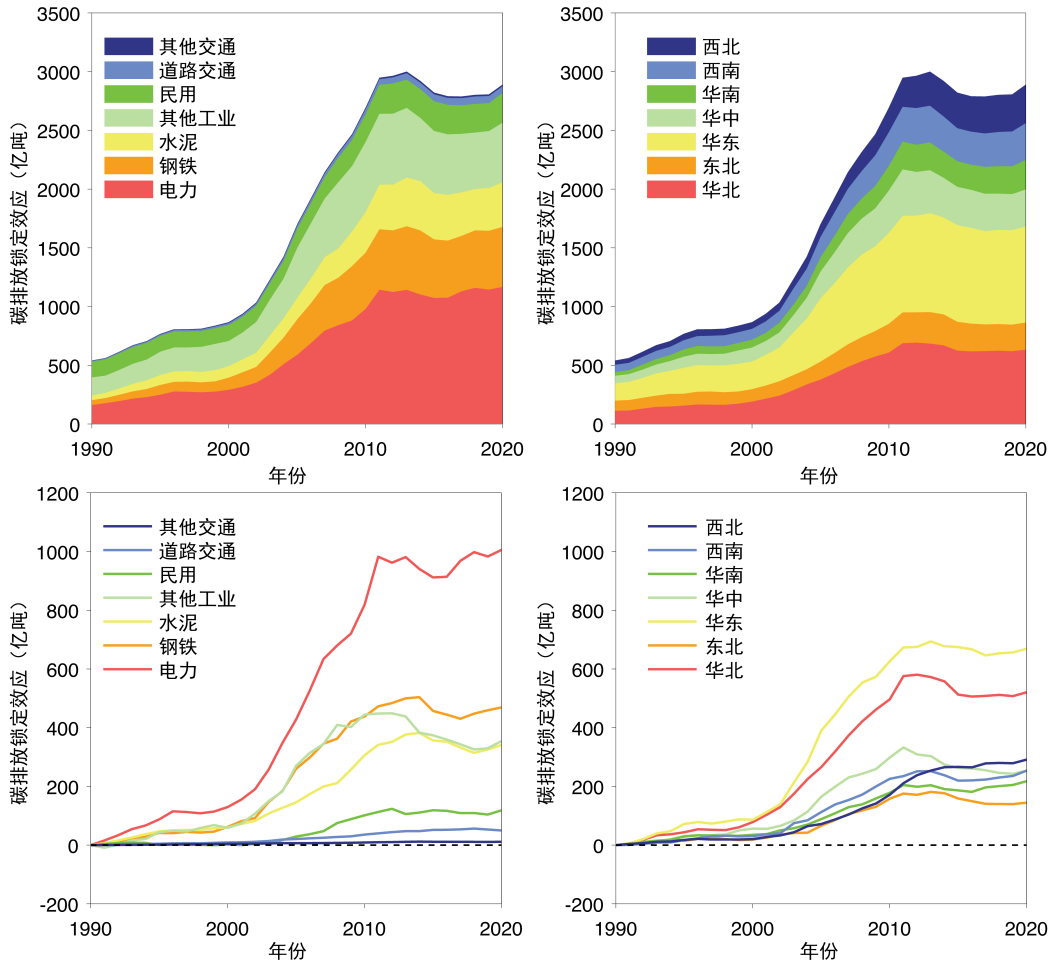

图 4-51 我国 1990-2020 年分部门和分地区碳排放锁定效应变化

我国城市化和工业化进程促进了用电需求和对基础工业产品（比如粗钢和水泥）需求的大幅上升，相应行业内的长寿命能源基础设施（如发电机组、高炉和水泥窑炉）大量新建（Liu et al., 2015; Tong et al., 2018; Liu et al., 2021; Wang et al., 2019），推动了相应行业碳排放锁定效应的增长。电力、钢铁、水泥和其他工业主导了近三十年我国碳排放锁定效应的变化趋势，合计贡献了超过 90%的碳排放锁定效应增量。电力能源基础设施 1990 年仅锁定了 162 亿吨碳排放，到 2010 年增长到接近 1000 亿吨，之后维持在 1100-1200 亿吨左右。钢铁行业的碳排放锁定效应以约 11%的年均增速增长，并于 2014 年达到峰值（545 亿吨）。随着 2015 年左右钢铁市场的整体低迷和近年来淘汰落后钢铁产能等行动的实施（Zheng et al., 2018; Zhang et al., 2019），钢铁行业的碳排放锁定效应在达到峰值之后略有下降，2020 年为 511 亿吨。水泥行业的碳排放锁定效应变化与钢铁行业相似，从 1990 年的 38 亿吨攀升到 2014 年左右达到峰值（420 亿吨）；之后

水泥行业碳排放总量相对稳定、产能新增有所放缓（Liu et al., 2021），其碳排放锁定效应有所下降，2020 年为 380 亿吨。1990-2020 年民用部门的碳排放锁定效应增速远低于电力和工业行业，仅为 2%左右，2020 年占碳排放锁定效应总量的 9%；道路交通和其他交通部门的碳排放锁定效应增速为 6-7%，但由于其能源基础设施服役寿命较短，锁定效应远远小于电力和工业行业能源基础设施，2020 年仅占碳排放锁定效应总量的 2%左右。

从地区角度看，1990-2020 年各个地区的碳排放锁定效应均显著增长，且多个地区经历了与全国一致的缓慢增长、快速上升和平稳变化的三个典型阶段。其中，1990-2020 年间华南和西北地区增速最快（超过 7%）；华北、华东、华中和西南地区紧随其后（6%左右）；东北地区增速最慢（3%）。作为经济社会发展最为迅速的地区，华东和华北地区一直是碳排放锁定效应贡献排名前二的地区（2020 年占比约 50%），同时是碳排放锁定效应增长的主要贡献者，合计贡献了全国 51%的碳排放锁定效应增量。经过近三十年的发展，其他几个地区 2020 年碳排放锁定效应差异相对较小，均在 230-330 亿吨之间。各地区近十年来的碳排放锁定效应变化有所差异：华东、东北、华北和华中地区均在 2010-2015 年间达到碳排放锁定效应的峰值，之后略有下降趋势，与这些经济社会发展较早的地区能源基础设施建设放缓相一致；华南和西南地区近十年碳排放锁定效应较为稳定，反映了这些地区逐年释放的锁定量与新建能源基础设施新增的锁定量之间的相对平衡；西北地区近十年碳排放锁定效应仍然持续增长，原因是其经济社会发展起步较晚，各类能源基础设施建设仍处于上升期。各地区碳排放锁定效应变化趋势的差异反映了社会经济发展和能源基础设施建设的时间差异性，即不同地区处于发展、稳定和转型的不同阶段，在一定程度上指示了不同地区气候治理难度的差异性（Tong et al., 2019）。

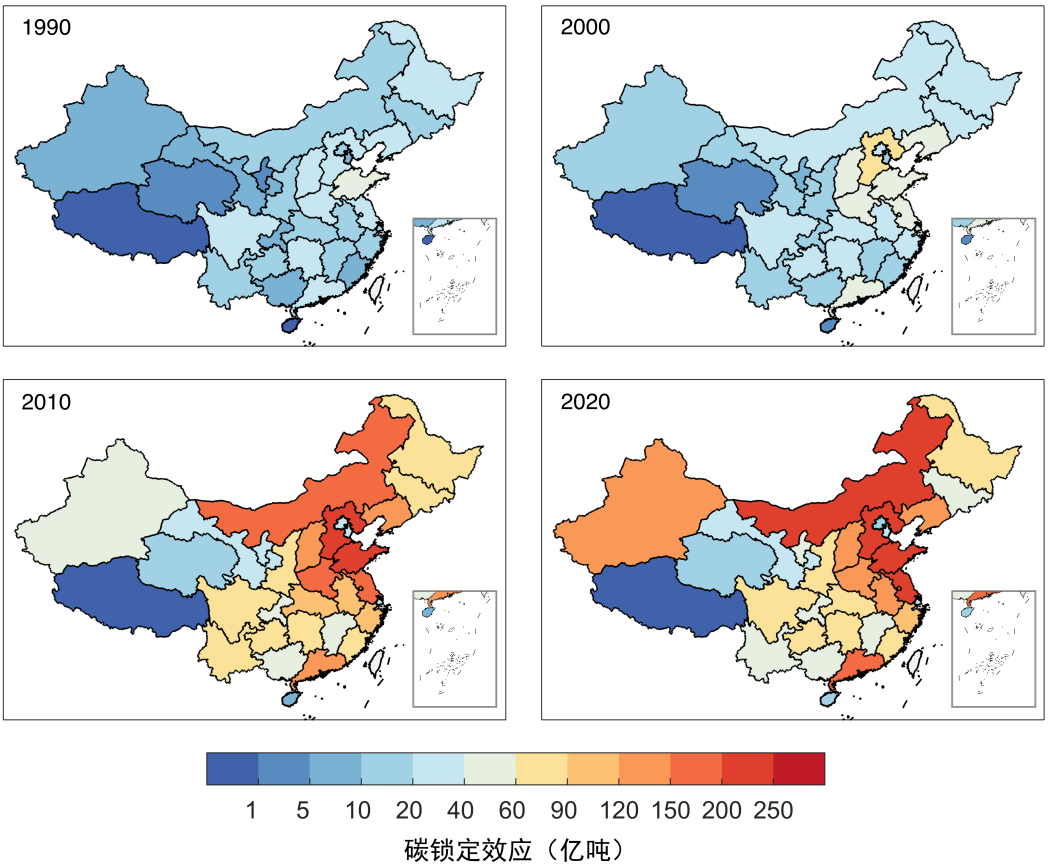

图 4-52 我国 1990、2000、2010 和 2020 年碳排放锁定效应分省空间分布

除了地区差异性，碳排放锁定效应在分省尺度上的差异同样值得关注。图 4-52 展示了 1990、2000、2010 和 2020 年碳排放锁定效应的分省空间分布情况。过去三十年，伴随着碳排放锁定效应总量的显著增长，我国碳排放锁定效应的空间分布也在不断变化。整体来看，华东和华北地区工业化和城市化起步较早的省份，如山东、河北和江苏一直是碳排放锁定效应的热点，而一些经济社会发展起步较晚的省份，如内蒙古和新疆则在某一时期迅速成长为新的碳排放锁定效应热点。

1990 年华东、华北和东北地区的省份是碳排放锁定效应的热点，合计贡献了全国碳排放锁定效应的 60%以上（约 350 亿吨），其中山东、辽宁和河北贡献最大，碳排放锁定效应均为 40 亿吨左右。在这些地区以外，河南、四川和广东的碳排放锁定效应也位居前十。整体来看，1990 年碳排放锁定效应贡献较大的

省份普遍工业化和城市化起步较早，在当时相较于其他地区能源基础设施建设更为活跃。

2000 年左右华东和华北地区的省份仍然是碳排放锁定效应的热点，共占全国碳排放锁定效应的约 50%（约 430 亿吨）。其中河北、江苏和山东成为了碳排放锁定效应量前三的省份（共约 180 亿吨）。华东和华北地区作为政治、经济中心在九十年代持续的经济社会发展和能源基础设施建设支撑着其内部省份的碳排放锁定效应不断攀升。在这一阶段，华中地区的湖北和河南碳排放锁定效应增长迅速，2000 年位列碳排放锁定效应前十；同时，东北地区的主要碳排放锁定效应贡献者辽宁和黑龙江排名明显下降，主要原因是东北作为较早发展的工业地区，九十年代经济社会发展进入瓶颈期，能源基础设施建设放缓。因此，2000 年华中地区整体超过东北地区，成为碳排放锁定效应的第三大贡献区域（119 亿吨），其 1990-2000 年平均增速接近 7%，远高于东北地区（2%）。2000 年华南、西南和西北地区的省份碳排放锁定效应相较 1990 年均有显著增长，但是相比华东、华北地区的省份碳排放锁定效应贡献普遍较小。

在新世纪的前十年，我国经济社会发展日新月异，各省碳排放锁定效应也随之快速变化，但是到 2010 年碳排放锁定效应的整体空间分布相较 2000 年没有出现显著的热点转移。华东和华北地区的省份仍然是最重要的碳排放锁定效应贡献者，一共锁定了接近 1400 亿吨碳排放，与其他地区的差异更为显著。在 2010 年碳排放锁定效应排名前十的省份中，有 3 个位于华北地区（河北、内蒙古和山西），3 个位于华东地区（山东、江苏和浙江），其中河北和山东均锁定了超过 200 亿吨碳排放，位列前二。值得注意的是，主要由于电力能源基础设施的大量部署（Liu et al., 2015），2000-2010 年内蒙古的碳排放锁定效应年均增速达到 19%，2010 年其碳排放锁定效应激增至 161 亿吨，成为该时期最大的新兴碳排放锁定效应增长热点。在华东和华北地区以外，其他地区在 2000-2010 年间都有各自的主要碳排放锁定效应增长热点，如辽宁（年均增速 10%）、广东（12%）和四川（14%）等。

近十年全国碳排放锁定效应空间分布基本维持了 2010 年的格局。河北和山东稳居碳排放锁定效应贡献前二；内蒙古在近十年继续以电力行业发展推动碳排放锁定效应增长（中国电力企业联合会，2021），2020 年锁定超过 200 亿吨碳排放，超过江苏成为第三大贡献者。持续高速的社会经济发展促进广东跻身碳排放锁定效应贡献前五行列（169 亿吨），成为我国南方最重要的碳排放锁定效应热点。新疆成为了这一阶段新兴的碳排放锁定效应增长热点，其年均增速超过 10%，2020 年锁定了超过 140 亿吨碳排放。近十年来新疆电力和工业能源基础设施的大量新建是其碳排放锁定效应快速增长的主要原因。

电力行业是生产生活的支柱行业；钢铁和水泥行业是重要的基础工业行业；道路交通与城市化进程和人民物质生活需求密切相关。同时这些行业部门的碳排放强度较高，在 2020 年合计贡献了我国 70%左右的碳排放（Zheng et al., 2018; Global Infrastructure Emission Database）。因此，下面进一步从分省尺度上分别展示其碳排放锁定效应的变化。

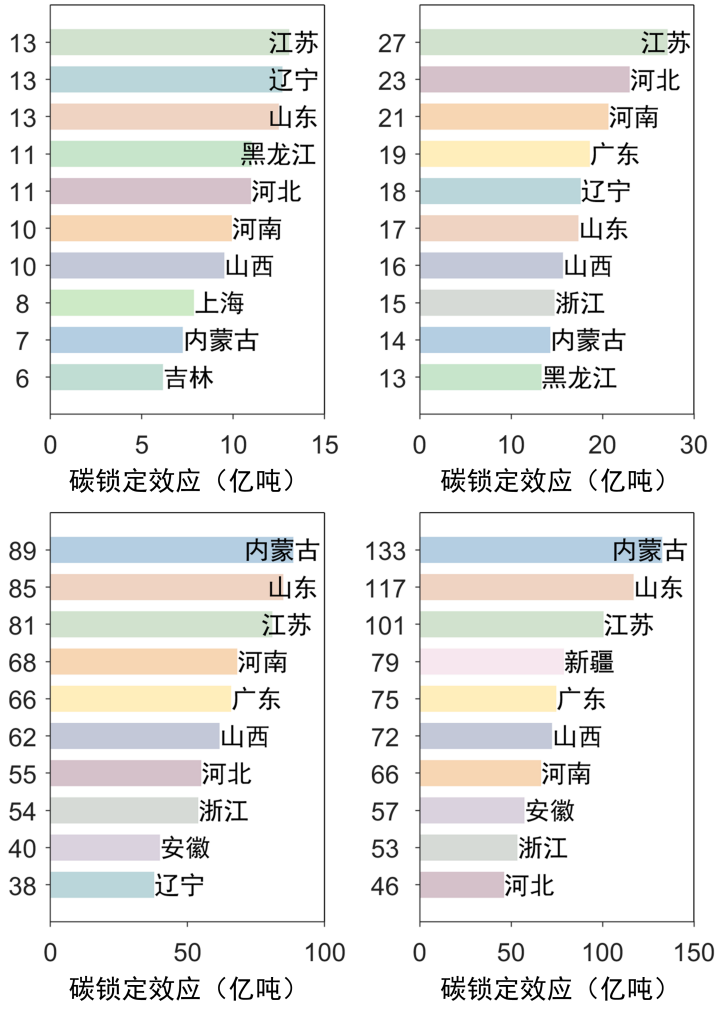

图 4-53 1990、2000、2010 和 2020 年我国电力行业碳排放锁定效应贡献前十的省份及其锁定量

图 4-53 展示了 1990-2020 年电力行业碳排放锁定效应排名前十的省份。经济发展和城市化较早的省份在 1990 年位居电力行业碳排放锁定效应前列，如江苏和辽宁等；到 2000 年河北、河南和广东等省份排名明显提升，东北地区的辽宁、黑龙江等明显下降，一定程度上反映了九十年不同地区的社会经济发展差异，如东北地区经济社会发展的放缓。2000 年后，依靠其自身资源优势，新建煤电设施的大规模部署和向外输电产业的蓬勃发展使内蒙古一跃成为了电力行业碳排放锁定效应的最大贡献者，并持续至今，在电力部门中本地生产和电力传输隐含的碳排放锁定效应转移值得关注。新疆在近十年也开始了电力能源基础设施的大量新增，2020 年其电力行业锁定了接近 80 亿吨碳排放。尽管如此，2020 年电力行业碳排放锁定效应排名前列的省份大多数仍处于中东部发达地区，这与其较大

