



双碳目标下我国货运需求变化以及对二氧化碳与大气污染物排放影响的研究

**Change of Freight Demand in China and its
Impact on Carbon Dioxide and Air
Pollutants Emissions Under Carbon Peak
and Neutrality Goals**

生态环境部环境规划院

2022 年 12 月 28 日

Chinese Academy of Environmental Planning

December 28, 2022

关于作者

吕晨 生态环境部环境规划院 碳达峰碳中和研究中心

雷宇 生态环境部环境规划院 碳达峰碳中和研究中心

蔡博峰 生态环境部环境规划院 碳达峰碳中和研究中心

张立 生态环境部环境规划院 碳达峰碳中和研究中心

朱淑瑛 北京化工大学

任家琪 北京师范大学

About the author

Chen Lyu Center for Carbon Neutrality, Chinese Academy of Environmental Planning

Yu Lei Center for Carbon Neutrality, Chinese Academy of Environmental Planning

Bofeng Cai Center for Carbon Neutrality, Chinese Academy of Environmental Planning

Li Zhang Center for Carbon Neutrality, Chinese Academy of Environmental Planning

Shuying Zhu Beijing University of Chemical Technology

Jiaqi Ren Beijing Normal University

致谢

本研究由生态环境部环境规划院统筹撰写，由能源基金会提供资金支持。

Acknowledgement

This report is a product of Chinese Academy of Environmental Planning and is funded by Energy Foundation China.

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.

目录

一、研究背景与内容.....	2
1.1 研究背景.....	2
1.2 研究内容.....	4
二、货运发展分析.....	4
2.1 发达国家货运发展趋势.....	4
2.2 中国货运发展趋势.....	9
三、研究方法.....	15
3.1 货运需求预测方法综述.....	15
3.2 基于行业的货运需求预测方法.....	17
3.3 研究范围.....	19
3.4 排放量核算方法.....	27
四、重点行业分析.....	30
4.1 行业发展现状.....	30
4.2 货物运输现状.....	50
4.3 货运量变化影响因素分析.....	60
4.4 重点行业产品产量预测方法.....	67
五、货运需求预测.....	71
5.1 宏观社会经济发展预测.....	71
5.2 重点行业发展趋势与货运需求预测.....	74
六、排放影响分析.....	102
6.1 全社会货运量预测.....	102
6.2 货运周转量预测.....	104
6.3 排放影响分析.....	107
七、政策建议.....	109
参考文献.....	112

一、研究背景与内容

1.1 研究背景

中国货运需求在过去二十年间迅速增长，公铁水航不同运输方式全面发展。交通运输是国民经济中具有基础性、先导性、战略性的产业，是重要的服务性行业和现代化经济体系的重要组成部分。近二十年间中国货运需求不断增长，货运产业高速发展，货运能力不断提升。2020 年全国营业性货运量达 473 亿吨，与 2000 年的 139 亿吨相比，增幅超过 240%^[1]。公铁水航不同运输方式全面发展，交通基础设施战略支撑能力不断增强。2020 年全国公路营运载货汽车保有量超过 1110 万辆、公路里程达到 520 万公里，分别是 2000 年的 2.3 倍和 3.1 倍，高速公路对 20 万人口以上城市覆盖率超过 98%，公路货运量在全国货运总量中的占比持续在 75%以上，“门到门”优势凸显。全国内河航道通航里程 12.8 万公里，拥有生产用码头泊位 20867 个，万吨级及以上泊位 2659 个，初步形成了长三角、津冀、粤港澳等世界级港口群。全国拥有运输船舶 12.6 万艘、净载重量 2.84 亿吨、集装箱箱位 288.4 万标准箱。全球港口货物吞吐量、集装箱吞吐量前 10 名的港口中，中国分别占 8 席和 7 席，水运运力规模和结构不断优化提升，已成为世界上具有重要影响力的水运大国。全国铁路营业里程达 15 万公里，其中高铁 4 万公里，铁路已经覆盖了全国 81%的县，高铁通达 93%的 50 万人口以上城市，基本形成了布局合理、覆盖广泛、层次分明、安全高效的铁路运输网络。民航运输规模快速增长，截至 2020 年底，我国境内运输机场 241 个，全国民航运输机场完成货邮吞吐量 1607 万吨，航空服务网络覆盖全国 92%的地级行政单元、88%的人口和 93%的经济总量^[2]。

交通运输成为二氧化碳与大气污染物排放的主要贡献者。以柴油、汽油、航空煤油等化石燃料为主体的交通工具不可避免的造成大量二氧化碳与大气污染物排放。2019 年我国交通二氧化碳（CO₂）排放量为 11.57 亿吨，在全国能源活动 CO₂ 排放量中的占比超过 11%。其中，乘用车 3.67 亿吨、商用车 5.86 亿吨、摩托车 0.25 亿吨、水运 0.74 亿吨、航空 0.93 亿吨、铁路 0.10 亿吨。分别占交通排放总量的 31.7%、50.7%、2.2%、6.4%、8.1%和 0.9%。公路排放约占总排放量

的 84.6%，是交通领域最大的排放源，以货运为主的商用车排放占比较高。受疫情影响，2020 年全国交通 CO₂ 排放下降至 10.8 亿吨，在全国能源活动碳排放总量中的占比仍在 10% 以上。与此同时，移动源污染已成为我国大中城市空气污染的重要来源，是造成细颗粒物、光化学烟雾污染的重要原因，机动车污染防治的紧迫性日益凸显。2020 年，全国机动车一氧化碳（CO）、碳氢化合物（HC）、氮氧化物（NO_x）和颗粒物（PM）排放量分别为 769.7 万吨、190.2 万吨、626.3 万吨和 6.8 万吨。汽车是污染物排放总量的主要贡献者，其排放的 CO、HC、NO_x 和 PM 超过 90%。以货运为主的柴油车 NO_x 排放量超过汽车排放总量的 80%，PM 超过 90%^[3]。交通运输尤其是货运已成为推进减污降碳协同增效的重点领域^[4]。