的本地用电需求相一致。此外，近三十年江苏、山东等省份的电力行业碳排放锁定效应一直排名靠前，显示了其稳定而持续的电力能源基础设施发展情况。

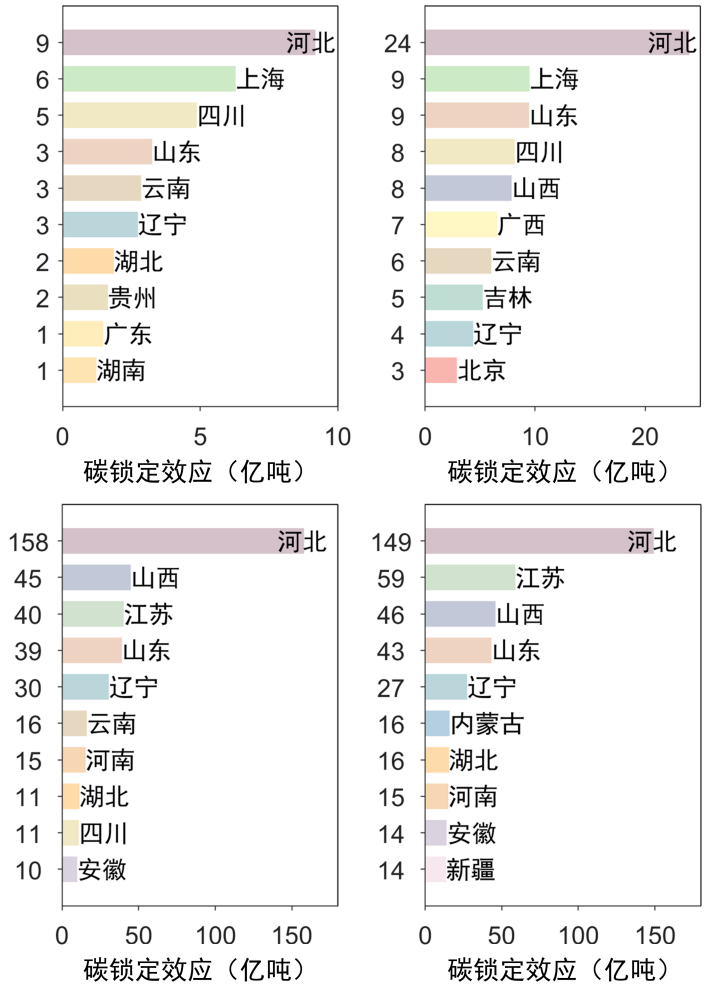

图 4-54 1990、2000、2010 和 2020 年我国钢铁行业碳排放锁定效应贡献前十的省份及其锁定量

与电力行业不同，河北在过去三十年间一直是钢铁行业碳排放锁定效应的最大贡献者，且在 2000 年后与其他省份差距越发显著，2020 年其贡献了钢铁行业接近 30%的碳排放锁定效应（图 4-54）。这反映了河北省内多个城市，如唐山、邯郸和秦皇岛等依托煤铁资源、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的发展进程。在 1990 和 2000 年，由于钢铁企业数量还未出现快速扩张，拥有大规模老牌钢铁企业的省份钢铁生产和相关能源基础设施建设较为活跃，碳排放锁定效应排名靠前，如上海（宝钢所在地）、山

东（济钢所在地）和四川（攀钢所在地）等。2000 年后我国钢铁行业快速扩张，江苏和山西等省份的钢铁能源基础设施增长显著，其碳排放锁定效应排名明显提升。与电力行业相似，2010 年后内蒙古和新疆等地的新增钢铁产能部署使其碳排放锁定效应跻身前十。整体来看，钢铁行业的碳排放锁定效应集中度较高。以 2020 年为例，排名前五的省份贡献了碳排放锁定效应的 64%（前十为 78%），与钢铁产能空间分布集中度较高的现状相一致。

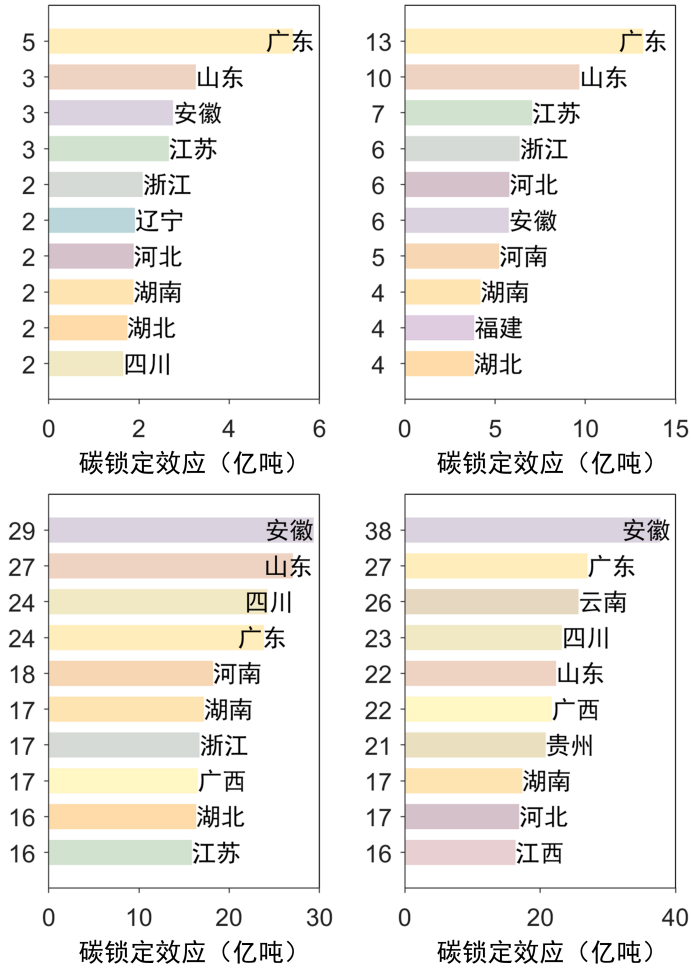

图 4-55 1990、2000、2010 和 2020 年我国水泥行业碳排放锁定效应贡献前十的省份及其锁定量

对水泥行业而言，1990-2000 年碳排放锁定效应贡献排名前列的省份较为稳定，主要是中东部经济社会发展起步较早的省份，如广东、山东和江苏等，其建筑行业等发展催生的本地需求促进了水泥行业的生产和能源基础设施建设。2000 年后安徽依托自身石灰石资源和长江水系运输，快速发展水泥产业和相关能源基

础设施建设（Liu et al., 2021），成为了水泥行业最大的碳排放锁定效应贡献者，在 2010 和 2020 年均贡献了水泥行业碳排放锁定效应的 9-10%。西南地区的省份在 2000 年之后也显示出强劲的碳排放锁定效应增长势头：到 2010 年四川锁定了 24 亿吨碳排放，跻身前三；而到 2020 年，云南和贵州也进入了前十行列，且云南已跃居前三行列。2020 年，云南、四川和贵州合计贡献了 70 亿吨碳排放锁定效应，占水泥行业碳排放锁定效应的 18%。此外，广西也是重要的碳排放锁定效应增长热点，其在 2000 年后增速达到 16%。整体来看，水泥行业的碳排放锁定效应集中度低于钢铁行业，2020 年前五的省份贡献了大约 35%的碳排放锁定效应（前十为 60%），与水泥行业空间分布集中度较低的特征相一致。

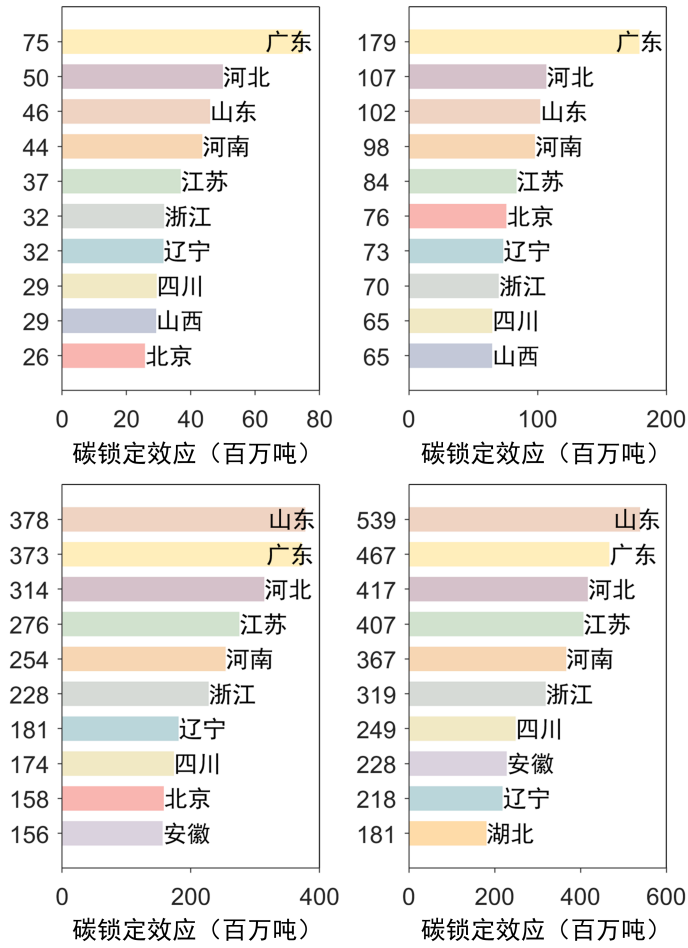

图 4-56 1990、2000、2010 和 2020 年我国道路交通碳排放锁定效应贡献前十的省份及其锁定量

不同于工业行业发展在空间上受到资源禀赋等的限制，道路交通能源基础设施的发展主要与经济发展水平、人民出行需求和道路系统建设等因素有关。因此，近三十年道路交通碳排放锁定效应排名前列的大多是中东部发达省份。1990-2000 年广东、河北、山东、河南和江苏稳居前五；到 2010 年山东成为了道路交通碳排放锁定效应的最大贡献者并持续至今。整体上看，道路交通碳排放锁定效应排名前列的省份较为稳定，反映出经济发展和出行需求增长的稳定性和持续性。

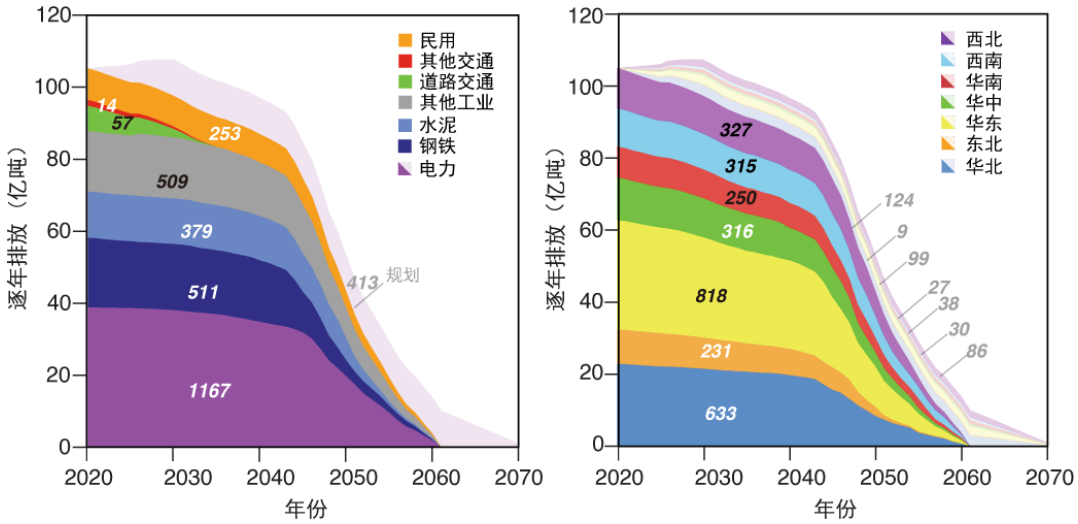

图 4-57 我国现有和已规划能源基础设施分部门和分地区未来逐年碳排放变化

经过近三十年的快速发展，我国现有能源基础设施体量庞大，锁定效应显著。图 4-57 展示了 2020 年现有和已规划能源基础设施在 40 年服役寿命条件下的未来碳排放变化情况。我国现有能源基础设施锁定了约 2890 亿吨碳排放，进一步考虑已规划煤电机组的碳排放锁定效应则总计超过 3300 亿吨。其中，电力、钢铁、水泥和其他工业贡献了接近 90%的碳排放锁定效应。从区域角度看，华东和华北地区的现有能源基础设施锁定了 1451 亿吨碳排放，贡献远超其他地区，同时这两个地区合计贡献了已规划煤电机组碳排放锁定效应的 54%。其他地区的碳排放锁定效应均在 230-330 亿吨之间。

我国现有能源基础设施未来碳排放的衰减趋势显示出较强的排放惯性和锁定效应。由于电力和工业行业中长寿命能源基础设施高度年轻化，其碳排放直到 2045 年左右才会开始明显衰减。这意味着现有长寿命能源基础设施可能会对我

们未来中短期气候治理产生持续影响。相比之下，交通部门的能源基础设施服役寿命较短，其排放在 2030 年左右就开始快速衰减，排放惯性和气候威胁小于电力和工业行业的能源基础设施。要缓解现有能源基础设施的巨大排放惯性，必须合理规划和控制化石能源基础设施的新建，必要时停止部分新建，并有序淘汰落后和老旧的化石能源基础设施，同时推动非化石能源基础设施建设以满足各方面的需求。

4.4.3 落后产能淘汰及其碳锁定解除

自 2013 年起，随着《大气污染防治行动计划》和《打赢蓝天保卫战三年行动计划》的顺利推行和实施，我国在电力和多个工业行业开展了大规模的落后产能淘汰工作，成为推动能源和产业结构调整的重要举措之一（见表 4-5）。2013-2020 年我国落后产能淘汰的工作成效显著：共淘汰治理无望的小型燃煤锅炉 31 多万台，重点区域每小时 35 蒸吨以下燃煤锅炉基本清零；淘汰落后产能和化解过剩产能钢铁 3.2 亿多吨、水泥 3.9 亿吨、平板玻璃 1.6 亿重量箱、煤电机组 45 吉瓦；清理整顿全国涉气“散乱污”企业 42 万余家（Zheng et al., 2018; Zhang et al., 2019; CCAPP, 2021）。落后产能淘汰行动主要针对高污染物排放部门，但其通常也是高碳排放部门（如煤电、钢铁和水泥），淘汰的落后能源基础设施通常还有产能小、能耗高的特点。因此综合来看，落后产能淘汰对气候治理也起到一定的积极作用。

表 4-5 2013-2020 年我国落后产能淘汰情况

	2013-2020 年
“散乱污”企业（个）	422000
落后煤电装机容量（吉瓦）	45
落后钢铁产能（百万吨）	320
落后水泥产能（百万吨）	390

落后平板玻璃产能（百万重量箱）	160
小型锅炉（个）	310000

根据从重点行业点源数据库得到的落后能源基础设施淘汰年龄和排放强度估算，2013-2020 年煤电、钢铁和水泥行业落后产能淘汰分别解除约 36、115 和 37 亿吨碳锁定量，其总量约为 2020 年我国锁定的碳排放总量的 6%。如果考虑其他工业部门和小型锅炉等的产能淘汰，解除碳锁定的总量将会更大。整体来看落后产能淘汰对减缓我国能源基础设施的锁定效应有显著的积极作用，体现了我国清洁空气政策和气候治理的协同效益（Cheng et al., 2021）。尽管如此，落后和老旧能源基础设施淘汰对气候治理而言远远不够，还应该严格控制新建化石能源基础设施的体量，推进能源消费的结构性转型和低碳甚至零碳技术（如 CCUS）的大规模应用。

此外，一些行业（如钢铁）中部分的落后产能淘汰以产能置换的形式进行，即在淘汰一定量落后产能的同时，允许新建一定量技术新、能效高的设施，且通常要求新建产能不得大于淘汰产能。从污染治理角度考虑，新建的能源基础设施技术先进且配备完善的末端控制系统，可以大幅减少污染物排放，对空气质量的改善有利（Zheng et al., 2018; Zhang et al., 2019; Bo et al., 2021）；从碳排放角度考虑，其能耗降低，单位碳排放明显低于落后设备，对减少碳排放同样有利。但是从碳排放锁定效应的角度考虑，尽管新建设施的单年碳排放很可能降低，其剩余服役时间却远高于被淘汰设备，因此产能置换可能导致碳排放锁定效应不减反增。如果在未来气候治理的驱动下需要对新建设施进行提前退役，或将带来更大的资本搁浅（Pfeiffer et al., 2018）。未来 CCUS 等技术的发展和应用可能使这个问题迎刃而解，但是现在仍应该警惕产能置换潜在的碳锁定风险和气候压力，更为合理的平衡能源基础设施的退役和新建过程。

4.4.4 解除“碳锁定”：迈向碳中和

在 2015 年 NDC 目标的基础上，我国进一步强化了自身气候目标，提出碳排放力争于 2030 年前达峰，争取于 2060 年前实现碳中和的“双碳目标”。这为我国

气候治理注入了全新动力，同时也给我国能源基础设施发展和规划带来了新的挑战。

考虑到长寿命能源基础设施 40 年左右的服役寿命，绝大部分现有能源基础设施将在 2060 年前实现自然退役，因此不会对碳中和目标产生直接影响，但是仍然可能影响我国中短期气候治理。由于排放惯性巨大，在自然退役条件下，2030 年左右我国现有能源基础设施的单年排放相较 2020 年仅仅减少约 8%，仍有 97 亿吨左右。如果我国要实现高质量碳达峰或者说“达低峰”，现有能源基础设施剩余的碳排放可能影响 “峰值”的高低和达峰的质量。因此，在保证社会经济稳步发展的前提下，应该坚持优化能源基础设施结构，淘汰落后老旧和高耗低效设施，缓解锁定效应，以助力我国实现高质量的碳达峰。

尽管现有能源基础设施可能影响中短期气候治理，对碳中和实现的影响较小，未来十年内新建的能源基础设施在自然退役条件下可以运行到 2060 年，可能威胁我国的长期气候目标。因此，实现碳达峰之前的“十四五”和“十五五”时期的能源基础设施建设对实现碳中和目标同样关键。根据历史能源基础设施数据估算，如果煤电、钢铁和水泥行业在未来十年仍然保持 2010-2020 年的平均新建速率，三个重点行业新建的能源基础设施在 2030 年后单年排放合计将达到接近 30 亿吨；尽管 2015 年后新建速率有所放缓，如果保持 2015-2020 年平均新建速率，2030 年后单年排放合计仍将有 22 亿吨左右。已有研究对我国碳汇的估计范围为 4-40 亿吨（Piao et al., 2009; Jiang et al., 2016; Fang et al., 2018; Friedlingstein et al., 2019; Wang et al., 2020）。因此在不考虑 CCS 等低碳技术应用的情况下，无论是保持近十年或近五年的平均新建速率，未来十年内三个行业的新建能源基础设施运行到 2060 年，其排放都可能威胁碳中和目标，凸显了新建长寿命能源基础设施的长期气候影响。如果考虑其他工业行业等的能源基础设施扩张，则威胁可能进一步加剧。