工业化进入中后期，经济由高速增长转向高质量发展。过去二十年间中国经济高速增长，“十五”时期（2001~2005 年）、“十一五”时期（2006~2010 年），“十二五”时期（2011~2015 年）和“十三五”时期（2016~2020 年）GDP 年均增速分别为 9.8%、11.2%、7.9% 和 5.7%，中国经济社会发展成效显著，经济总体实现了规划期保持中高速增长的目标。2020 年 GDP 总量达到 101.6 万亿元，是 2010 年的 2.4 倍，人均国内生产总值突破 1 万美元。经济高速增长的同时也拉动全国货运需求持续增长，“十五”期间货运量年均增速为 6.5%，“十一五”期间年均增速达到 11.7% 的最高值。随着中国经济发展进入新常态，经济由高速增长向高质量发展转变，经济增速明显放缓。与此同时，随着工业化进入中后期，第二产业增加值占 GDP 比重由 2001 年的 45% 下降至 2020 年 38%，第三产业成为经济发展新的驱动力。货运需求的增长速度也相应放缓，“十二五”期间和“十三五”期间货运量年均增速下降至 5.4% 和 2.7%，远低于 2001~2010 年。

“双碳”战略目标影响大宗商品货运需求。2020 年 9 月 22 日，中国宣布将力争于 2030 年前实现碳达峰，努力争取 2060 年前实现碳中和。“双碳”战略目标既是中国对国际社会的庄严承诺，也是推动高质量发展的内在要求。对于中国来说，实现“双碳”目标要付出比发达国家更加艰辛的努力，从碳达峰到碳中和的时间仅有 30 年左右，远低于欧盟、美国的约 67 年和 43 年，而且峰值水平是欧盟的 2.71 倍，美国的 2.07 倍，面临着比发达国家时间更紧、幅度更大、前所

未有的碳减排。“双碳”目标下整个经济社会发展方式将发生变革，对于工业影响尤为显著。电力、钢铁、水泥等传统的高能耗、高排放工业行业发展空间进一步收紧，不仅行业自身能源结构、产业结构、原料构成、生产方式、进出口贸易等将面临全面调整，对于燃料、原材料、工业产品、固体废物等上下游货运需求也将产生显著影响，并进一步影响交通运输领域能耗与排放状况。

1.2 研究内容

本研究以中国社会经济稳步高质量发展为背景，以 2030 年前实现碳达峰、2035 年实现美丽中国建设目标、2060 年实现碳中和为约束。以煤炭、焦炭、铁矿石、石灰石等大宗商品为研究对象，通过预测“双碳”目标下未来重点行业发展趋势，结合使用减量、效率减量、替代减量等因素，分析未来中国大宗商品货运需求变化，评估由于货运需求变化对于二氧化碳及大气污染物排放的影响，提出推动货运绿色低碳发展的关键举措与政策建议。

二、货运发展分析

2.1 发达国家货运发展趋势

经济转型可以分为制度转型和结构转型，经济转型往往会对下游货运产生重要影响。从历史变化情况来看，发达国家经济转型与货运需求之间呈现相似规律。在工业化初期，对煤炭、石油、钢铁、水泥、等大宗商品的运输需求大，同时铁路和水路发展迅速；随着工业化进程的推进，国民经济增长对于第二产业的依赖程度逐渐降低，大宗商品运量逐渐达峰，铁路和水路货运量增长放缓，公路货运量增长迅速；随着工业化进一步发展和现代化能力的加强，发达国家生产结构由资源密集型向劳动密集型、资本密集型和知识技术密集型产业转变，传统制造业外迁，对大宗原材料、燃料的运输需求逐步缩小，对于高时效、高附加值、小型化、轻量化商品的运输需求逐渐增加，对货物的运输提出了迅速、高校、方便、安全、门到门等更高的质量要求，运输方式趋于功能化与多样化^[5-7]。从能耗与排放角度来看，发达国家在全国碳排放总量达到峰值后，电力生产与热力供应、工业、制造业各部门碳排放量整体均有下降趋势，而交通领域尤其是货运部门碳排

放量和能耗总量仍长期维持在较高水平并有上升趋势，交通碳排放的占比达到全国碳排放总量的 25%~30%，逐渐形成与工业、建筑对碳排放的贡献率逐渐接近。

2.1.1 美国

美国的制造业经历了从基础原材料制造业到加工制造业再到高端制造业的变革。二战后的十年，钢铁是美国制造业的主导行业，随后近三十年间机械和汽车成为美国主导行业。1980 年以来，美国制造业重点转向以信息技术、生物医药为代表的高新技术产业，向着高端化、精细化和小型化的方向发展，计算机和电子产品占据美国制造业的主导地位。美国逐渐成为以金融业和高端服务业为支柱产业的国家，制造业占 GDP 的比重持续下降，传统制造业大量外迁，钢铁、汽车、化工等产业衰落，导致美国出现严重的产业空心化^[8]。2008 年金融危机爆发后，为重新提高制造业的国际竞争力，美国开始推行再工业化政策，通过政府的帮助来实现旧工业部门的复兴、现代化，并鼓励新兴工业部门的增长^[9]。

二战后制造业的发展极大提高了美国运输需求，20 世纪 80 年代以后，随着经济结构持续调整，去工业化以及低端制造业向着第三世界国家转移，运输需求由大宗工业原材料、农产品转向价值量更高的制造业产品和消费品。用户对运输服务质量更加关注，公路卡车运输由于时效性高、可靠性强，并且更加适应小批量的货物的门对门运输，在此阶段迅速发展。从全国货运总量来看，美国货运量在 1997~2007 年间持续上升，并于 2007 年达到阶段性峰值。由于受到融危机的影响，2007~2012 年间货运量持续下降，2012 年货运量较 2007 年下降约 10%，2012 至今货运量重新上升，货运价值量逐渐增长。2020 年 9 月，美国运输部颁布《国家货运战略规划》(National Freight Strategic Plan)，综合评估货运系统现状表现和发展制约，明确目标并提出战略任务，旨在改善美国的货运系统，强化安全可靠的供应链，增强美国的经济竞争力。《国家货运战略规划》分析美国的人口和经济正稳步增长，促进了货运需求的增加，预计 2022~2050 年美国货运需求将以年均约 1.2% 的增速持续增长，民航货运量增长最快，公路次之，管道、铁路和水运略有增长^[10,11]。从运输方式来看，公路是 750 英里以内首选的货运方式，运输方式以卡车为主；铁路是 750~2000 英里主要的货运方式，主要运输煤炭、

化工、农产品等大宗物资，铁路集装箱货运量快速增长；内河和沿海主要承担煤炭、原油和粮食等大宗商品及农用物资运输；民航主要承担高附加值远距离货运，枢纽化特征明显；管道主要运输原油、成品油和天然气制品等，是液体、气体能源的主要运输方式，2018年美国炼油厂原油的管道集运比例约为84%，天然气主要通过管道输送至加拿大和墨西哥。美国的交通部统计局（Bureau of Transportation Statistics，以下简称BTS）统计数据始于1997年，调查约10万家机构，覆盖采矿业，制造业，批发贸易，辅助设备（如仓库和配送中心），零售和服务贸易等行业。调查结果显示，2018年美国砂石、矿石、煤炭、石油天然气、粮食食品等大宗货物约占全社会货运量的65%以上，占全社会货物价值量的25.8%；电子产品、机动车、混合货物（食品为主）、汽油和机械等相对高价值货物占据全社会货运量的30%以上，占全社会货物价值量的58%；另外，国际贸易货运是货运系统的重要组成部分，进出口货运量约占全社会货运量的18%。

从碳排放变化来看，美国CO₂排放在2007年达到约56.9亿吨的峰值，随后逐年下降。交通运输一直是美国第二大排放部门，对碳排放总量的贡献率仅次于电力生产与热力供应部门。如图1所示，美国交通CO₂排放量在2007年达到约18.1亿吨的阶段峰值^[12]，2008~2012年间受货运量下降的影响交通CO₂排放量同样小幅下降，2012年后交通碳排放量出现反弹并持续增长，且随着其他部门排放量下降，交通在全国碳排放总量中的占比持续提高。2019年交通CO₂排放占比达到37%，超越电力生产与热力供应部门成为美国最大的CO₂排放部门。卡车的排放贡献率最高，其次是管道运输。在美国碳达峰后，电力热力生产、工业、居民生活等部门碳排放量均达到平台期或逐渐下降，交通排放量则持续增长，逐渐成为最大的排放源。一方面，美国通过发展先进技术，不断改善相关燃料技术与效率，减少单位燃料碳排放，另一方面，美国也通过对重点领域（卡车）相关政策的制定来降低交通碳排放^[13-16]。

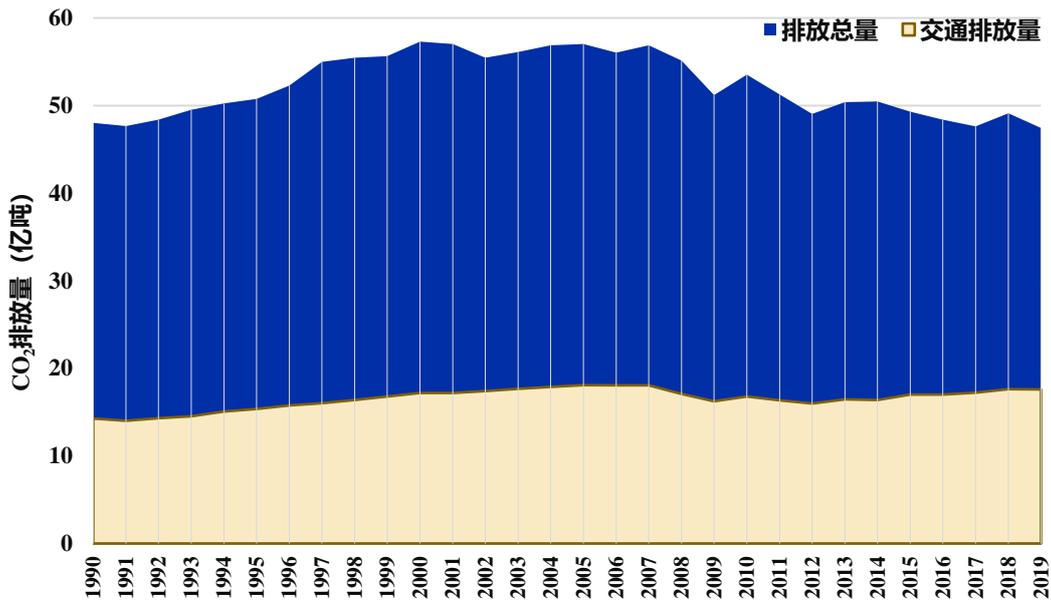


图 1 1990~2019 年美国碳排放总量与交通碳排放量

注：数据来源于国际能源署（IEA）

2.1.2 日本

第二次世界大战后日本经济受到重创，资源匮乏，在美国政府的扶持下，日本进行了大规模重建工作，政策投资向钢铁和煤炭产业倾斜，钢铁与煤炭行业迅速发展的同时带动其他产业发展。20 世纪 50~70 年代，日本经济飞速增长，成为全球第二大经济体，这一时期日本大力发展钢铁、造船、化学、电力、金属等以原材料为基础的重工业，这些产业不仅帮助日本经济迅速恢复，也为日本完成工业化进程夯实了基础。在经济高速增长期，日本政府及民间的设备投资迅速扩大，投资主要集中在钢铁、机械、电力、石油化学等基础工业部门^[17]。1973~1979 年间，石油危机使日本以重化学工业为支柱的产业结构发生变化，日本开始减少钢铁、石化、水泥等部门的生产，大力发展加工组装型和知识密集型产业，二十世纪 80 年代末至二十一世纪初，泡沫经济崩溃对日本产业发展给予沉重打击，同时也促使日本经济转型。2000 年后汽车产业、通信业、信息服务业成为日本经济发展的重要支柱，第一产业进一步萎缩，第二产业中家电、机械等行业大都陷于停滞，只有汽车行业、零配件等少数制造业呈现增长势头，第三产业高速发展，占生产总值 75%以上。

日本是亚洲第一个成功完成工业化并建立完善的现代综合交通网的国家。为

解决运力不足问题，日本先后五次制定的“全国综合开发计划”中，交通基础设施的建设始终占据重要地位^[18]。20世纪50~70年代，日本进行了大规模的高速公路网和新干线高速铁路网的建设，运输基础设施的供给短缺问题得以基本解决。经过20世纪70年代的两次“石油危机”后，日本逐步推进运输结构转型，将过分依赖公路运输的状况向发展沿海运输的转移。从货运量来看，如图2所示，日本货运量在2005年后整体下降，2008、2009年受全球金融危机影响货运量下降明显，2010年后出现反弹，之后各年份货运量在47~49亿吨之间波动。公路是日本货运的主要方式，水运次之，铁路在货运经济性上并无优势占比较低，民航货运量近年来持续增加，但占比较低。