如果新建能源基础设施在未来严重威胁了我国气候目标，则需要开展设施提前退役或者对其应用 CCS 等低碳技术。一方面，能源基础设施提前退役可能导致大量搁浅资本和潜在的经济社会问题（Pfeiffer et al., 2018），如工厂被迫关闭

导致的人员安置问题；另一方面，CCS 等低碳技术目前仍不成熟，其商业化进程存在较多不确定性，包括运行成本和碳封存的地理空间限制等（Irlam, 2017; Wei et al., 2021）。因此，为了避免对我国气候目标的严重威胁和潜在的经济损失，必须严格限制高碳能源基础设施扩张，停止不必要的新建活动，加快低碳转型进度。

在解除碳锁定效应的过程中，还应该在分省、分行业的精细尺度进行政策规划，以追踪和协调省际尺度、行业尺度的碳锁定效应变化关系。例如，中国东部的基建大省和重工业大省需要基于需求预测等合理规划设施新建和淘汰，细致考虑部分能源生产和产品生产的转移；西部省份虽然发展较晚，但新疆等省份碳锁定效应增长势头较强，应当争取利用当地丰富的风光资源等推动低碳转型实现碳锁定效应解除；还可规划、平衡新能源在不同省份本地消纳和外部输送的关系，合理引导产业迁移和转型，从全局出发在满足经济社会需求的前提下，减缓化石能源基础设施的碳锁定效应。如何在分省、分行业尺度给出精细化具体政策导向是关键挑战。

尽管能源基础设施发展面临着巨大挑战，诸多积极信号为我国低碳转型注入了信心和力量：2020 年非化石能源在我国一次能源消费中的占比已经接近 16%，相较 2000 年增加超过一倍（国家统计局，2021），并计划在 2030 年达到 25%（新华社，2020）；太阳能和风能发电蓬勃发展，非化石能源发电装机容量占比已经超过 40%（中国电力企业联合会，2021），并计划在 2030 年太阳能和风能发电总装机容量达到 12 亿千瓦以上（新华社，2020）。这些无不显示了我国方兴未艾的低碳转型过程和迈向碳中和的努力。在未来，我国应该增加对 CCS 等低碳技术的投资，加大相关研发力度，并在地理条件和资源禀赋各异的广阔疆域内对这些技术的适用性、有效性和经济性进行广泛的测试和评估，以为其大规模应用做好充分的准备。解除“碳锁定”、实现能源基础设施发展的低碳转型是实现碳中和道路上的巨大挑战，但同时也是我国技术、经济和社会快速发展和实现系统性变革的重大机遇，展现了我国参与全球气候治理、构建人类命运共同体的大国担当。

4.5 “一带一路”沿线国家能源基础设施碳排放锁定效应与绿色共建机遇

4.5.1 “一带一路”沿线国家发展概况

2013 年秋，中国国家主席习近平提出建设“新丝绸之路经济带”和“21 世纪海上丝绸之路”的合作倡议，“一带一路”（The Belt and Road Initiative，简称 B&R Initiative）正式启动。“一带一路”旨在借用古代丝绸之路的历史符号，高举和平发展的旗帜，积极发展与沿线国家的经济合作伙伴关系，共同打造政治互信、经济融合、文化包容的利益共同体、命运共同体和责任共同体。截至 2022 年 12 月，中国已与 150 个国家、32 个国际组织签署 200 余份共建“一带一路”合作文件，国际合作架构已初步搭建（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），“一带一路”框架下的合作发展方兴未艾。通过对接与耦合沿线各国发展战略、发掘区域性市场潜力、促进投资和消费、创造需求和就业，“一带一路”合作倡议必将促进沿线各国多元、自主、平衡的经济社会发展，创造互利共赢的区域发展新模式。

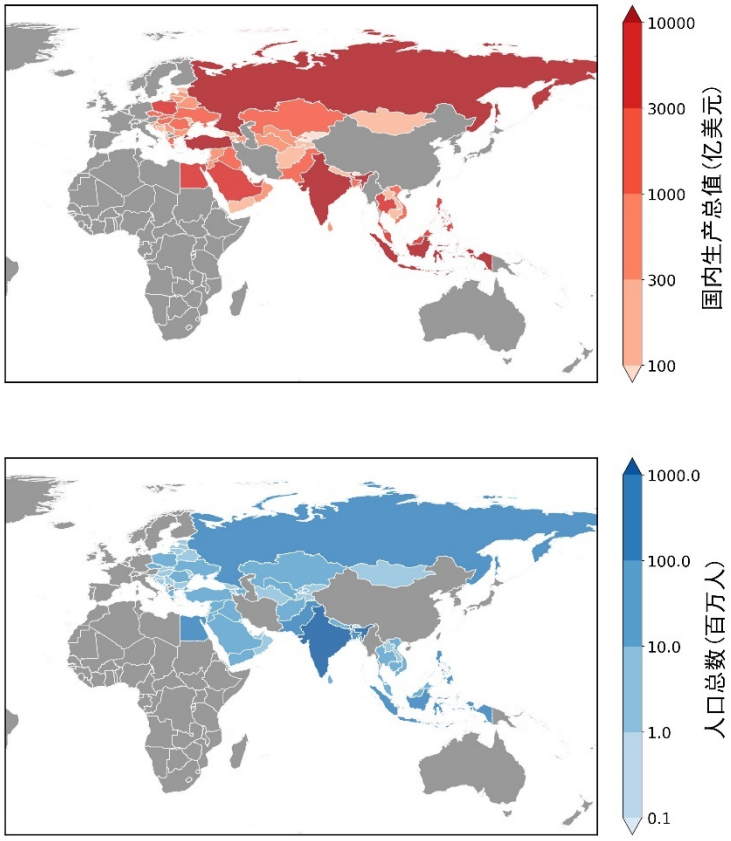

图 4-58 2021 年“一带一路”沿线国家国内生产总值和人口分布

“一带一路”沿线国家多为新兴经济体，人口总数约 34 亿，占全球总人口约 44%，而国内生产总值（GDP）仅占全球约 18%（图 4-58），经济社会发展空间巨大。随着大多沿线国家开启经济社会快速发展的阶段，能源需求和产品需求将激增，人民对物质生活的要求亦将不断提升，必然推动其电力、工业和交通等部门能源基础设施的建设发展。在《巴黎协定》气候目标和全球气候治理背景下，“一带一路”沿线国家发展路径是否“低碳”、是否可持续备受关注。众所周知，西方发达国家在其上世纪发展历程中经历了大肆使用化石能源的高碳阶段，这种“先发展后减碳、先高碳再低碳”的发展路径加剧了全球气候问题的紧迫性。“一带一路”沿线国家如此庞大的区域性经济体如果沿袭发达国家的高碳发展路径，必将导致大量化石能源基础设施新建和温室气体释放，加剧碳锁定效应，为全球气候目标实现带来巨大冲击。因此，理解“一带一路”沿线国家能源基础设施历史发展规律、追踪其最新变化发展对全球气候治理具有重要意义；量化其碳排放

和碳锁定效应，并基于此探索兼顾经济发展和气候影响的发展路径，是实现“一带一路”绿色共建的关键。

表 4-6 “一带一路”沿线国家列表

国家	
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
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

在这一背景下，本小节依托 GID 数据库中超过十万个能源基础设施信息，从理解“一带一路”沿线国家电力、钢铁、水泥和道路交通等重点行业能源基础设施历史发展出发，量化和分析其碳排放演变，追踪其能源基础设施的最新碳锁定效应，以深入认识潜在气候威胁；基于上述量化结果，进一步识别“一带一路”绿色共建的挑战和机遇，提出相应政策建议和治理思路，为推动区域性化石能源低碳转型贡献中国智慧。本小节所覆盖的“一带一路”沿线国家如表 4-6 所示。

4.5.2 主要能源基础设施发展情况

4.5.2.1 电力行业

近三十年来“一带一路”沿线国家火电行业总体发展迅速，火电厂总装机容量量从 1990 年的 503 吉瓦增加到 2021 年的 1327 吉瓦，年均增速为 3.2%（见图 4-59），略高于同一时间段全球火电厂装机容量的年均增速（2.9%）。进入二十

一世纪后，“一带一路”沿线国家火电行业规模扩张速度略有放缓，装机容量年平均增速下降至 2.1%。

“一带一路”沿线国家火电能源基础设施发展速度在区域层面上存在明显差异。上世纪九十年代，分布在东欧和俄罗斯地区的“一带一路”沿线国家火电行业规模占据了主导地位，其装机容量占“一带一路”沿线国家火电厂总装机容量的 38.6%。由于新型经济体在近年来迅速崛起，社会经济发展和电力需求攀升推动了分布在亚洲、中东和非洲地区的“一带一路”沿线国家火电基础设施的快速扩张，而分布在东欧和俄罗斯地区的“一带一路”沿线国家火电厂装机容量增长幅度相对较小。当前。“一带一路”沿线国家火电行业的重心已经逐渐转移到亚洲、中东和非洲地区，这些国家在 2021 年合计贡献了“一带一路”沿线国家火电行业总装机容量的 70%。

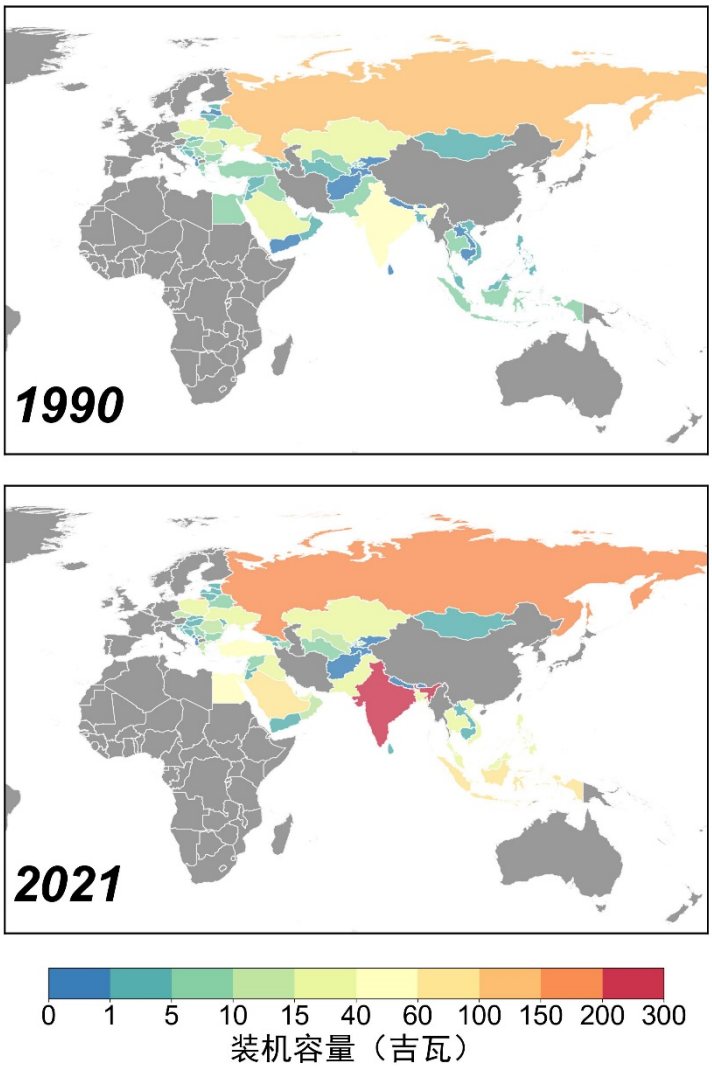

图 4-59 1990 和 2020 年“一带一路”沿线国家火电装机容量空间分布

进入二十一世纪后，“一带一路”沿线国家火电行业新建装机容量总体呈线波动增长的趋势（见图 4-60）。自 2013 年起，随着“一带一路”建设对沿线国家经济带动作用的持续增强，沿线国家火电能源基础设施新建装机容量占全球火电新建装机容量的比例在 40%左右，成为了全球火电行业建设的主要驱动力。在新冠疫情的影响下，2020 年“一带一路”沿线国家火电行业新建步伐有所停滞，新建装机容量下降至 14.8 吉瓦，仅占全球新建装机容量的 17.4%。但随着复工复产的推进，“一带一路”沿线国家火电能源基础设施建设在后疫情时期有所回暖，新建装机容量反弹至 28.3 吉瓦，全球占比为 36.9%。

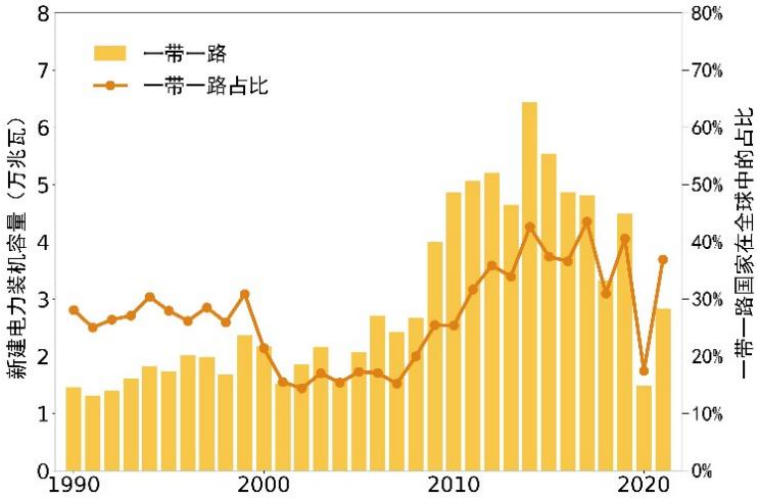

图 4-60 1990-2021 年“一带一路”沿线国家火电新建装机容量

图 4-61 展示了“一带一路”沿线各国在 1990、2021 年火电行业装机容量以及 1990-2021 年间火电装机容量增速排名前 10 的国家。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 2021 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 286 吉瓦、181 吉瓦和 91 吉瓦。1990-2021 年，“一带一路”沿线国家中火电行业装机容量增速最大的是老挝，超过 20%，其次是柬埔寨和越南，分别为 15%和 10%。增长速度最快的十个一带一路沿线国家有 70%分布在南亚及东南亚，30%分布在中东。以老挝为例，作为中国-东盟电力互联互通和“一带一路”的重要支点，老挝

在 2015 年前后提出了建立东盟“能源基地”和中南半岛“蓄电池”规划，并大规模推动水电和火电能源基础设施的建设，实现跨越式发展。当前“一带一路”沿线国家中仍有部分地区的电力基础设施建设相对薄弱，电力需求增长空间潜力巨大，其火电行业发展方兴未艾。

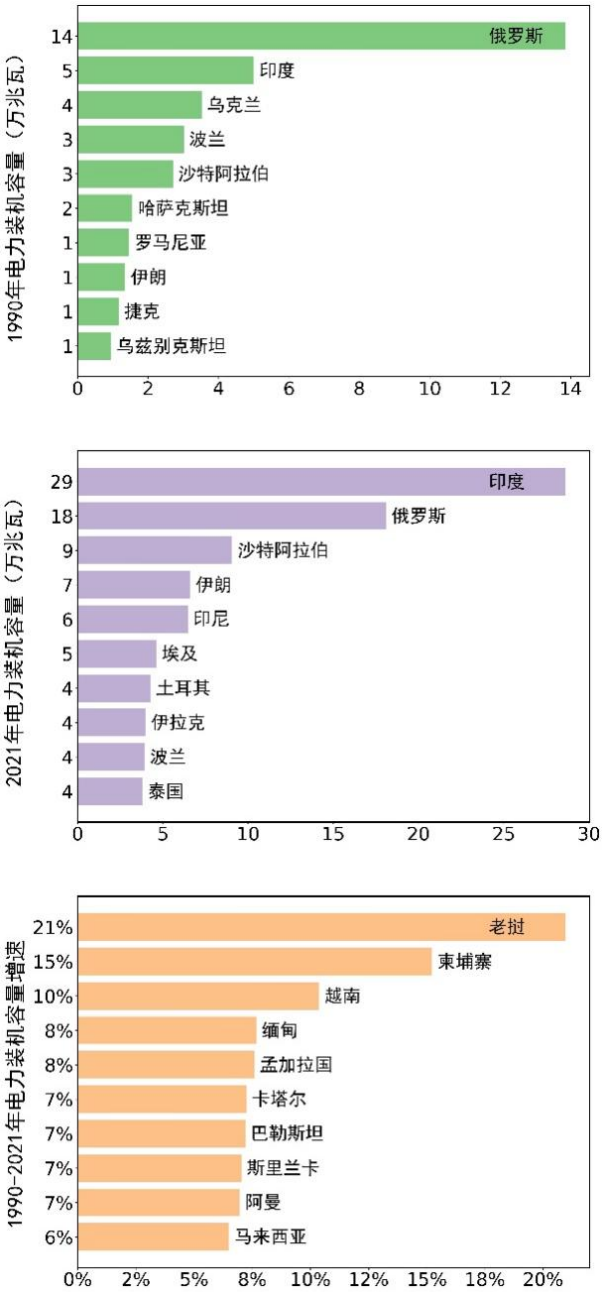

图 4-61 1990、2021 年“一带一路”沿线各国火电行业装机容量及 1990-2021 年间火电装机容量增速排名前 10 的国家

随着光伏和风电产业技术进步和成本大幅降低，“一带一路”沿线国家的可再生能源发展也有不俗表现（IRENA, 2021）。2010-2021 年间，“一带一路”沿线国家新增光伏和风电装机容量增长迅速，年均增速分别达到 43.1% 和 13.6%（见图 4-62）。2021 年，“一带一路”沿线国家占全球新增光伏装机容量的 14.2%、全球新增风电装机容量的 10.0%，新增装机容量为 19.5 吉瓦、9.0 吉瓦。其中，印度 2021 年新增光伏装机容量为 10.3 吉瓦，是除中国、美国外新增光伏装机容量最大的国家。