从碳排放变化来看，日本CO₂排放在2013年达到约12.4亿吨的峰值，随后逐年下降。交通运输在1997年前后超过工业成为日本第二大排放部门。如图3所示，日本交通CO₂排放量在2001年前后达到约2.64亿吨的峰值^[12]，此后整体呈现下降趋势，2020年交通CO₂排放量为1.8亿吨，约占全国碳排放总量的18%。

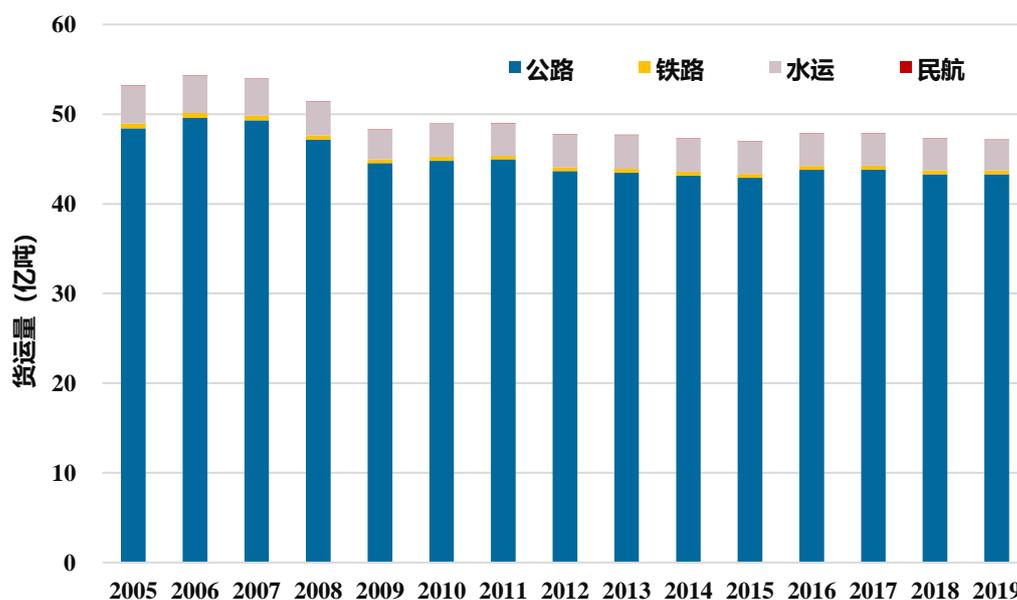


图2 2005~2019年日本货运量变化趋势

注：数据来源于国际能源署（IEA）

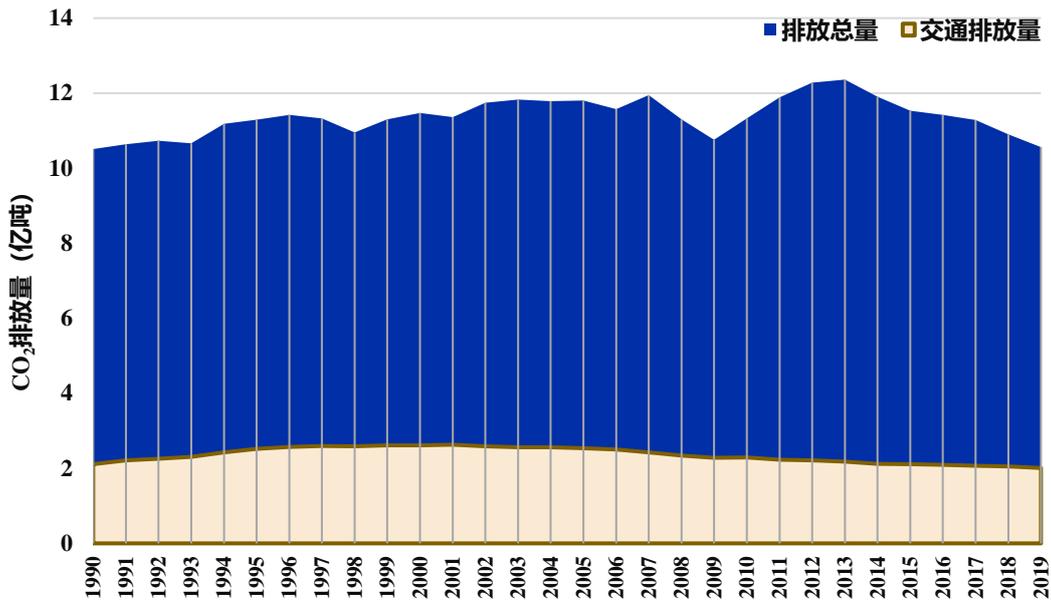


图 3 1990~2019 年日本碳排放总量与交通碳排放量

注：数据来源于国际能源署（IEA）

2.2 中国货运发展趋势

2.4.1 货运规模

过去二十年间，中国货运产业发展迅速，货运量持续增长。2001~2018 年间，全社会货运量以年均 8% 的增长率高速增长，2019 年由于统计口径的变更¹，货运量出现小幅下降。2020 年全国货运量为 473 亿吨，较 2001 年增长 333 亿吨，同比增长约 237%。货运量变化与全国经济增长展现出较强的相关性。如图 4 所示，进入二十世纪后，中国经济高速发展，“十五”时期 GDP 年均增速达 9.8%，货运量年均增速为 6.5%；“十一五”时期 GDP 年均增速 11.2%，货运量年均增速则达到历史最高的 11.7%；“十二五”、“十三五”时期中国逐步从工业化阶段向工业化中后期阶段过渡，经济发展方式由高速发展转向高质量发展，GDP 增速放缓，货运量增速则呈现阶梯下降。如图 5 所示，2020 年，公路、水路、铁路、航空和管道货运量分别为 342.6、76.2、45.5、0.1 和 8.6 亿吨，占比分别为 72.4%、

¹ 按照《交通运输部办公厅关于取消总质量 4.5 吨及以下普通货运车辆道路运输证和驾驶员从业资格证的通知》（交办运函[2018]2052 号），2019 年 1 月 1 日起各地交通运输管理部门不再为总质量 4.5 吨及以下普通货运车辆配发道路运输证，货运车辆数相应同比下降。

16.1%、9.6%、0.1%和 1.8%。公路是中国首要的货运方式，近二十年公路货运量持续增长且在全国货运量中的占比一直在 72%以上，2012 年达到 78%的历史最高值，近年来随着“公转铁”、“公转水”等货运结构调整政策的推进，公路货运量仍然增长但占比下降；水路货运量仅次于公路，水路货运量所占比重由 2001 年的 9%增长至 2021 年的 16%，呈现持续增长态势；本世纪初期，由于公路运输欠发达，铁路货运量占比在 14%左右，随着中国高速路网逐步完善，货运车辆保有量持续增长，铁路货运量虽继续增长，但占比整体下降。近年来高铁的迅速发展，“八纵八横”高铁网逐步贯通，铁路货运量占比呈现反弹势头；管道运输广泛用于石油、天然气的长距离运输，在货运量中的占比稳定在 1.4%~2%；航空货运以运输长距离、高附加值、高时效性、轻重量的货物为主，近年来随着网购快递商品的兴起，航空快运得以迅速发展。

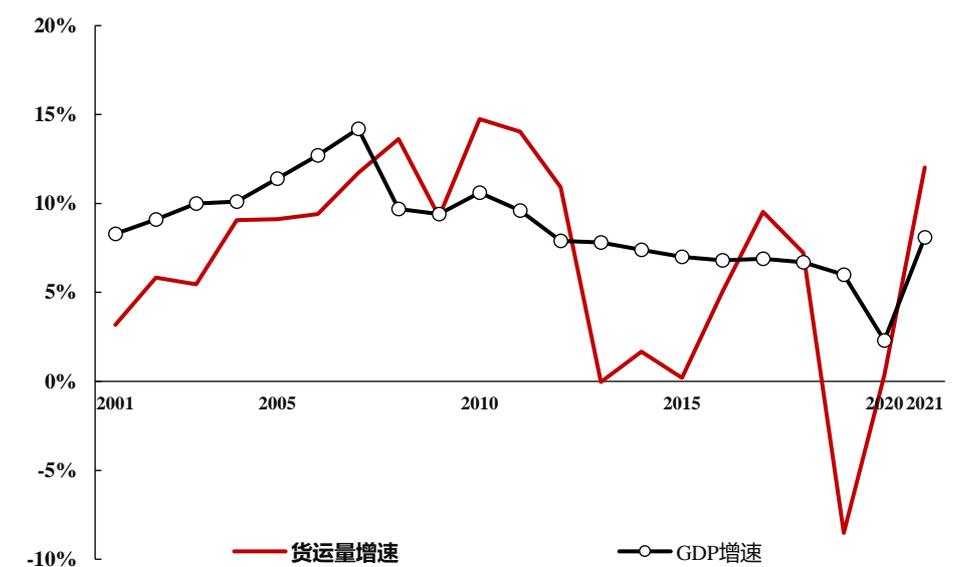


图 4 2001~2021 年中国货运量增速与 GDP 增速变化

注：数据来源于国家统计局

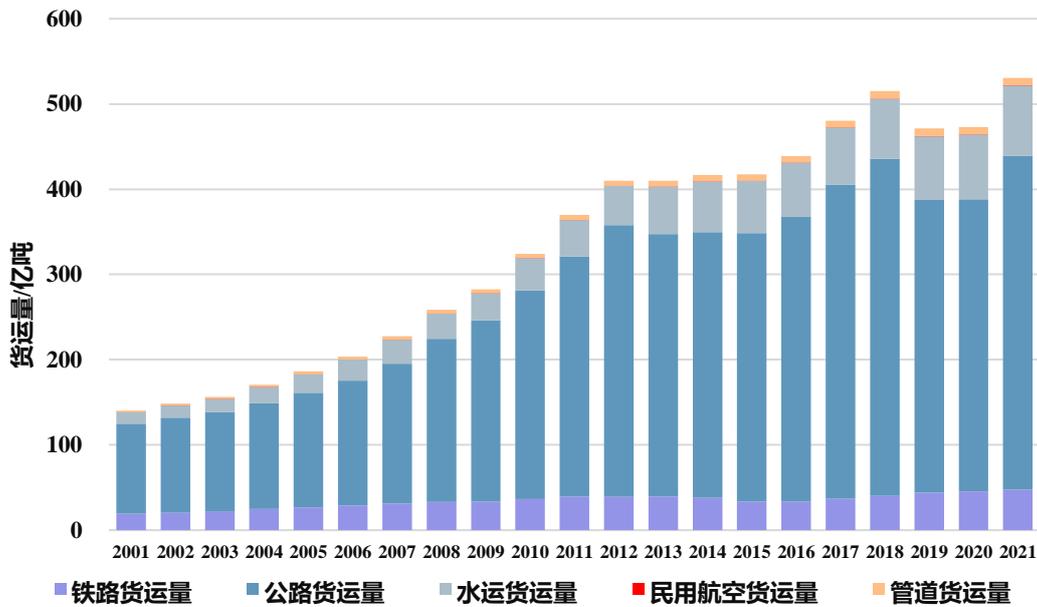


图 5 2001~2020 年中国货运量变化趋势

注：数据来源于国家统计局

2.4.2 货运距离

如图 6 所示，中国货物运输平均运距整体呈增长趋势，1990~2007 年间平均运距年增长率为 3.1%，由 1990 年的 270km 上升至 2007 年 446km。2007 年后小幅下降，2007~2020 年全国货物平均运距在 397~438km 之间波动，2020 年全国货物运输平均运距为 428km。不同运输方式之间运距差别明显，公路平均运距在 2013 年前持续增长，之后在 174~184km 间波动，2020 年公路平均运距为 176km，在各种运输方式中运距最短；铁路平均运距在 2008 年前持续增长，之后整体下降，2020 年铁路平均运距为 670km。如图 7 所示，焦炭、钢铁及有色金属、石油的铁路运距相对较长，矿建材料、水泥运距相对较短。水路运距自 2007 年后明显下降，2008~2020 年间在 1390~1806km 之间波动，2020 年水路货运平均运距为 1390km；航空货运距离呈现明显增长趋势，2020 年航空货运平均运距达到 3550km，充分发挥远距离运输的优势。