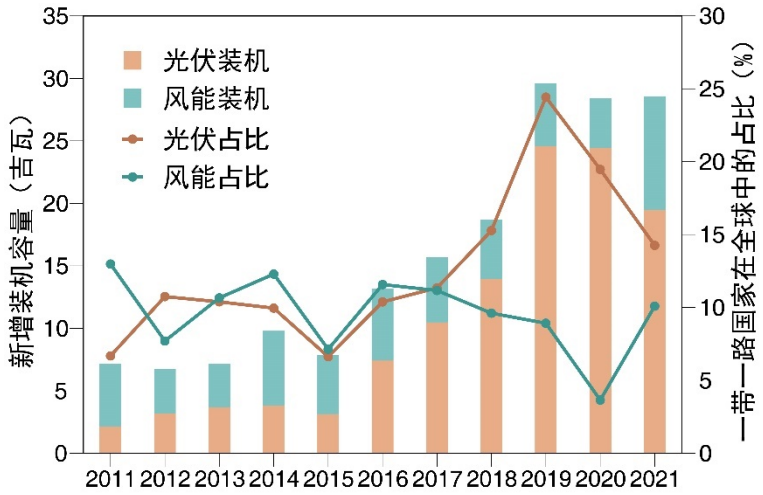

图 4-62 2011-2021 年“一带一路”沿线国家可再生发电新增装机容量

4.5.2.2 钢铁行业

“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，2021 年已达 6.0 亿吨，增幅达 72.5%（图 4-63）。2000-2021 年间，“一带一路”沿线国家钢铁产能扩张加速，年均增速为 3.2%，显著高于 1990-2021 年 2.5% 的年均增速。由于大部分新型经济体钢铁行业起步较晚，当前大部分“一带一路”沿线国家废钢资源有限，仍然高度依靠于煤铁资源发展长流程炼钢，粗钢产能中长流程炼钢接近三分之二。

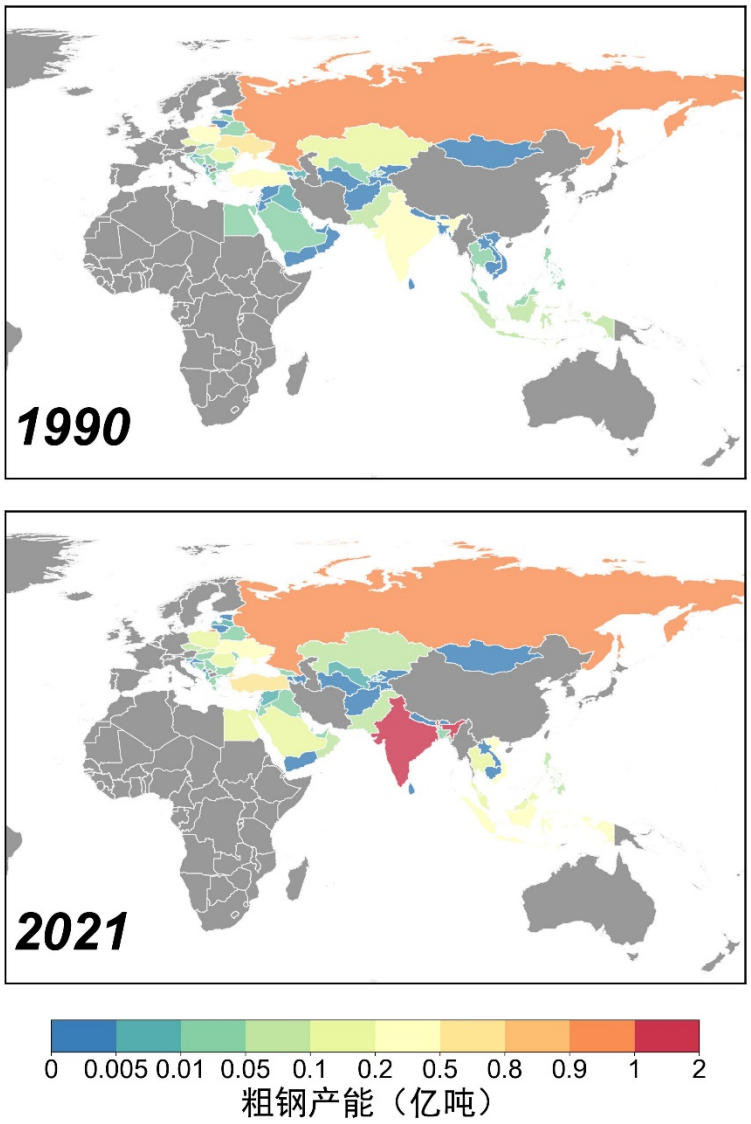

图 4-63 1990 和 2020 年“一带一路”沿线国家粗钢产能空间分布

1990-2021 年“一带一路”沿线国家钢铁行业新建产能总体上呈现波动上升的趋势，并在近十年成为了全球钢铁行业新建的主要驱动力。除 2018 年和 2019 年外，近十年来“一带一路”沿线国家钢铁行业年新建产能均超过了 0.2 亿吨，在全球钢铁行业总新建产能中的占比均高于 30%。尽管 2020 年遭受了新冠疫情的冲击，“一带一路”沿线国家钢铁行业基础设施并没有停下新建步伐，继续保持高速扩张的态势，新建产能较 2019 年增长 150%达到 0.37 亿吨，贡献了 2020 年全球钢铁行业新建产能的一半以上。

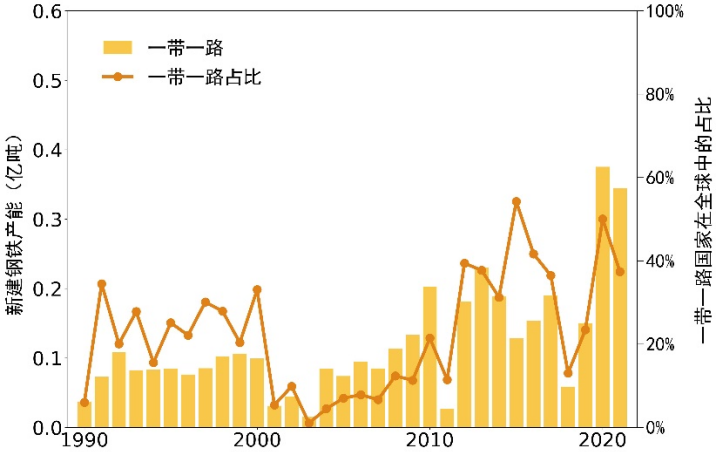

图 4-64 1990-2021 年“一带一路”沿线国家钢铁行业新建产能

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 4-65）。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。受到上世纪就是年代苏联解体等因素影响，分布在东欧+俄罗斯地区的“一带一路”沿线国家钢铁行业规模明显收缩，尽管之后有所恢复发展，但 2021 年产能规模仍不及 1990 年水平。而东南亚和中东多个新兴经济体随着经济社会发展拉动钢铁需求增长迅速，产能扩张显著。印度已经超越俄罗斯成为“一带一路”沿线国家中粗钢产能最大的国家，而伊朗、土耳其、印度尼西亚、越南、土耳其等分布在东南亚和中东地区的多个新兴经济体也成为了 2021 年“一带一路”沿线国家中粗钢产能排放前十的国家。

1990-2021 年，“一带一路”沿线国家中粗钢产能增速前三名分别为越南、阿联酋和伊朗，增速分别为超过 16%、15%、8%，其次是泰国和埃及。粗钢产能增长速度最快的十个“一带一路”沿线国家全部分布在南亚、东南亚和中东+非洲地区。尽管越南在 2014 年前后成为了东盟地区最大的钢材消费国，但由于面临工业薄弱和产能不足问题，越南钢材消费对外依存度极高。自 2016 年以来，越南政府加强了对进口钢材的贸易保护措施，并结合多种措施吸引大量投资，以推动该国钢铁行业的规模扩张。与越南类似，阿联酋在 2013 年前后通过征收进口钢材关税的手段刺激钢铁工业的发展，以满足房地产业和联邦铁路项目拉动的用钢需求。

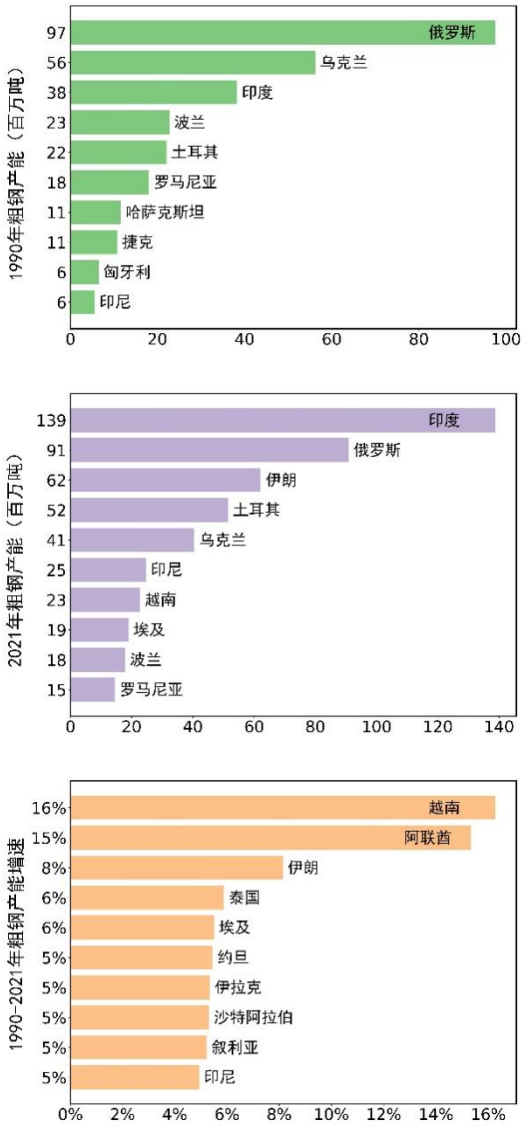

图 4-65 1990、2021 年“一带一路”沿线各国钢铁行业产能及 1990-2021 年间钢铁行业产能增速排名前 10 的国家

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，2010-2021 年间粗钢产能年均增速超过 4%，2021 年已接近 1.4 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 4-65）。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 4-66）。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。

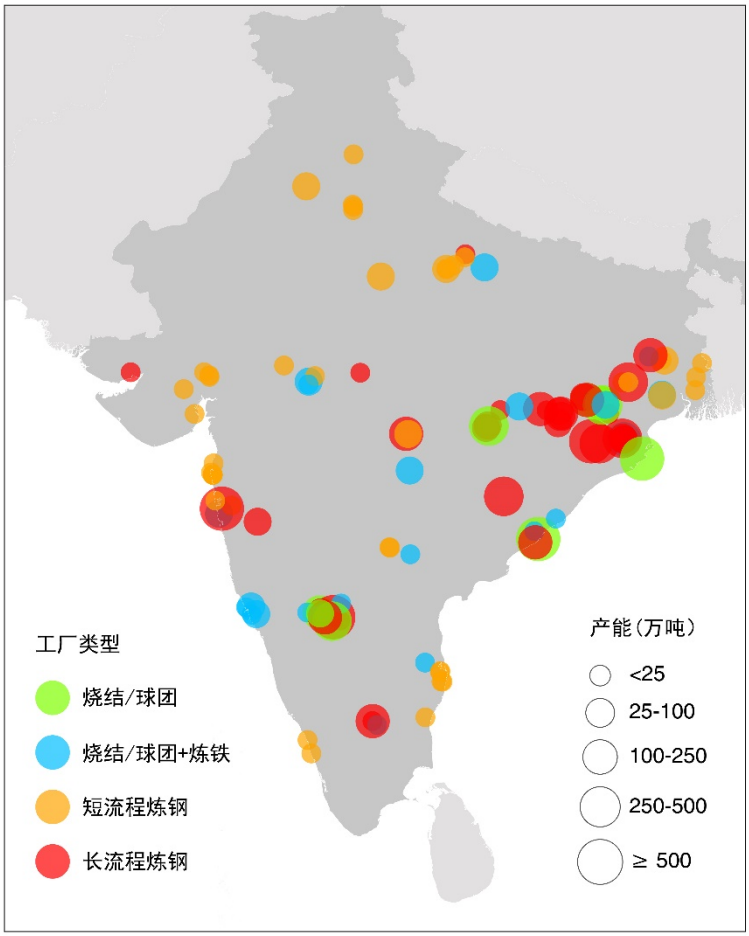

图 4-66 1990-2021 年印度新增钢铁产能分布

4.5.2.3 水泥行业

“一带一路”沿线国家在 1990-2021 年间水泥熟料产能持续增长，年均增速为 3%，到 2021 年“一带一路”沿线国家熟料总产能达 11 亿吨左右。由于近些年“一带一路”沿线国家城市化和现代化进程逐步深入，催生了大量水泥需求，推动其水泥熟料产能迅速扩张，2011-2021 年累计新建产能达 2.2 亿吨，产能十年内增长了 21%。在空间分布上，不同国家的熟料产能变化趋势存在差异。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 1990-2022 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 4-67）。

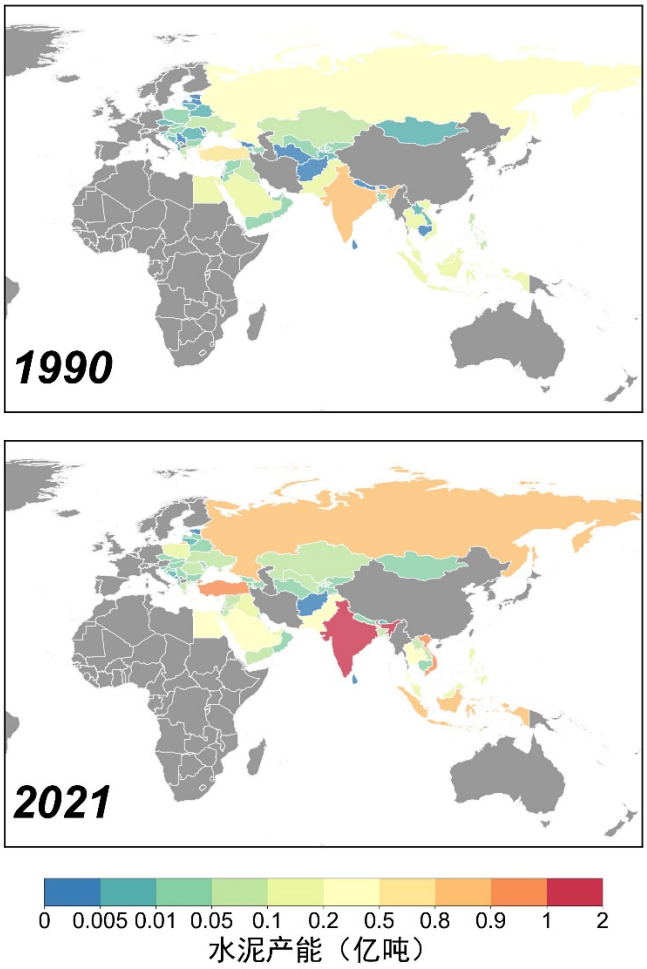

图 4-67 1990 和 2020 年“一带一路”沿线国家水泥产能空间分布

图 4-68 展示了 1990 年以来“一带一路”沿线国家水泥基础设施的建设情况。二十世纪九十年代，“一带一路”国家水泥基础设施建设在沿线发达国家的影响下新建产能呈波动增长状态，新建水泥产能从 1990 年的 0.06 亿吨增长至 1997 年达到上世纪九十年代的高峰，峰值为 0.39 亿吨。沿线新建产能在全球总新建产能中的占比也在 30%-50%左右波动。进入二十世纪后，全球其他国家中发展中国家等新兴经济体出现快速的经济增长，驱动了大量的水泥基础设施建设的新建需求，因此“一带一路”沿线国家在全球水泥新建产能中的占比出现明显下降，在 2010 年甚至低于 10%的占比。但这一时期“一带一路”沿线国家的水泥基础设施的建设仍然处于蓬勃发展的时期，新建水泥产能也呈现出更大幅度的增长，在

2009 年达到更高的峰值，超过 0.5 亿吨。之后随着“一带一路”对沿线国家经济带动作用的持续增强，其新建水泥基础设施在全球总新建产能中的占比波动上升，2019 年“一带一路沿线国家电力、钢铁和水泥新建产能占比分别增长至 36%、14%和 37%。而在 2020 和 2021 年由于新冠肺炎疫情的影响，“一带一路”沿线国家受到比其他发达国家更大的疫情冲击，水泥新建产能在全球总产能的占比出现明显下降，从 35%左右降到了 10%左右。水泥新建产能也从 2019 年的 0.17 亿吨下降至 2021 年的 0.07 亿吨，下降了近 60%。

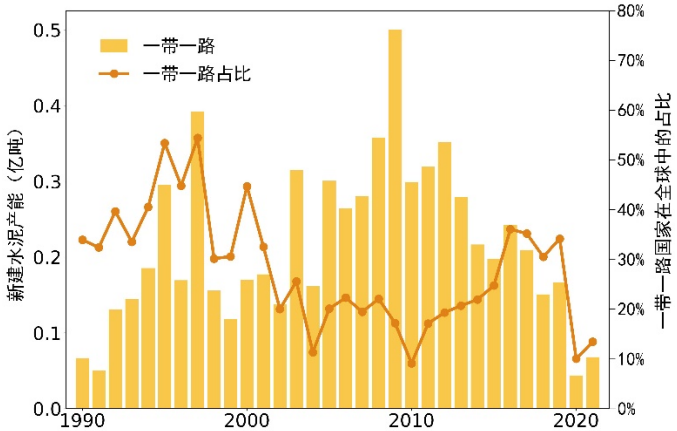

图 4-68 1990-2021 年“一带一路”沿线国家水泥行业新建产能

虽然“一带一路”沿线国家水泥能源基础设施的产能整体呈现增长趋势，但不同国家之间水泥行业发展差异明显（图 4-69）。印度始终保持较为稳定的水泥产能主导地位，其水泥基础设施产能远大于其他“一带一路”沿线国家。1990 年印度的水泥产能为 0.9 亿吨，紧随其后的是土耳其和俄罗斯，分别为 0.5 亿吨和 0.4 亿吨。2021 年印度的水泥产能增长至 2.8 亿吨，其次是土耳其和越南，均为 0.9 亿吨。2021 年“一带一路”沿线国家水泥产能前十位的国家总产能占到了“一带一路”沿线国家总产能的 80%，其中 60%来自于南亚和东南亚，30%来自于中东地区。这意味着在三十年间东南亚和中东多个新兴经济体随着经济社会发展水泥需求增长迅速，产能扩张显著，如越南、印度尼西亚、土耳其和伊朗等国，其产能年均增速达到 5%以上，与 1990 年相比在“一带一路”沿线国家水泥产能中的排序明显提升。在三十年间水泥产能增长最为迅速的国家是卡塔尔，增速达到 19%，但由于其水泥产能开发还不成熟，其 2021 年产能量仍然低于主要的水泥产能国。其次是罗马尼亚和老挝，产能增速分别为 9%和 8%。