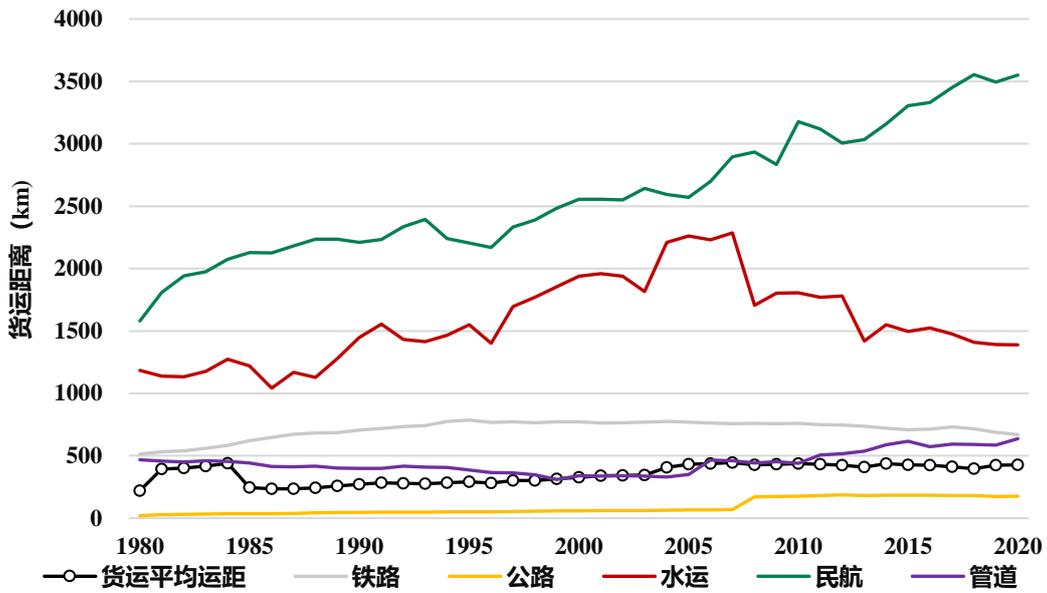


图 6 1980~2020 年中国公铁水航管道货物运输平均运距

注：数据来源于国家统计局

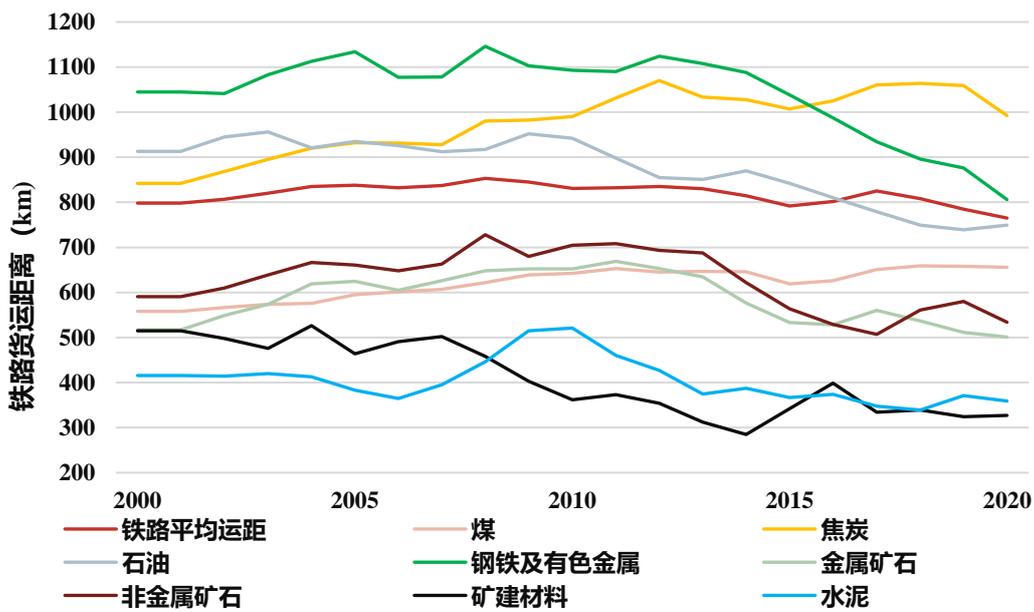


图 7 2000~2020 年中国按货类分铁路平均运距

注：数据来源于中国统计年鉴

2.4.3 货运排放

工业、交通和建筑是中国化石能源消耗及 CO₂ 排放最高的三大领域。交通领域(含社会车辆)石油消费占我国石油终端消费的比例约为 60%左右, 2013~2019 年之间, 交通 CO₂ 排放量以年均 3.4%的增速持续增长, 是我国碳排放增长最快的领域。2020 年受疫情影响交通排放小幅下降, 2021 年明显反弹。从排放构成

来看，如图 8、图 9 所示，2019 年我国交通 CO₂ 排放量为 11.6 亿吨，其中，商用车、乘用车、摩托车、水运、航空和铁路排放分别占交通排放总量的 50.7%、31.7%、2.2%、6.4%、8.1%和 0.9%。以货运车辆为主的商用车占交通碳排放总量的 50%以上，是整个交通运输行业节能减排的关键。与此同时，移动源污染已成为我国大中城市空气污染的重要来源，是造成细颗粒物、光化学烟雾污染的重要原因。2020 年，全国机动车 CO、HC、NO_x 和 PM 排放量分别为 769.7、190.2、626.3 和 6.8 万吨。以货运为主的柴油车 NO_x 排放量超过汽车排放总量的 80%，PM 超过 90%^[3]，货运已成为中国 CO₂ 与大气污染物排放的关键部门。