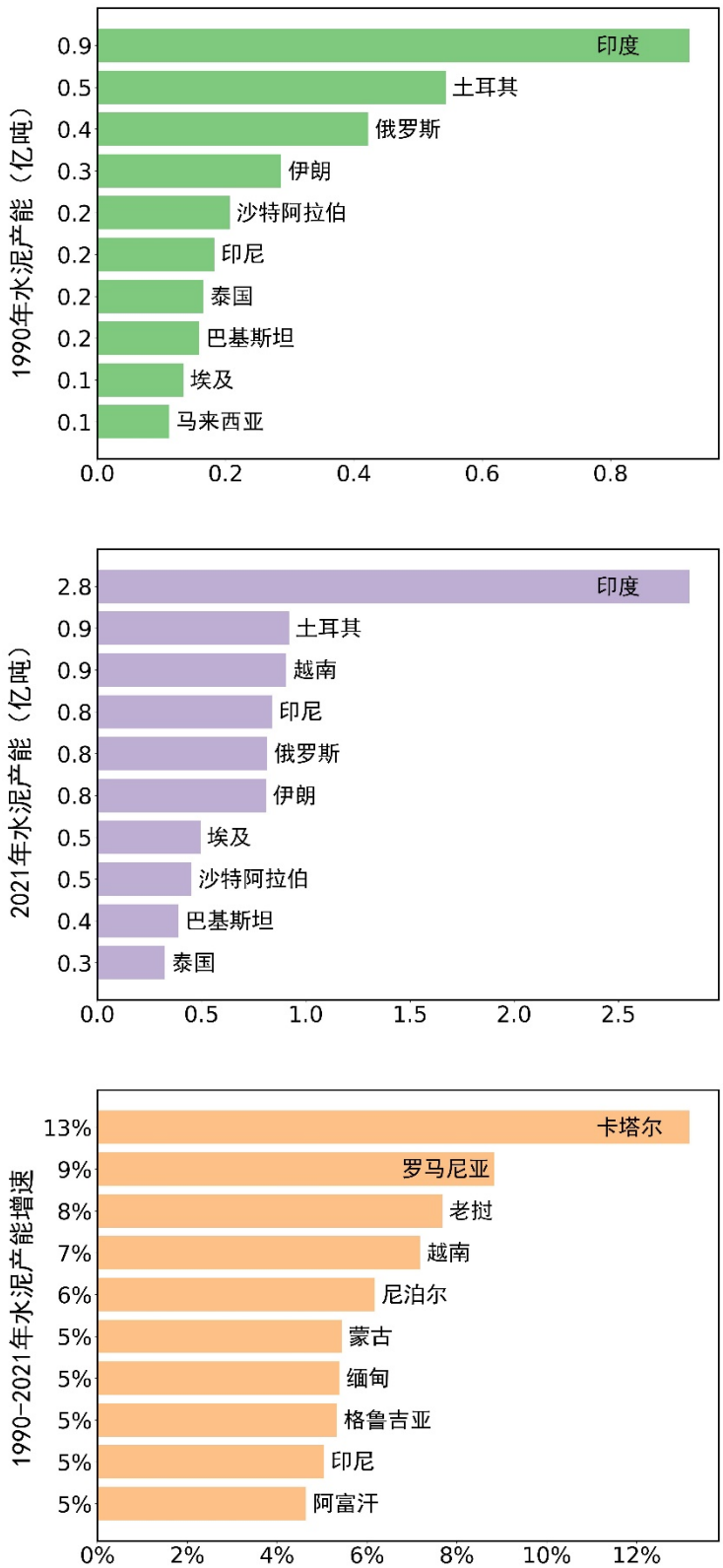

图 4-69 1990、2021 年“一带一路”沿线各国水泥行业产能及 1990-2021 年间水泥行业产能增速排名前 10 的国家

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 9 倍，2021 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，2016-2021 年年均熟料产能增速达 5%（图 4-70)。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)。

值得关注的是，当前越南水泥行业产能过剩的主要解决手段是扩大出口。中国是越南水泥和孰料产品的第一大出口市场，仅 2021 年上半年出口量近 1030 万吨，出口金额约 3.7 亿美元（中华人民共和国商务部，2021），其次为对菲律宾和孟加拉国的出口。但是，出口并不能根本解决越南水泥行业供过于求的产业现状。例如，当中国等出现基建放缓、水泥需求下降的情况，将可能显著影响越南水泥行业生产，降低其设备产能利用率甚至导致部分生产线停产，凸显其行业生产结构的弊端。长期来看，越南水泥行业发展仍需政府推动其供给侧结构性改革平衡本地需求和出口的关系，以解决过剩产能的问题。

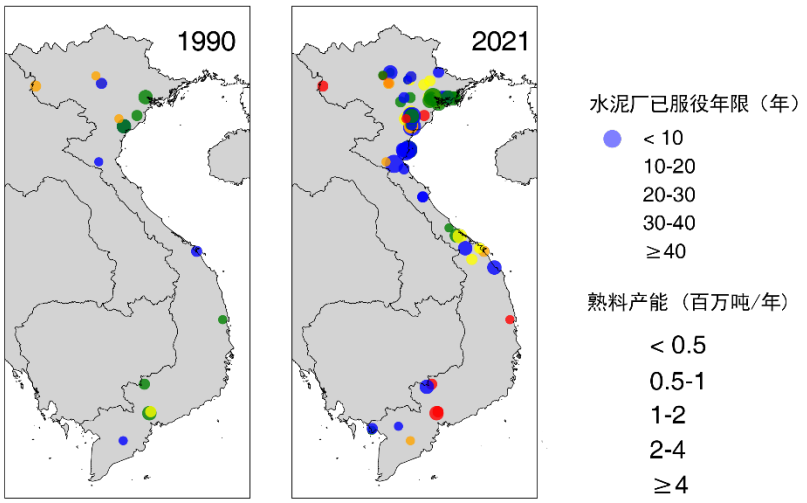

图 4-70 1990-2021 年越南新增熟料产能分布

4.5.2.4 道路交通

“一带一路”沿线国家在 1990-2021 年间道路交通也有较大的发展，车辆注册量逐年增长，年均增速为 4%，到 2021 年“一带一路”沿线国家的总车辆注册量达 3 亿辆左右。由于近些年“一带一路”沿线国家的经济快速发展，交通行业的需求也不断扩大，2011-2021 年累计新车注册量达 2.8 亿辆，注册量十年内增长了 18%。在空间分布上，不同国家的车辆注册量变化趋势存在差异。中东和亚洲地区的越南、印度、印度尼西亚等国车辆注册量增长尤为迅速；而东欧国家近三十年车辆注册量保持稳定（图 4-71）。

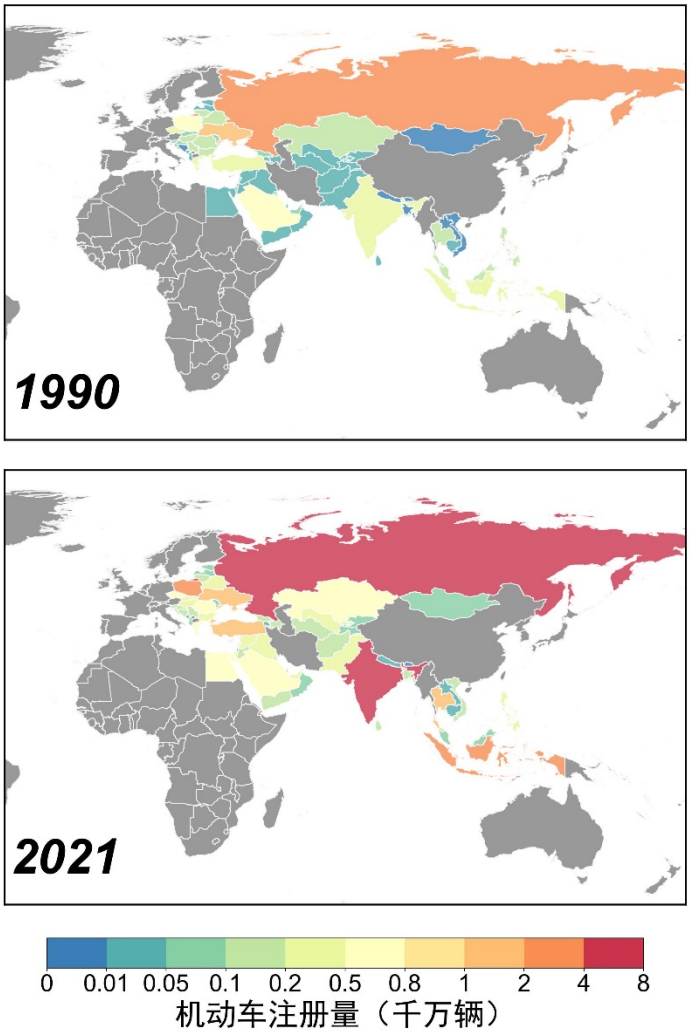

图 4-71 1990 和 2020 年“一带一路”沿线国家车辆注册量空间分布

图 4-72 展示了 1990 年以来“一带一路”沿线国家新注册的车辆情况及在全球的占比。二十世纪九十年代，“一带一路”国家道路交通基础设施建设处于初步发展阶段，新车注册量保持基本稳定，维持在每年新增 600 万辆左右。进入二十一

世纪后，新车注册量持续增长，从 2000 年的新增 800 万辆到 2018 年的新增 0.3 亿辆，年均增速达到 7%。但“一带一路”沿线国家新车注册量占全球总新车注册量的比例并没有明显的上升，在 20%的较为稳定水平上波动。从 2019 年“一带一路”沿线国家的新车注册量开始下降，相较 2018 年下降了 11%。在新冠疫情的影响下，道路交通行业相较于其他能源基础设施受到了较为明显的影响，2020 年“一带一路”沿线国家的新车注册量出现大幅下降，相较 2019 年下降了 17%。而 2021 年出现明显的回升，但受到疫情冲击的影响，其新车注册量仍然低于 2019 年的水平，达到 0.23 亿辆。

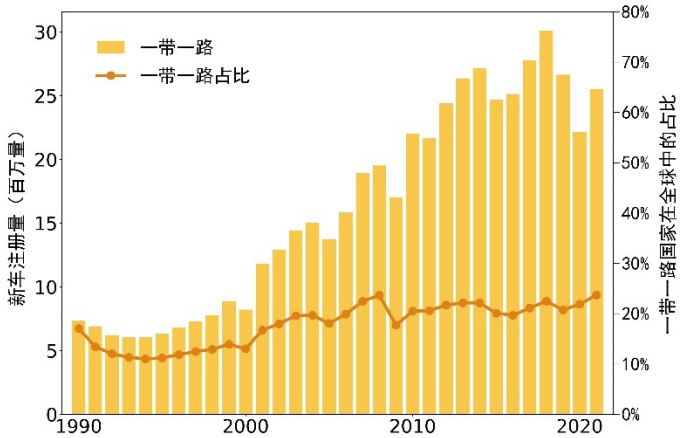

图 4-72 1990-2021 年“一带一路”沿线国家道路交通行业新机动车注册量

不同国家的道路交通行业发展差异显著。图 4-73 展示了“一带一路”沿线各国在 1990、2021 年车辆注册量以及 1990-2021 年间车辆注册量增速排名前 10 的国家。1990 年，俄罗斯、乌克兰、沙特阿拉伯是“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”沿线国家总车辆注册量的 46%。到 2021 年，“一带一路”沿线国家中车辆注册量前三的国家分别为印度、俄罗斯和印度尼西亚，车辆注册量分别为 0.54 亿辆、0.51 亿辆和 0.29 亿辆，占 2021 年全球总车辆注册量的近 70%。1990-2021 年，“一带一路”沿线国家中车辆注册量增速最大的是波斯尼亚和黑塞哥维纳，接近 20%，其次是老挝和越南，分别为 13%和 11%。增长速度最快的十个“一带一路”沿线国家分布在南亚及东南亚的占到了 43%，分布在中东的占到了 11%。随着“一带一路”沿线国家经济的不断

发展，尤其是基础设施投资的不断加大，“一带一路”沿线国家国内和与周边国家相连的交通条件将不断改善，这将促进“一带一路”沿线国家道路交通行业的稳定增长。以老挝为例，2015 年老挝加入东盟经济共同体，老挝交通运输量和车辆注册量实现了更加迅速的增长。

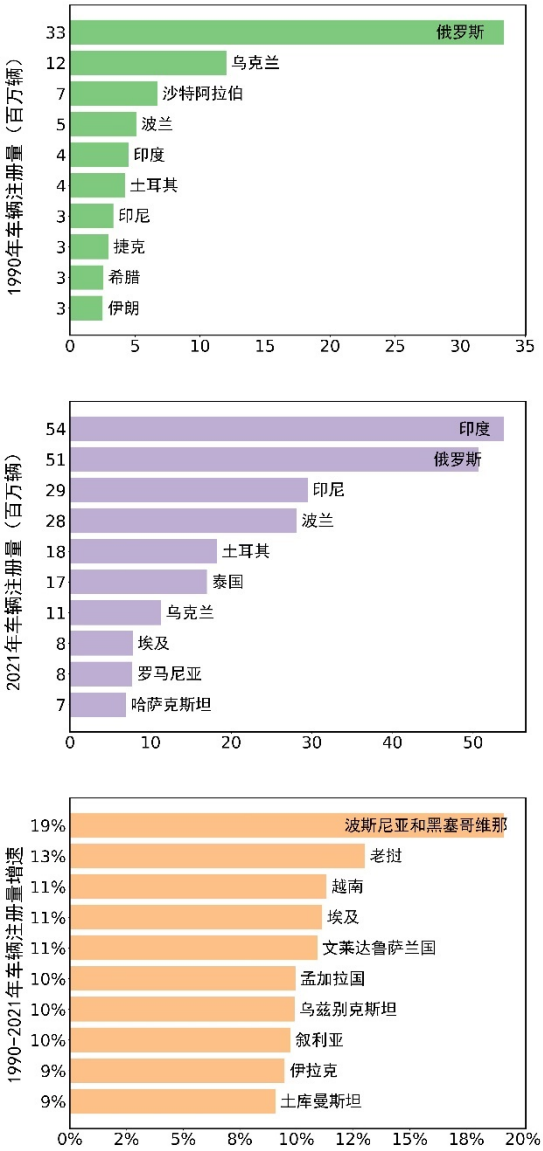

图 4-73 1990、2021 年“一带一路”沿线各国车辆注册量及 1990-2021 年间车辆注册量增速排名前 10 的国家

4.5.3 能源基础设施碳排放演变

“一带一路”沿线国家化石燃料 CO_2 排放量总体上呈现先减后增的趋势（见图 4-74）。受“东欧剧变”的影响，东欧国家工业及经济遭受重创，导致“一带一路”沿线国家化石燃料 CO_2 排放量由 1990 年的 69.8 亿吨下降到 2000 年的 65.8 亿吨。在二十世纪初，随着亚洲、中东+非洲地区新兴经济体的快速崛起，“一带一路”沿线国家化石燃料 CO_2 排放量稳步增加至 2021 年的 108.8 亿吨。尽管 1990-2021 年间“一带一路”沿线国家对全球化石燃料 CO_2 排放的贡献率有轻微变化，但总体水平保持在 30%左右，原因在于其他发展中国家在同一时期实现了经济腾飞驱动全球化石燃料碳排放同步上升。

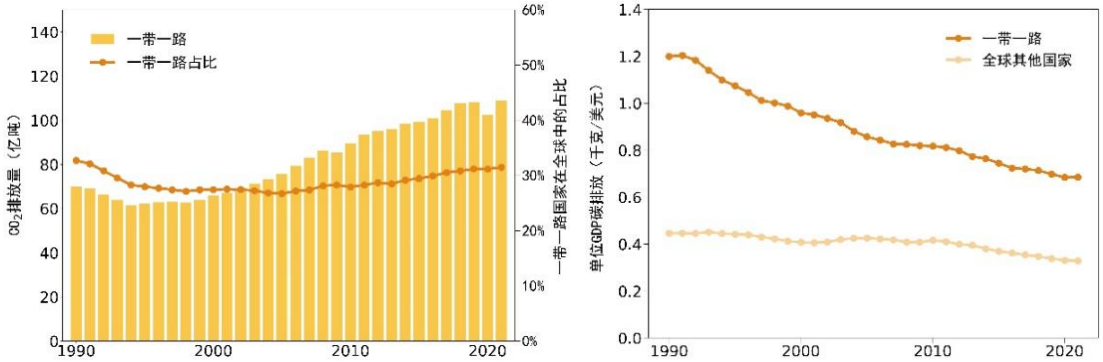

图 4-74 1990-2021 年 1990-2021 年“一带一路”沿线国家碳排放趋势

尽管“一带一路”沿线国家碳排放强度与全球其他国家仍有差距，但在 1990-2021 年间显著下降（图 4-74）。1990 年“一带一路”沿线国家单位 GDP 碳排放量为 1.20 千克/美元，是同年全球其他国家单位 GDP 碳排放量的 2.69 倍。随着工艺技术水平和能源利用效率的提升，“一带一路”沿线国家碳排放强度逐年降低，2021 年单位 GDP 碳排放量下降至 0.68 千克/美元，较 1990 年下降了 42.9%，与全球其他国家的差距缩小了 52.6%。

4.5.3.1 电力行业

随着基础设施建设的快速发展和电力需求的日益增长，“一带一路”沿线国家火电行业碳排放从 1990-2000 年平稳阶段逐渐过渡到 2000-2021 年的快速增长

阶段（图 4-75）。总体上看，“一带一路”沿线国家火电行业碳排放从 1990 年的 25.2 亿吨增长到 2021 年的 46.3 亿吨，碳排放增长幅度为 83.5%。燃煤发电是“一带一路”沿线国家煤电碳排放增长的主要驱动力，其 2021 年排放量较 1990 年增长了 103.8%。近三十年间，“一带一路”沿线国家火电行业碳排放结构有轻微变化，煤电碳排放的占比由 49.6%上升至 55.2%，而燃气发电碳排放占比由 29.1%上升至 32.6%。

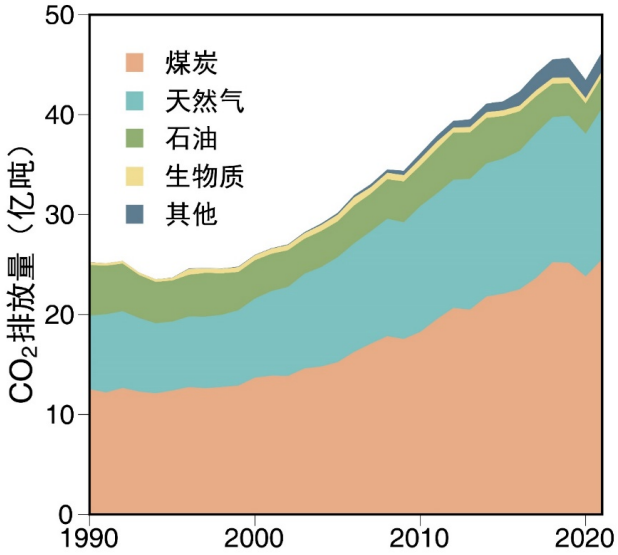

图 4-75 1990-2021 年“一带一路”沿线国家火电行业分燃料类型 CO_2 排放量

不同经济体火电行业碳排放发展路径的异质性导致了“一带一路”沿线国家火电行业碳排放的主要贡献区域从俄罗斯+东欧地区向亚洲与中东+非洲地区转移。上世纪九十年代，东欧国家经济衰退抵消了其他经济体发展带来的碳排放增长，使得“一带一路”沿线国家火电行业碳排放在 1990-2000 年间小幅波动，年均增速仅为 0.3%。近二十年来，以印度、越南等为代表的亚洲“一带一路”沿线国家电力基础设施带动了“一带一路”沿线国家火电行业碳排放进入快速增长阶段，年均增长速率上升至 2.8%。在 1990-2021 年间，分布在俄罗斯+东欧地区的沿线国家对“一带一路”沿线国家火电行业碳排放的贡献率由 45.5%%下降至 17.6%，而分布在亚洲、中东+非洲的“一带一路”沿线国家火电行业碳排放占比则从 29.7%上升至 70.5%。

“一带一路”沿线各国火电行业能源基础设施碳排放体现出明显的时空异质性（表 4-7）。俄罗斯和波兰是 1990 年火电行业排放量前二的一带一路沿线国家，其年排放高达 8.47、2.36 亿吨。除印度和沙特阿拉伯以外，1990 年火电行业排放量前十的一带一路沿线国家均来自于俄罗斯+东欧地区。而在 2021 年，印度电力行业以 13.84 亿吨二氧化碳排放量居于一带一路沿线国家电力行业排放的首位，其次是俄罗斯、沙特阿拉伯、印度尼西亚，排放分别为 6.98、2.57、2.50 亿吨。相较于 1990 年，进入 2021 年 “一带一路”沿线国家电力行业排放前十列表的国家大多来自于亚洲、中东+非洲地区。1990-2021 年“一带一路”沿线国家火电行业排放增速前十的国家全部来自于亚洲、中东+非洲地区。年均排放增长率最大的是斯里兰卡，达到了接近 18%，其次是越南和柬埔寨，其年增长率均在 12%左右。由于这些国家仍处于高速发展的阶段，其电力行业排放还将持续保持增长的态势。

表 4-7 1990、2021 年“一带一路”沿线各国电力行业碳排放及 1990-2021 年间钢铁行业碳排放增速排名前 10 的国家

排名	国家	1990 年碳排放（亿吨）	国家	2021 年碳排放（亿吨）	国家	1990-2021 年碳排放增速
1	俄罗斯	8.47	印度	13.84	斯里兰卡	18%
2	波兰	2.36	俄罗斯	6.98	越南	12%
3	印度	2.19	沙特阿拉伯	2.57	柬埔寨	12%
4	乌克兰	2.01	印度尼西亚	2.50	巴勒斯坦	11%
5	哈萨克斯坦	1.08	伊朗	1.76	印度尼西亚	8%
6	罗马尼亚	0.84	越南	1.58	缅甸	8%
7	捷克	0.68	土耳其	1.52	孟加拉国	7%
8	保加利亚	0.65	波兰	1.38	菲律宾	7%

9	乌兹别克斯坦	0.60	泰国	1.30	马来西亚	7%
10	沙特阿拉伯	0.46	马来西亚	1.20	印度	6%

4.5.3.2 钢铁行业

近三十年“一带一路”沿线国家钢铁行业碳排放整体呈现先减后增趋势（图4-76）。2021 年“一带一路”沿线国家钢铁行业共排放 6.2 亿吨 CO_2，是 1990 年碳排放的 1.58 倍。在 1990-2000 年间，“一带一路”沿线国家钢铁行业碳排放以 2.1%速度波动下降，原因在于苏联解体后俄罗斯+东欧地区多个国家的工业产业呈现出断崖之势。近二十年来，分布在亚洲、中东+非洲地区的“一带一路”沿线国家在基础设施建设方面的大力投入，驱动“一带一路”沿线国家钢铁行业碳排放以 3.3%增速持续上升。当前分布在亚洲、中东+非洲地区的“一带一路”沿线国家在所有“一带一路”沿线国家钢铁工业碳排放总量占比从 1990 年的 19.5%增长到 2021 年的 67.4%，而分布在俄罗斯+东欧地区的“一带一路”沿线国家钢铁工业贡献率在 2021 年下降到 25.8%。

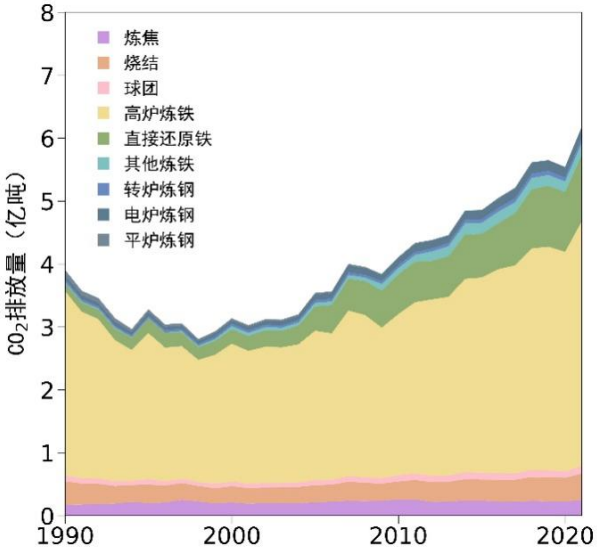

图 4-76 1990-2021 年“一带一路”沿线国家钢铁行业分生产工序 CO_2 排放量

由于“一带一路”沿线国家钢铁行业整体上起步较晚，废钢资源匮乏，“一带一路”沿线钢铁行业碳排放的增长主要来源于长流程炼钢过程。涉及到多个碳排放强度较高的铁矿石处理及冶炼工序，长流程过程中以炼焦、烧结、球团为代表的炼铁前工序和以高炉炼铁、直接还原铁为代表的炼铁工序在 2021 年间钢铁行业碳排放分别占据了“一带一路”沿线国家钢铁行业碳排放的 12.7%和 80%，其排放量较 1990 年分别增长了 23.1%、61.8%。相对地，以废钢为原料的短流程炼钢过程碳排放仅占当前全球钢铁行业碳排放总量的 2.9%。短流程炼钢过程省去了焦化、烧结、高炉等高能耗冶炼工序，是更具有绿色效益的工序。“一带一路”沿线国家在未来应结合国情优先发展短流程炼钢过程，促进钢铁工业节能减排和绿色发展。

“一带一路”沿线各国钢铁行业能源基础设施碳排放发展路径迥异（表 4-8）。1990 年钢铁行业排放量最大的一带一路沿线国家是俄罗斯和乌克兰，排放高达 1.42、0.91 亿吨，而在 2021 年印度钢铁行业以 3.14 亿吨二氧化碳排放量居于首位，其次是俄罗斯、乌克兰、越南，排放分别为 1.28、0.29、0.26 亿吨。相较于 1990 年，2021 年更多分布在亚洲、中东+非洲地区的新型经济体（如：越南、印尼、伊朗等）进入“一带一路”沿线国家钢铁行业排放前十的列表中。1990-2021 年年均排放增长率最大的是阿联酋，达到了接近 26%，其次是越南和波黑，分别为 23%和 8%。除波黑和斯洛文尼亚以外，2000-2021 年“一带一路”沿线国家钢铁行业排放靠前均来自于亚洲、中东+非洲地区。在未来，这些新兴经济体的用钢需求将保持强劲的上升趋势，驱动“一带一路”沿线各国钢铁行业继续增长。

表 4-8 1990、2021 年“一带一路”沿线各国钢铁行业碳排放及 1990-2021 年间钢铁行业碳排放增速排名前 10 的国家

排名	国家	1990 年碳排放（亿吨）	国家	2021 年碳排放（亿吨）	国家	1990-2021 年碳排放增速
1	俄罗斯	1.42	印度	3.14	阿联酋	26%

2	乌克兰	0.91	俄罗斯	1.28	越南	23%
3	印度	0.51	乌克兰	0.29	波黑	8%
4	罗马尼亚	0.20	越南	0.26	缅甸	7%
5	波兰	0.20	土耳其	0.19	泰国	7%
6	捷克	0.13	伊朗	0.19	伊朗	6%
7	斯洛伐克	0.09	印尼	0.18	约旦	6%
8	土耳其	0.08	哈萨克斯坦	0.12	印度	6%
9	匈牙利	0.05	波兰	0.06	印尼	5%
10	保加利亚	0.04	斯洛伐克	0.06	斯洛文尼亚	5%

4.5.3.3 水泥行业

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 2021 年的 7 亿吨，年均增速约 3%（图 4-77）。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%。2020 年受疫情影响，“一带一路”沿线国家的水泥碳排放相较于 2019 年下降了 4%，2021 年在疫情缓解带来的经济复苏下“一带一路”沿线国家的水泥碳排放又回升至 2019 年的水平。

水泥行业产生的碳排放来源于燃烧排放和过程排放两个方面，其中过程排放是“一带一路”沿线国家水泥行业产生碳排放的主要来源。1990 年“一带一路”沿线国家过程 CO_2 排放 1.7 亿吨，占总排放的 65%左右。随着“一带一路”沿线国家水泥行业规模持续扩张，熟料生产线的过程碳排放和燃烧碳排放都逐渐增长，2021 年“一带一路”沿线国家水泥行业过程排放 5 亿吨 CO_2，燃烧排放 2 亿吨 CO_2。

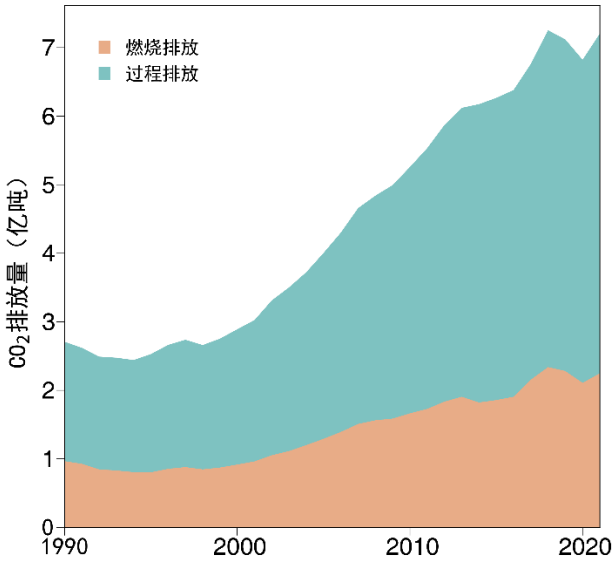

图 4-77 1990-2021 年“一带一路”沿线国家水泥行业分来源 CO_2 排放量

俄罗斯、印度和土耳其水泥行业发展起步较早，1990 年合计排放 1.3 亿吨。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 2000-2021 年水泥行业碳排放年均增速在 3-10%之间。2021 年，印度水泥行业 CO_2 排放达 2.2 亿吨，越南 CO_2 排放超过 5000 万吨，土耳其、印度尼西亚、俄罗斯和巴基斯坦水泥行业 CO_2 排放则均超过 3000 万吨。1990-2021 年碳排放增速最快的十个国家有 50%属于南亚和东南亚，30%属于中东和北非，其中尼泊尔、越南和缅甸的年均增速均超过 10%。

表 4-9 1990、2021 年“一带一路”沿线各国水泥行业碳排放及 1990-2021 年间水泥行业碳排放增速排名前 10 的国家

排名	国家	1990 年碳排放（亿吨）	国家	2021 年碳排放（亿吨）	国家	1990-2021 年碳排放增速
1	俄罗斯	0.67	印度	2.17	尼泊尔	15%
2	印度	0.40	越南	0.80	越南	13%
3	土耳其	0.19	土耳其	0.49	缅甸	12%

4	泰国	0.13	印尼	0.35	塔吉克斯坦	10%
5	埃及	0.11	俄罗斯	0.34	卡塔尔	9%
6	乌克兰	0.10	巴基斯坦	0.31	格鲁吉亚	8%
7	希腊	0.10	埃及	0.28	孟加拉国	8%
8	印尼	0.09	伊朗伊斯兰共和国	0.28	巴林	8%
9	波兰	0.09	泰国	0.28	斯里兰卡	8%
10	罗马尼亚	0.07	沙特阿拉伯	0.24	阿拉伯联合酋长国	7%

4.5.3.4 道路交通行业

在保有量持续增长的驱动下，“一带一路”沿线国家机动车碳排放增长显著，以 3%的年均碳排放增速逐年上升，从 1990 年的 7 亿吨 CO_2 增至 16 亿吨 CO_2（图 4-78）。而受到新冠疫情的影响，2020 年“一带一路”沿线国家机动车碳排放下降明显，相较 2019 年下降了 7%，其后虽然 2021 年随着疫情好转，“一带一路”沿线国家机动车碳排放出现回升，但仍不及 2019 年的水平。

从机动车类型上来看，不同类型的机动车产生的碳排放存在差异。小型客车是“一带一路”沿线国家机动车碳排放的最大来源，1990 年小型客车的碳排放量为 3 亿吨，占“一带一路”沿线国家总排放的 43%。2021 年小型客车的碳排放增长至 6 亿吨，但随着其他车型碳排放量的上升，小型客车碳排放量占“一带一路”沿线国家总排放的比例有所下降，降至 36%。其次是重型货车和轻型货车，这两种车型在 1990 年的碳排放量分别为 1.5 亿吨和 0.9 亿吨，两者产生的碳排放量占“一带一路”沿线国家道路交通总碳排放量的 35%，2021 年重型货车和轻

型货车的碳排放量分别为 3.7 亿吨和 2.3 亿吨，两者碳排放总占比增长至 37%，相对维持稳定。

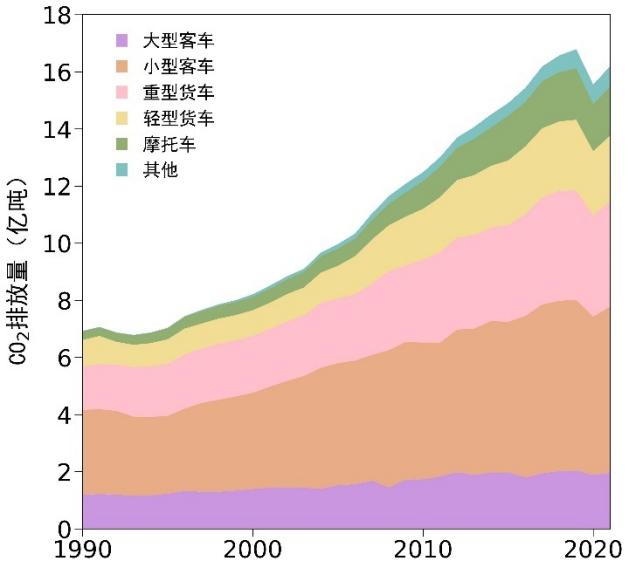

图 4-78 1990-2021 年“一带一路”沿线国家道路交通行业分车型 CO_2 排放量

从机动车的燃料种类来看，不同燃料类型的机动车碳排放也存在较大差异（图 4-79）。1990 年“一带一路”沿线国家的道路交通行业碳排放有 52%来自于以汽油为燃料的机动车，碳排放达到了 3.6 亿吨，而有 48%来自于以柴油为燃料的机动车，碳排放为 3.3 亿吨。2021 年“一带一路”沿线国家的交通行业碳排放依然主要来源于柴油和汽油燃料，但最多的燃料种类为柴油，贡献了总碳排放的 51%，以汽油为燃料的机动车排放 7.3 亿吨 CO_2，贡献了 49%碳排放。总体来说，以天然气作为燃料的机动车在“一带一路”沿线国家交通行业碳排放中的贡献相对较小，但其产生的碳排放有非常明显的增长，从 1990 年的 4000 多吨增长至 2021 年的 6 万吨。

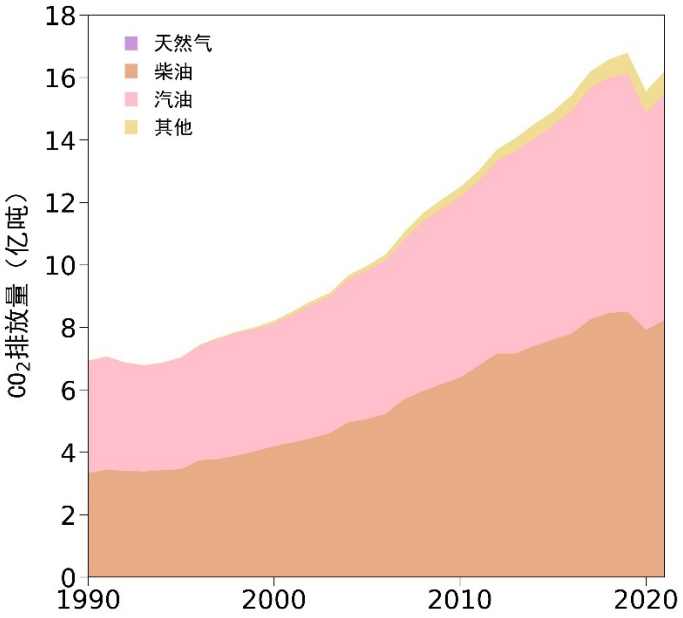

图 4-79 1990-2021 年“一带一路”沿线国家道路交通行业分燃料 CO_2 排放量

俄罗斯、乌克兰和沙特阿拉伯道路交通行业碳排放在 1990 年处于较高水平，分别排放 1.5 亿吨、0.5 亿吨和 0.5 亿吨，占“一带一路”沿线国家道路交通总排放的 55%。2021 年印度已经超越俄罗斯成为“一带一路”沿线国家中交通行业碳排放最大的国家，碳排放达到 2.6 亿吨，占“一带一路”沿线国家道路交通总排放的 23%，其次是俄罗斯和印度尼西亚，分别排放了 1.6 亿吨和 1.4 亿吨二氧化碳。2021 年“一带一路”沿线国家道路交通行业碳排放前十的国家中中东地区的国家贡献了 30%的碳排放，总计排放 3.4 亿吨二氧化碳。1990-2021 年“一带一路”沿线国家交通行业碳排放增速最快的三个国家是尼泊尔、不丹和阿富汗，年均增速分别为 9%、9%和 8%。