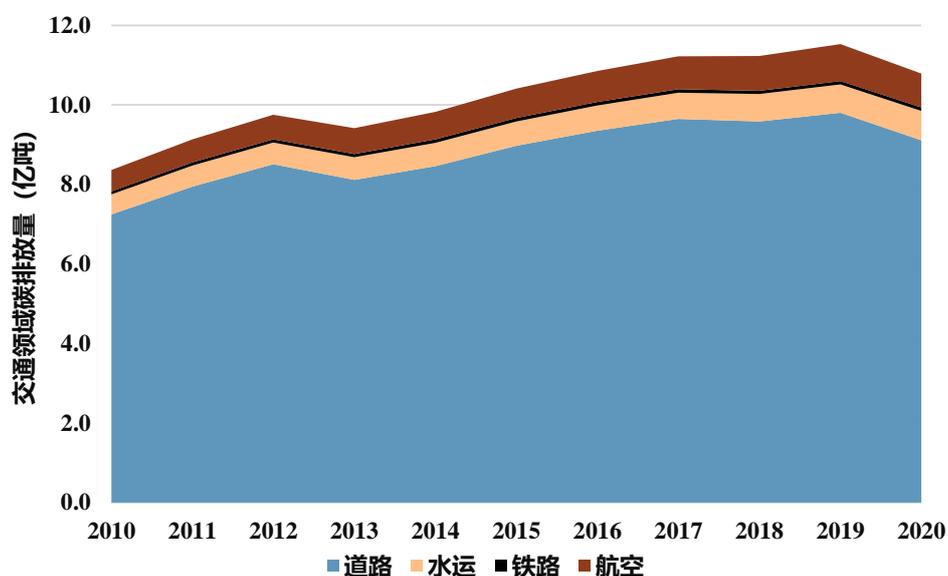


图 8 2010~2020 年中国交通 CO₂ 排放变化

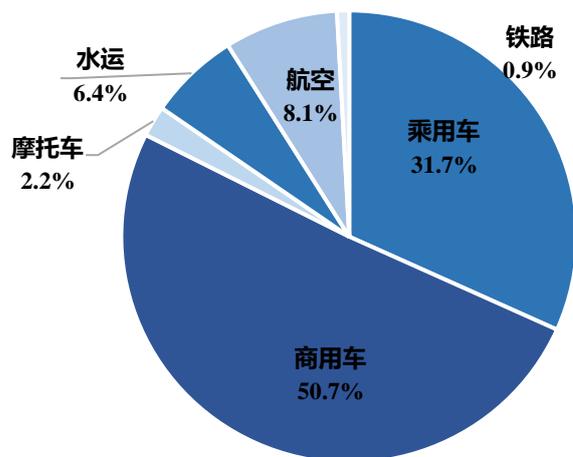


图 9 2019 年中国交通 CO₂ 排放构成

2.4.4 货运发展规划

中国经济已由高速增长阶段转向高质量发展阶段，处在转变发展方式、优化经济结构、转换增长动力的攻关期。预计中国将于 2030 年前后将全面实现工业化，城镇化率达 70%，未来中国经济仍将持续发展，工业化、城镇化进程持续推进，货运需求仍将保持高位。与此同时，随着“双碳”战略目标的提出，能源结构、产业结构、原料构成、生产方式等面临全面调整，火电、钢铁、水泥、煤化工、铝冶炼等传统高能耗、高排放行业发展空间逐渐收紧，大宗商品货运需求未来一段时期预计仍有增长趋势但增速放缓。外贸货物与邮政快递业务量高速增长，高价值、小批量、时效强的货运需求快速攀升，集装箱货运量增长明显，共同拉动中国货运需求保持增长态势。《国家综合立体交通网规划纲要》提出，到 2035 年，基本建成国家综合立体交通网，到本世纪中叶全面建成现代化高质量国家综合立体交通网，并预测 2021 至 2035 年全社会货运量年均增速为 2%左右，邮政快递业务量年均增速为 6.3%左右。按照规划目标，如图 10 所示，到 2035 年全国货运量大约增长至 637 亿吨，较 2020 年增长约 164 亿吨，增幅为 35%左右^[19]。

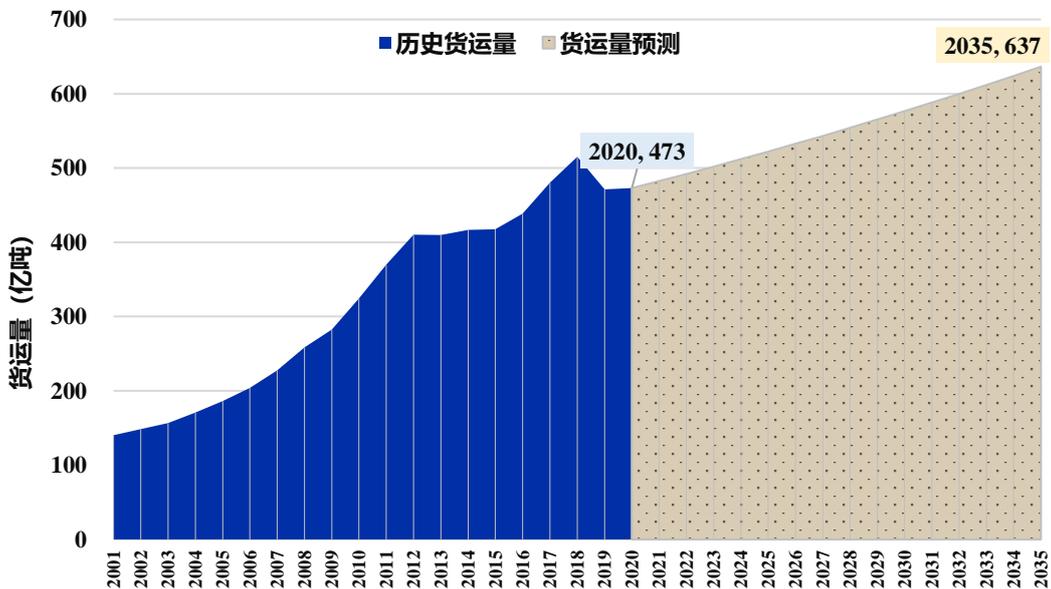


图 10 中国未来货运量预测

注：数据来源于《国家综合立体交通网规划纲要》

三、研究方法

3.1 货运需求预测方法综述

社会经济活动所产生的运输需求是以运输量形式反映出来的，运输量是运输需求与运输供给、服务水平的相互作用结果，即在现有运输能力的条件下所实现的运输需求。运输需求中能够实现的部分即运输量，未被实现的部分即为潜在运输需求，对于潜在运输需求的预测是交通运输系统规划中的关键内容，直接影响规划方案的可行性。交通运输规划中运输需求预测的任务和目的包括衡量总体运输需求发展水平以及分析运输需求的空间分布及其动态变化状况，为路网空间布局提供支撑^[20]。货运需求受供给侧因素和需求侧因素共同影响，影响因素包括区域经济发展水平、产业结构与产品结构、能源结构、地理位置、空间格局、运输网络基础设施的数量与质量、运输价格波动情况、进出口贸易关系等^[21-25]。以往货运需求的预测分析往往建立在对目标地区货运现状 O—D 调查的基础上，依据社会经济发展规划、基础设施建设规划等预测各节点货运量。该方法需要大量数据支撑，所需数据往往难以获取。因此研究人员采取多种不同方法试图更加科学、准确、高效的预测货运需求，主要分为定性和定量预测两类。