表 4-10 1990、2021 年“一带一路”沿线各国道路交通行业碳排放及 1990-2021 年间道路交通行业碳排放增速排名前 10 的国家

排名	国家	1990 年碳排放（亿吨）	国家	2021 年碳排放（亿吨）	国家	1990-2021 年碳排放增速
1	俄罗斯	1.52	印度	2.56	尼泊尔	9%

2	乌克兰	0.48	俄罗斯	1.55	不丹	9%
3	沙特阿拉伯	0.47	印尼	1.35	阿富汗	8%
4	印度	0.47	沙特阿拉伯	1.20	老挝	8%
5	伊朗伊斯兰共和国	0.39	伊朗伊斯兰共和国	1.12	马尔代夫	7%
6	印尼	0.29	土耳其	0.77	卡塔尔	7%
7	泰国	0.26	泰国	0.75	柬埔寨	7%
8	土耳其	0.26	波兰	0.68	越南	7%
9	伊拉克	0.22	马来西亚	0.62	阿曼	6%
10	波兰	0.18	埃及	0.53	巴勒斯坦	6%

4.5.4 能源基础设施碳锁定效应

“一带一路”沿线国家现役和拟建能源基础设施碳排放锁定效应不容小觑（Davis et al., 2010; Davis et al., 2014; Tong et al., 2019）。如能源基础设施按照历史平均服役寿命和设备投运率运行，2021 年“一带一路”沿线国家现役和拟建能源基础设施共计锁定了 2595.3 亿吨碳排放量，占全球能源基础设施碳锁定效应的 32%（见图 4-80）。电力、工业（钢铁、水泥及其他工业）和拟建火电厂主导了当前“一带一路”沿线国家能源基础设施的碳排放锁定效应。其中，电力部分锁定效应最大，其碳排放量锁定效应为 973.5 亿吨，占“一带一路”沿线国家能源基础设施锁定碳排放的 37.5%。拟建电厂碳排放锁定效应为 598.6 亿吨，占“一带一路”沿线国家能源基础设施锁定碳排放的 23.1%。钢铁、水泥行业在未来分别锁定了 111.9、124.4 亿吨碳排放量，贡献了一带一路”沿线国家碳排放锁定效应的 4.3%和 4.8%，而其他工业锁定了 362.9 亿吨碳排放量，贡献了全部碳排放

锁定效应的 14.0%。除此之外，其他行业的能源基础设施总共锁定了 424.9 亿吨碳排放，主要来自于道路交通、国际交通以及民用源。

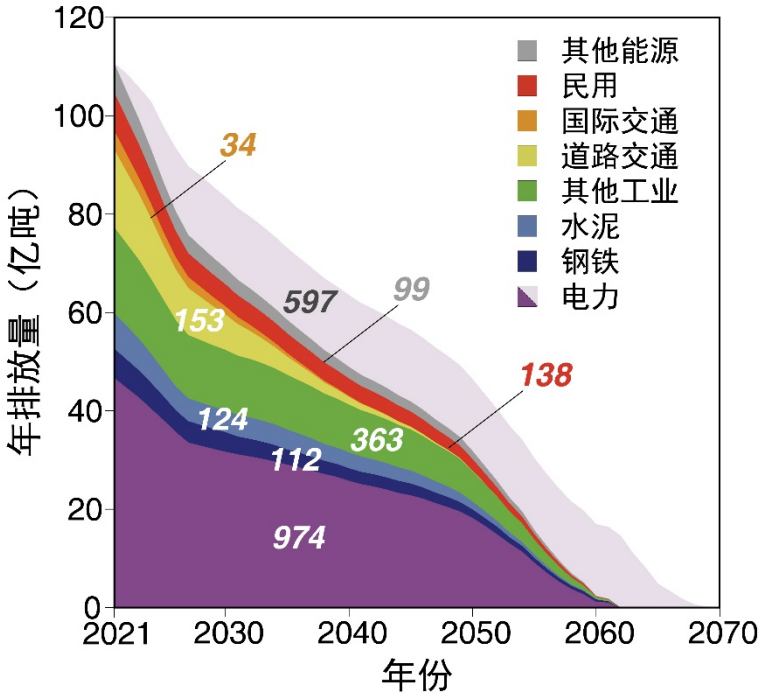

图 4-80 2021 年“一带一路”沿线国家能源基础设施分行业碳排放锁定效应

在国家层面上，印度、俄罗斯的能源基础设施碳排放锁定效应占据了全球碳排放锁定效应的绝对主导地位（见图 4-81）。以上两个国家 2021 年能源基础设施碳排放锁定效应为 600.4、190.2 亿吨，分别贡献了“一带一路”沿线国家全部碳排放锁定效应的 30.1%、9.5%。近年来，分布在中东+非洲和亚洲地区的发展中国家和新兴经济体大力投入能源基础设施建设，驱动能源基础设施年龄结构年轻化，致使碳排放锁定效应加剧。除印度、俄罗斯以外，伊朗、印度尼西亚、沙特阿拉伯、土耳其、越南、埃及、阿联酋、马来西亚是“一带一路”沿线国家中碳排放锁定效应排放前十的国家，这些国家均分布在中东+非洲和亚洲地区，其碳排放锁定效应总量占“一带一路”沿线国家碳排放锁定效应的 35.2%。

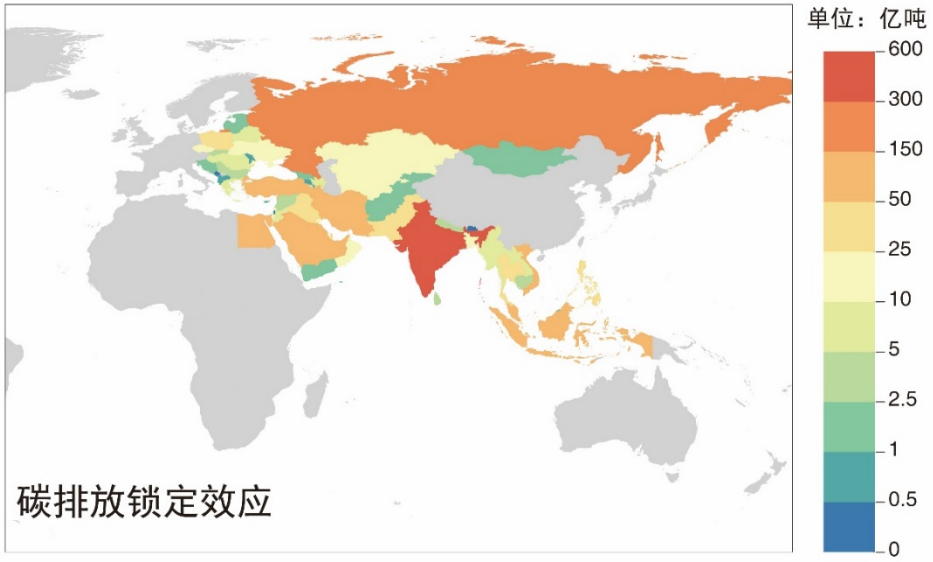

图 4-81 2021 年“一带一路”沿线国家碳排放锁定效益空间分布

“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 4-82）。2021 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，2021 年其在未来锁定的碳排放仅为 2.4 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增长迅速，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。2021 年越南在未来锁定的 91 亿吨碳排放位列“一带一路”沿线国家锁定碳排放前十，同时，近三十年越南火电装机容量、钢铁和熟料产能年均增速分别达 10%、16%和 7%，成为“一带一路”沿线国家中锁定碳排放增长最显著的国家。

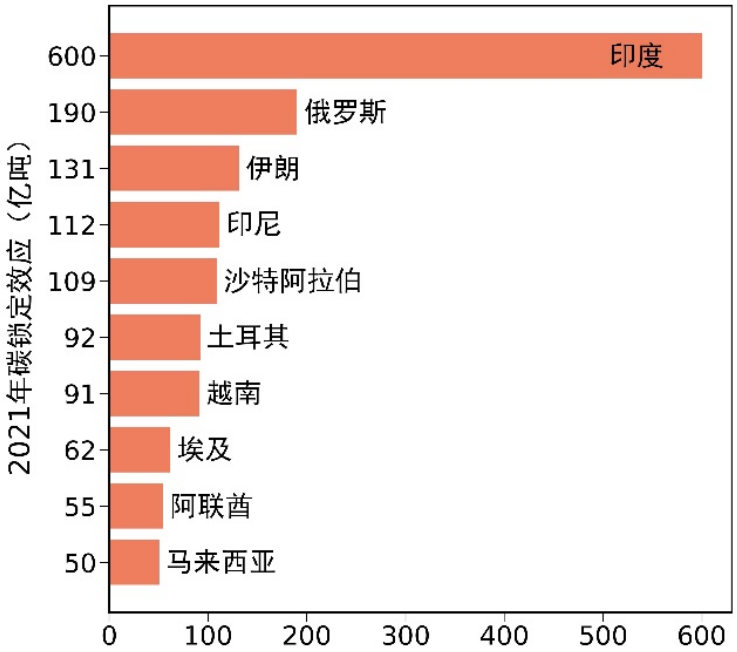

图 4-82 2021 年“一带一路”沿线国家中碳锁定效应前十的国家

电力、钢铁、水泥和交通是“一带一路”沿线国家锁定碳排放的主要来源，图 4-83 进一步展示了“一带一路”各国中上述四个行业 2021 年锁定碳排放排名前 10 的国家。以“一带一路”沿线国家中 2021 年锁定碳排放最高的国家印度为例，这四个行业对印度当年的锁定碳排放贡献比例分别为 59%、11%和 7%。此外，电力、工业和交通的高排放国家同样较为集中，行业半数以上锁定碳排放均来自排名前 10 的国家。

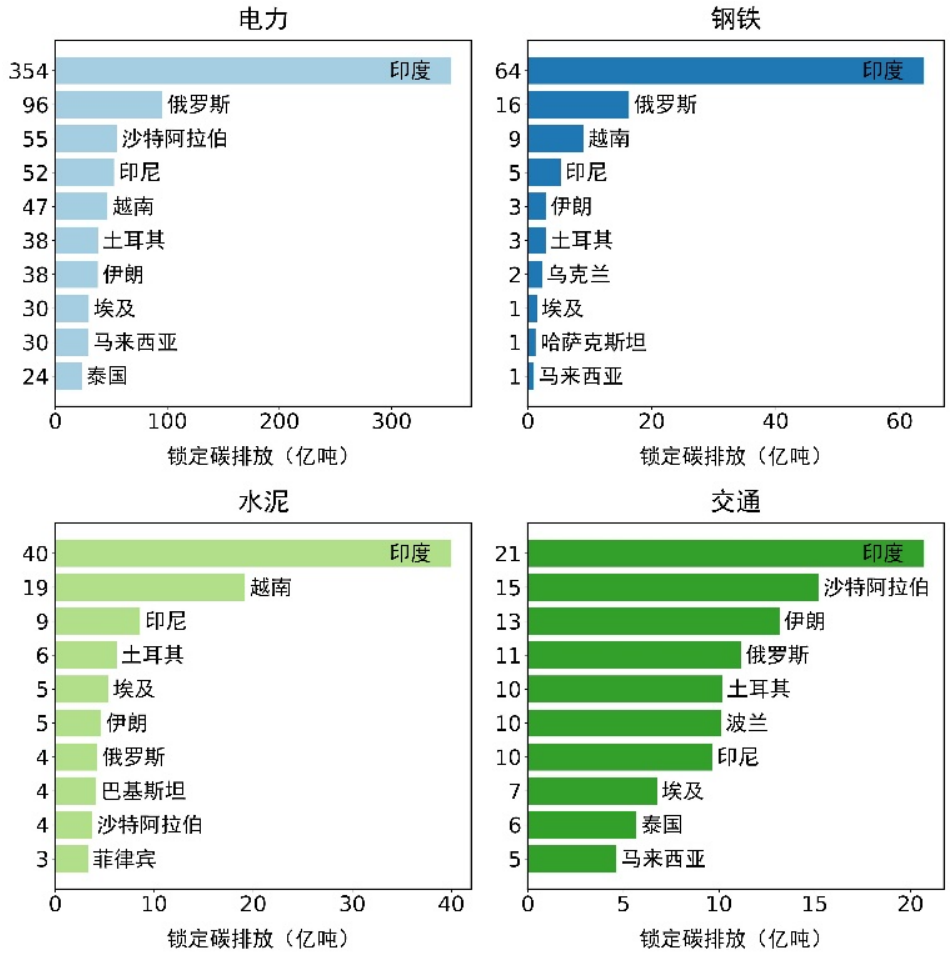

图 4-83 2021 年“一带一路”电力、钢铁、水泥和交通锁定碳排放排名前十的国家

4.5.5 “一带一路”绿色共建挑战与机遇

回顾发达国家的发展进程可以发现，随着工业化、城市化的快速发展，在依赖大量消耗化石能源、创造巨大物质财富的同时，其二氧化碳排放导致的气候问题也愈发突出（Araújo et al., 2020; Wang et al., 2020）。与此同时，当前经济高速增长的发展中国家也正在走着与发达国家相似的发展道路（Udemba et al., 2021）。“一带一路”沿线国家目前多数尚属于发展中或欠发达国家，随着其经济社会不断发展，未来这些国家对电力及工业产品的需求也将迅速攀升。“一带一路”沿线国家中许多中小型经济体已经成为近二十年全球碳排放增长的主要贡献者（Cui et al., 2022），尽管其单个国家碳排放相对较少，整体排放总量却不可忽视。如果没有进一步的减排政策和技术支持，这些经济体的碳排放预计将持续快速增长（Cui et al., 2022），可能沿袭“先发展后减碳、先高碳再低碳”的老路，形成高碳

发展定式之后还可能对挤压全球低碳技术推广、示范和应用的空间，无疑将为全球气候目标的实现带来巨大挑战。因此，在“一带一路”合作框架下，各国应共同探寻以可再生能源等低碳新兴技术为主导的绿色共建发展路径，尽己所能的平衡经济社会发展与气候环境影响，开拓合作共赢的绿色发展模式。

（1）扭转高碳能源基础设施投资惯性

由于成本、技术成熟度和自然禀赋等因素，许多“一带一路”新兴经济体仍趋于建设化石能源基础设施以满足日益增长的能源需求和产品需求，这一高碳能源基础设施投资惯性亟需扭转，以避免新建设施的长期碳锁定效应，同时降低资产搁浅风险（Pfeiffer et al., 2018; Johnson et al., 2015; Bertram et al., 2015）。绿色共建本质上是破解技术锁定和路径依赖、推动能源系统深度转型并逐步解除碳锁定的过程，因此未来应当合理的限制“一带一路”沿线国家高碳能源基础设施的惯性投资冲动。

值得注意的是，这并不代表着“一刀切”的禁止高碳设施的建设、限制这些国家合理发展诉求，而是倡议合理的规划高碳能源基础设施的建设，平衡化石能源与可再生能源、设施存量与新建量等之间的动态关系，在满足国家经济社会发展需要的前提下，尽可能减少盲目投资、盲目扩张的情况，将发展路径由惯性的以化石能源为主导逐步转向化石能源与可再生能源齐头并进的模式，并在一定发展阶段进一步转向更为低碳绿色的发展模式。在这一过程中，应当充分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。

可再生能源技术的快速发展和成本的持续降低为“一带一路”沿线国家建设低碳能源基础设施创造了机会，同时其独特的自然条件也展现出了巨大的可再生能源利用潜力（IRENA , 2020；“一带一路”绿色发展国际联盟，2021）。例如，“一带一路”沿线中以印度尼西亚为代表的东盟国家海岸线绵长，有着典型的热带雨林气候，天然拥有丰富的风能和水利资源（新世界，2021）；西亚国家太阳能资源储量巨大，可再生能源发展前景广阔。与此同时，作为共建“一带一路”优先

领域，中国不再新建境外煤电项目的承诺也为“一带一路”沿线国家能源绿色低碳发展增添了更多动能（观察者，2021）。整体来看，“一带一路”沿线国家低碳能源基础设施发展方兴未艾施（一带一路网，2020；2021a；2021b）。

（2）加速已有能源基础设施改造和淘汰进程

除了面向新建设施的规划，还应当合理、及时的评估和规划已经建成的能源基础设施的未来发展。大多“一带一路”沿线国家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，在这种情况下应区分不同基础设施现状以采取有效措施。对于近年来新建的、已服役年限较短的化石能源基础设施，潜在的巨大搁浅资本意味着其难以在短期内进行大规模改造或淘汰，因此应尽可能通过规范化操作、小规模工序改造等提升其能效表现，达到节能降碳的效果；对于已服役年限较长、生产技术落后的化石能源基础设施，应当在政策支持下开展设施升级改造，应用更为高效节能的新技术，或在需求缺口、失业等问题可以妥善解决的前提下开展有序的设施淘汰，提升行业整体的能效表现。

节能减排是推动低碳发展的重要抓手之一，在“一带一路”新兴经济体中显得尤为重要。在“一带一路”合作框架下，各国应当共同探寻提升重点行业技术和能效水平的有效路径，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。

（3）推动新兴低碳技术应用

在“一带一路”沿线国家的发展过程中，如果能以新兴低碳技术取代依赖化石能源的传统技术，各国将走上不同于发达国家的绿色建设道路；如果“一带一路”沿线国家依旧采用发达国家传统的发展模式，将资金和资源流向化石能源，将难以追赶新一轮产业技术革命的步伐。由此可见，高度依赖化石能源的经济发展模式不仅不利于全球气候治理目标实现，还将阻碍“一带一路”沿线国家竞争力的提升，推动新兴低碳技术应用势在必行。

氢能冶金、碳捕集与封存等新兴低碳技术的应用是“一带一路”沿线国家实现绿色共建、形成新竞争优势的重要机遇，可能引领其能源基础设施发展由资源

依赖型转向技术依赖性，加速社会经济发展与化石能源大规模使用脱钩。“一带一路”沿线国家具有巨大的基础设施建设需要，为一些新兴低碳技术的示范应用提供了机遇。“一带一路”沿线国家应当尝试利用供给两侧的政策引导，充分发挥市场机制和金融政策的作用，部署绿色低碳前沿技术示范项目。相关技术应用很可能需要经历依赖于政策扶持的示范期和原型期，但逐步成熟后可过渡至本地商业化、市场化应用，带来深刻的技术革新（Jana & De, 2020; Ozcan & Kayabasi, 2021）。例如，经过一段时间的技术实践，第一个配备商业化 CCS 技术的钢铁企业已在阿联酋投入运行（Global CCS Institute, 2017），实现了低碳钢铁生产。相关经验亦可在其它“一带一路”沿线国家推广，在不同地理条件和资源禀赋的地区对 CCS 等新型低碳技术的适用性、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钢铁和水泥等行业深度脱碳问题（科学技术部社会发展司，2010）。

（4）加强绿色合作，实现绿色共建

“一带一路”合作协议为沿线国家提供了开展绿色共建的交流合作平台，应当抓住机遇广泛开展绿色技术国际合作，深入推进可再生能源、新能源汽车等新能源产业发展，减少自身的化石能源依赖性。具体来说，可以在“一带一路”框架下加强沿线国家间的绿色发展经验交流和合作关系，同时推动与中国和欧美发达国家间的技术合作；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，并建立依托于“一带一路”平台的绿色共建国家公约和多边合作，共同建设气候友好型发展路径。此外，以全球气候共治为指导思想，“一带一路”沿线各国应当在治理体系、资金、技术、机制等方面全方位加强合作交流，形成经济增长新共识，相互分享低碳发展技术以充分释放各自绿色能源潜力，开拓“一带一路”特色的气候治理国家合作新路径。

值得强调的是，后疫情时代经济重启是“一带一路”沿线国家实现绿色复苏和绿色发展的重要机遇，顺应全球绿色复苏潮流有望为其经济发展和低碳转型注入新动能。在美国、德国、法国、英国和日本等发达国家已出台相关绿色复苏计划，覆盖可再生能源、新能源汽车和氢能利用等低碳发展领域（绿色和平组织，

2021）。“一带一路”沿线国家也应该依托自身自然禀赋以政策驱动绿色发展，需求先进低碳技术引入，吸引绿色投资，促进本地相关产业和技术发展，力争实现经济增长和绿色赋能兼备的发展新模式。同时，在经济重启阶段应该警惕化石能源扩张，避免大量经济复苏资金流向化石能源项目（O’Callaghan and Murdock, 2021），追踪煤电等高碳基础设施投资和建设动态（Global Energy Monitor, 2022），把握绿色复苏的大方向。此外，由于减排成本高昂，“一带一路”沿线国家在绿色发展过程中可能遇到一定的经济和市场阻碍，需要呼吁拥有先进减排技术的国家承担更多责任，为“一带一路”沿线国家逐步转向低碳发展创造空间（Cui et al., 2022）。一方面，发达国家应该尽可能向“一带一路”沿线国家提供经济和技术支持，另一方面通过强化自身减排行动，为其发展腾挪空间。

五、项目研究展望

通过对项目研究的回顾总结和与学者专家的深入讨论，项目组对项目下一阶段在数据库构建、数据解读和政策建议等方面可以进行完善、改进和补充的内容进行了总结。

（1）数据库开发和扩展。考虑利用 AI 等方法提升数据时效性，增强数据库更新稳定性，并提升数据库覆盖度；未来计划包括非二温室气体和污染物等物种。

（2）突破已有数据分析尺度。目前分析以区域聚合为主，结合部分重点国家分析，在未来考虑将分析深入到更细致的区域，如由亚洲深入至东亚、东南亚、南亚、西亚和中亚等子区域，并增加更多细致国家分析，尤其是针对大量新兴经济体开展碳排放锁定效应等方面的细致分析，从现象到原因的进行深入挖掘，将研究更进一步。

（3）可考虑结合能源基础设施资产和投资分析。从成本效益的全新角度出发，定量能源基础设施新建、改造、退役等的碳减排和解锁效应，以寻求成本效益最大化的解锁路径，并结合市场机制和金融政策进行讨论。

（4）重点关注 2022 年全球能源基础设施和碳锁定效应变化情况，探究 2022 年中国新冠疫情持续影响、国际俄乌冲突等对其的影响，提炼具有典型意义的变化

特征并探讨其原因。进一步通过具体事件影响研究能源基础设施发展中短期变化与长期目标的联系和分歧，为不同层面决策者提供战略性指导。

（5）从技术角度出发，更深入的探究各项具体低碳技术对碳排放锁定效应的潜在影响，包括 CCS、BECCS、新能源等，比对探究不同技术在解锁效应、成本效益和技术壁垒等方面的优劣。

（6）在中国的分析中，可将锁定效应与分省、分行业未来碳达峰、碳中和路径进行综合对比，分析锁定效应对未来设施新建、已有设施平均产出等因素的影响，为碳中和路线图规划提供科学参考。

参考文献

Araújo, I. F. D., Jackson, R. W., Ferreira Neto, A. B., & Perobelli, F. S. (2020). European union membership and CO_2 emissions: A structural decomposition analysis. *Structural Change and Economic Dynamics*, *55*, 190-203. https://doi.org/10.1016/j.strueco.2020.06.006.

Bertram, C., Johnson, N., Luderer, G., Riahi, K., Isaac, M., & Eom, J. (2015). Carbon lock-in through capital stock inertia associated with weak near-term climate policies. *Technological Forecasting and Social Change*, *90*, 62-72. http://dx.doi.org/10.1016/j.techfore.2013.10.001

Bo, X., Jia, M., Xue, X., Tang, L., Mi, Z., Wang, S., Cui, W., Chang, X., Ruan, J., Dong, G., Zhou, B., & Davis, S.J. (2021). Effect of strengthened standards on Chinese ironmaking and steelmaking emissions. *Nature Sustainability*, *4(9)*, 811-820. https://doi.org/10.1038/s41893-021-00736-0

BP. (2022). BP Statistical Review of World Energy 2022. Retrieved from https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html

CCAPP. (2021). 中国碳中和与清洁空气协同路径 2021. Retrieved from https://www.efchina.org/Reports-zh/report-cemp-20211020-zh

Chen, C., Xu, R., Tong, D., Qin, X., Cheng, J., Liu, J., Zheng, B., Liu, Y., & Zhang, Q. (2022). A striking growth of CO_2 emissions from global cement industry driven by new facilities in emerging countries. *Environmental Research Letters*, *17(4)*, 044007. http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/ac48b5

Cheng, J., Tong, D., Zhang, Q., Liu, Y., Lei, Y., Yan, G., Yan, L., Yu, S., Cui, R.Y., Clarke, L., Geng, G., Zheng, B., Zhang, X., Davis, S.J., He, K. (2021). Pathways of China's $PM_{2.5}$ air quality 2015–2060 in the context of carbon neutrality, *National Science Review*, nwab078. https://doi.org/10.1093/nsr/nwab078

Cui, C., Guan, D., Wang, D., Meng, J., Chemutai, V., Brenton, P., Zhang, S., Shan, Y., Zhang, Q., & Davis, S. J. (2022). Global mitigation efforts cannot neglect emerging emitters, *National Science Review*, nwac223. https://doi.org/10.1093/nsr/nwac223

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

Environmental Protection Agency. (2019). Emissions & Generation Resource Integrated Database (eGRID). Retrieved from https://www.epa.gov/egrid

Fang, J., Yu, G., Liu, L., Hu, S., & Stuart Chapin, F. (2018). Climate change, human impacts, and carbon sequestration in China. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *115(16)*, 4015-4020. https://doi.org/10.1073/pnas.1700304115

Friedlingstein, P., Jones, M. W., O'Sullivan, M., Andrew, R. M., Hauck, J., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Sitch, S., Le Quéré, C., DBakker, O. C. E., Canadell1, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Anthoni1, P., Barbero, L., Bastos, A., Bastrikov, V., Becker, M., … Zaehle, S. (2019). Global carbon budget 2019. *Earth System Science Data*, *11(4)*, 1783-1838. https://doi.org/10.5194/essd-11-1783-2019

Global CCS Institute. (2017). CCS: a necessary technology for decarbonising the steel sector. Retrieved from https://www.globalccsinstitute.com/news-media/insights/ccs-a-necessary-technology-for-decarbonising-the-steel-sector/#:~:text=The%20Abu%20Dhabi%20CCS%20Project%20-%20also%20called,2%20from%20gases%20produced%20by%20the%20DRI%20reactor.

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

Global Energy Monitor. (2022). Boom and Bust Coal 2022. Retrieved from https://globalenergymonitor.org/report/boom-and-bust-coal-2022/#:~:text=GEM%27s%20%22Boom%20and%20Bust%20Coal%202022%22%20report%20finds,consideration%2C%20down%20from%2041%20countries%20in%20January%202021.

Global Infrastructure Emission Database. Retrieved from http://gidmodel.org.cn/

Guan, D., Meng, J., Reiner, D.M., Zhang, N., Shan, Y., Mi, Z., Shao, S., Liu, Z., Zhang, Q.， & Davis, S.J. (2018). Structural decline in China's CO_2 emissions through transitions in industry and energy systems. *Nature Geoscience*, *11(8)*, 551-555. https://doi.org/10.1038/s41561-018-0161-1

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Retrieved from https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Retrieved from https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/

International Energy Agency (IEA). (2022). World Energy Statistics and Balances 2022. Retrieved from https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-balances

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

Irlam, L. (2017). Global costs of carbon capture and storage. Global CCS institute. Retrieved from https://www.globalccsinstitute.com/archive/hub/publications/201688/global-ccs-cost-updatev4.pdf

Jana, K. & De, S. (2020). Overview of CCS: A Strategy of Meeting CO_2 Emission Targets, *Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials*, *3*, 628-639. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.11026-4

Jiang, F., Chen, J. M., Zhou, L., Ju, W., Zhang, H., Machida, T., Ciais, P., Peters, W., Wang, H., Chen, B., Liu, L., Zhang, C., Matsueda, H., & Sawa, Y. (2016). A comprehensive estimate of recent carbon sinks in China using both top-down and bottom-up approaches. *Scientific Reports*, *6(1)*, 22130. https://doi.org/10.1038/srep22130

Johnson, N., Krey, V., McCollum, D.L., Rao, S., Riahi, K., & Rogelj, J. (2015). Stranded on a low-carbon planet: Implications of climate policy for the phase-out of coal-based power plants. *Technological Forecasting and Social Change*, *90*, 89-102. http://dx.doi.org/10.1016/j.techfore.2014.02.028

Lang, J., Hyslop, C., Yeo, Z., Black, R., Chalkley, P., Hale, T., Hans, F., Hay, N., Höhne, N, Hsu, A., Kuramochi, T., Mooldijk, S., & Smith, S. (2023). Net Zero Tracker. Retrieved from https://zerotracker.net/

Lei, T., Guan, D., Shan, Y., Zheng, B., Liang, X., Meng, J., Zhang, Q., & Tao, S. (2021). Adaptive CO_2 emissions mitigation strategies of global oil refineries in all age groups. *One Earth*, *4*(8), 1114-1126. https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.07.009

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.

O'Callaghan, B.J., & Murdock, E. (2021). Are we building back better? Evidence from 2020 and pathways for inclusive green recovery spending. United Nations Environment Programme (UNEP). Retrieved from https://www.unep.org/resources/publication/are-we-building-back-better-evidence-2020-and-pathways-inclusive-green

Ozcan, H. & Kayabasi, E. (2021). Thermodynamic and economic analysis of a synthetic fuel production plant via CO_2 hydrogenation using waste heat from an iron-

steel facility, *Energy Conversion and Management*, *15*, 114074. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114074

Pfeiffer, A., Hepburn, C., Vogt-Schilb, A., & Caldecott, B. (2018). Committed emissions from existing and planned power plants and asset stranding required to meet the Paris Agreement. *Environmental Research Letters*, *13(5)*, 054019. http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/aabc5f

Piao, S., Fang, J., Ciais, P., Peylin, P., Huang, Y., Sitch, S., & Wang, T. (2009). The carbon balance of terrestrial cosystems in China. *Nature*, *458(7241)*, 1009-1013. https://doi.org/10.1038/nature07944

Qin, X., Tong, D., Liu, F., Wu, R., Zheng, B., Zheng, Y., Liu, J., Xu, R., Chen, C., Liu, Y., & Zhang, Q. Global and regional drivers of power plant CO_2 emissions over the last three decades. *Earth's Future*, *10(10)*, e2022EF002657. https://doi.org/10.1029/2022EF002657

S&P Global Platts. (2022). World Electric Power Plant database (WEPP). Retrieved from https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/products-services/electric-power

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. 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 °C climate target. *Nature*, *572(7769)*, 373-377. https://doi.org/10.1038/s41586-019-1364-3

Udemba, E. N., Güngör, H., Bekun, F. V., Kirikkaleli, D. (2021). Economic performance of India amidst high CO_2 emissions, *Sustainable Production and Consumption*, *27*, 52-60. https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.10.024.

United States Geological Survey (USGS). (2022). Mineral commodity summaries 2022. Retrieved from https://pubs.er.usgs.gov/publication/mcs2021

Wang, J., Feng, L., Palmer, P.I., Liu, Y., Fang, S., Bösch, H., O'Dell, C.W., Tang, X., Yang, D., Liu, L. and Xia, C. (2020). Large Chinese land carbon sink estimated from atmospheric carbon dioxide data. *Nature*, *586(7831)*, 720-723. https://doi.org/10.1038/s41586-020-2849-9

Wang, X., Lei, Y., Yan, L., Liu, T., Zhang, Q., & He, K. (2019). A unit-based emission inventory of SO_2, NO_x 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

Wang, Z., Jiang, Q., Dong, K., Mubarik, M. S., & Dong, X. (2020). Decomposition of the US CO_2 emissions and its mitigation potential: An aggregate and sectoral analysis,

Energy Policy, *147*, 111925. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111925.

Wei, Y., Kang, J., Liu, L., Li, Q., Wang, P., Hou, J., Liang, Q., Liao, H., Huang, S., & Yu, B. (2021). A proposed global layout of carbon capture and storage in line with a 2 °C climate target. *Nature Climate Change*, *11(2)*, 112-118. https://doi.org/10.1038/s41558-020-00960-0

Xu., R, Tong, D., Zheng B., Davis, S. J., Qin, X., Cheng, J., Shi, Q., Liu, Y., Chen, C., Liu, Y., He, K., & Zhang, Q. Contrasting decarbonization opportunities in the global steel industry from the 30-year developmental patterns. In preparation.

Zhang, Q., Zheng, Y., Tong, D., Shao, M., Wang, S., Zhang, Y., … Hao, J. (2019). Drivers of improved PM2.5 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

观察者. (2021). 《习近平：中国不再新建境外煤电项目》. Retrieved from https://www.guancha.cn/politics/2021_09_22_608045.shtml

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负责人就"一带一路"建设有关问题答记者问》. Retrievedfromhttps://www.ndrc.gov.cn/xxgk/jd/jd/201503/t20150330_1183159.html?code=&state=123

国家统计局. (2020). 中国统计年鉴 2020. 北京 ：中国统计出版社.

国家统计局. (2021). 中华人民共和国 2020 年国民经济和社会发展统计公报. Retrieved from http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/202102/t20210227_1814154.html

国家统计局. (2021). 国家年度数据. Retrieved from https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01

科学技术部社会发展司. (2010). 《碳捕集、利用与封存技术在中国》. Retrieved from https://www.mfa.gov.cn/ce/cepl//chn/ywzn/kjhz/ckjgk/P020110314811032996879.pdf

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/

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 推进“一带一路”建设工作领导小组办公室. (2021).《构建人类命运共同体体现中国大国治理和时代担当》. Retrieved from https://www.yidaiyilu.gov.cn/xwzx/gnxw/195736.htm

新华社. (2020). 习近平在气候雄心峰会上的讲话（全文）. Retrieved from https://baijiahao.baidu.com/s?id=1685886202481384721&wfr=spider&for=pc

新世界. (2021). 《风电已成全球趋势 政策促使印尼地区产业加快布局》. Retrieved from http://newsijie.cn/TouZiDiMobile/TouZiDiMenuInfo/12490/%E5%8D%B0%E5%BA%A6%E5%B0%BC%E8%A5%BF%E4%BA%9A/5/%E4%BA%A7%E4%B8%9A%E7%A0%94%E7%A9%B6

“一带一路”绿色发展国际联盟. (2021).《“一带一路”生物多样性重要区域及影响分析》. Retrieved from http://www.brigc.net/zcyj/yjkt/202011/t20201125_102825.html

一带一路网. (2020). 发展清洁能源，为墨中合作增添新亮色. Retrieved from https://www.yidaiyilu.gov.cn/xwzx/hwxw/143961.htm

一带一路网. (2021a). 赤道几内亚巴塔城市电网二期项目通过验收. Retrieved from https://www.yidaiyilu.gov.cn/xwzx/hwxw/172119.htm

一带一路网. (2021b). 中国—中东欧国家加强清洁能源合作. Retrieved from https://www.yidaiyilu.gov.cn/xwzx/hwxw/176073.htm

中国电力企业联合会. (2021). 中国电力统计年鉴 2020. 北京 ：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.

中国水泥协会. (2016). 中国水泥年鉴 2015.

中华人民共和国商务部. (2021). 2021 年前 8 个月越南水泥出口大幅增长，中国是第一大出口市场. Retrieved from http://vn.mofcom.gov.cn/article/jmxw/202109/20210903201836.shtml

免责声明

- 若无特别声明，报告中陈述的观点仅代表作者个人意见，不代表能源基金会的观点。能源基金会不保证本报告中信息及数据的准确性，不对任何人使用本报告引起的后果承担责任。
- 凡提及某些公司、产品及服务时，并不意味着它们已为能源基金会所认可或推荐，或优于未提及的其他类似公司、产品及服务。

Disclaimer

- Unless otherwise specified, the views expressed in this report are those of the authors and do not necessarily represent the views of Energy Foundation China. Energy Foundation China does not guarantee the accuracy of the information and data included in this report and will not be responsible for any liabilities resulting from or related to using this report by any third party.
- The mention of specific companies, products and services does not imply that they are endorsed or recommended by Energy Foundation China in preference to others of a similar nature that are not mentioned.