(1) 定性预测方法。指以少量历史数据与未来规划作为参考，分析影响货运需求的主要因素，结合交通行业专家学者工作经验对未来货运需求进行预判。预测快速直观但难以定量预测，结果准确度不高、存在片面性且缺乏理论依据。国内外一般定性预测方法包括专家评估法、直观概率法、德费尔法等。在实际应用过程中定性预测法往往与定量预测法相结合，作为某些具体参数的判断依据。

(2) 定量预测法。指在历史统计数据的基础上，利用数理统计的方法建立模型预测未来发展状况，应用较广的方法包括时间序列法、投入产出模型法、分行业预测法、空间互动作用模型法、机器学习法等。

1、时间序列分析法。时间序列是变量按时间间隔顺序形成的随机变量序列，时间序列分析就是估算和研究某一时间序列在长期变动过程中所存在的统计规律性。基于历史数据发掘参数关联性与变化规律，也称为外推法或历史引申法。时间序列分析法主要有移动平均法、加权平均法、指数平滑法、趋势预测法、数

学模型法等^[26-28]。

2、投入产出模型法。投入产出法又称为部门联系平衡法，它以矩阵形式描述国民经济各部门在一定时期生产活动的投入来源和产出使用去向，揭示国民经济各部门之间相互依存、制约的数量关系。由于以往方法无法建立货运需求与各部门生产之间直接与间接的联系，研究人员基于投入产出法建立货运需求预测模型，以实现经济总量分析与产业部门分析相结合，使货物运输需求方法能够更全面、更系统，从而更科学地解释货物运输需求产生、发展的内在关系。基于投入产出法的货物运输需求预测方法不仅能够研究经济发展所产生的货物运输需求，而且深入产业部门，把握各产业部门发展对货物运输需求的影响程度。提供了定量的分析研究运输业与其他部门的直接关联和间接关联的途径^[29-32]。

3、分行业货运需求预测法。由于在大多数地区中货运需求主要由该地区内各个行业的运输需求构成，例如农业、工业和商业等，少数几个行业的发展趋势对于未来货运需求产生重要影响。研究人员使用分行业货运需求预测方法，从行业发展角度出发，通过收集各行业生产分布与生产规模，各行业货运量、运输方式与货类，各行业总产值、物质消耗量、投资总额等社会经济指标，各行业基准年份不同货类 O—D 矩阵分布等数据，结合各行业未来发展趋势与物质需求分行业预测货运预测，并累加得到区域内部总体货运需求。该方法减少了交通调查的计算量和工作量，对于预测规划区域内货运需求变化是有效的方法^[33-34]。

4、空间互动作用模型法。空间互动作用模型属于集聚性的宏观分析方法，一般根据空间不同地点超额货物和短缺货物相互流动规律建立模型，常用的有空间价格均衡模型、空间互动重力模型和运输优化模型等。

5、机器学习法。由于货运量影响因素繁多，预测结果具有较大不确定性，基于机器学习的预测方法逐渐被应用。通过对样本数据分析得到数据关联关系，并利用所得规律对未知数据进行预测，没有了现有模型的假设前提的限制，实现误差规避。常用的机器学习预测方法包括灰色预测法、神经网络预测法、支持向量机法以及系统动力学模型等^[35]。其中，灰色系统理论解决了连续微分方程的建模问题，灰色系统观点认为任何随机过程都是在一定幅值范围、一定时区内变化的灰色过程，灰色过程是通过原始数据的整理来寻找数的规律。研究人员大量应

用灰色 GM(1,1)模型，在历史数据的基础上生成一次累加生成数列，构建灰微分方程，根据事前检验、残差检验、后验差检验和滚动检验的验证结果，预测货运需求变化。从适用对象和范围来看，灰色预测模型限制条件少，通用性强，适用于短期以及中长期预测^[36-38]。神经网络预测法模仿函数能力强，可以实现非线性映射，但是该模型所需样本数量太大，通用性不高，计算过程过于复杂并容易陷入“维数灾难”。研究人员将神经网络预测方法应用于货运需求预测，基于历史货运相关样本数据，首先把学习样本分成两部分，用前一部分样本进行拟合训练，利用所得的网络预测第二部分样本，计算预测误差，进行网络结构调整。直到预测精度不再有显著提高时确定神经网络的基本结构。利用得到的神经网络对全部学习样本进行训练，得到该学习样本的神经网络预测模型。最后利用所得到的网络模型进行预测。神经网络预测模型适用对象广，尤其对于运输需求与影响因素存在复杂的非线性关系的情况下效果比较明显，适用于短期预测，近年来应用尤为广泛^[39-41]。支持向量机是建立在统计学习理论的 VC 理论和结构风险最小原理基础上的一种新型理论，它在解决小样本、非线性及高维模式识别等问题中表现出特有优势。支持向量机预测法专门针对有限样本，理论上能得到现有信息下最优预测值，但是该方法模型的核函数及其参数以及损失函数的选择目前尚没有确定的方法和结论，因此支持向量机理论上的优点在实际应用中往往难以实现^[42-43]。

3.2 基于行业的货运需求预测方法

对比以上模型方法的利弊，本研究立足重点行业对于不同大宗货类的运输需求，采用基于行业的货运需求预测方法，分析预测“双碳”战略目标下中国大宗商品货运需求变化，采用该方法的理论基础与原因如下：

（1）区域货运需求主要受少数重点行业影响，且重点行业与其他行业之间存在上下游产业关联，区域内重点行业与支柱产业往往拉动相关产业的聚集与发展，重点行业发展趋势对货运需求变化起决定性作用；

（2）重点行业生产过程所需要的燃料、原材料以及产品类型相对稳定，导致其货类需求稳定，差别主要在于工艺流程与能效水平。例如火电企业产品均为发电量或供热量，燃料均以燃煤、天然气为主，差别在于机组类型、装机容量、

机组效率等不同造成的单位发电煤耗差异。由于重点行业物料消耗类别相对稳定，能够基于主要产品产量与单位产品运输需求作为预测未来各货类运输需求的关键参数：

(3) 重点行业对于能源消费、原料购入、产品产量的数据统计相对健全，能够提高货运需求预测的准确性。

本研究的研究框架如图 11 所示，包括目标货类识别、重点行业筛选、行业现状分析、行业发展预测、货运量变化分析、周转量变化分析以及排放量核算 7 个模块，从重点行业发展现状与货运需求现状入手，基于未来各行业发展趋势与产品产量变化，分行业分货类预测未来大宗商品货运量变化。

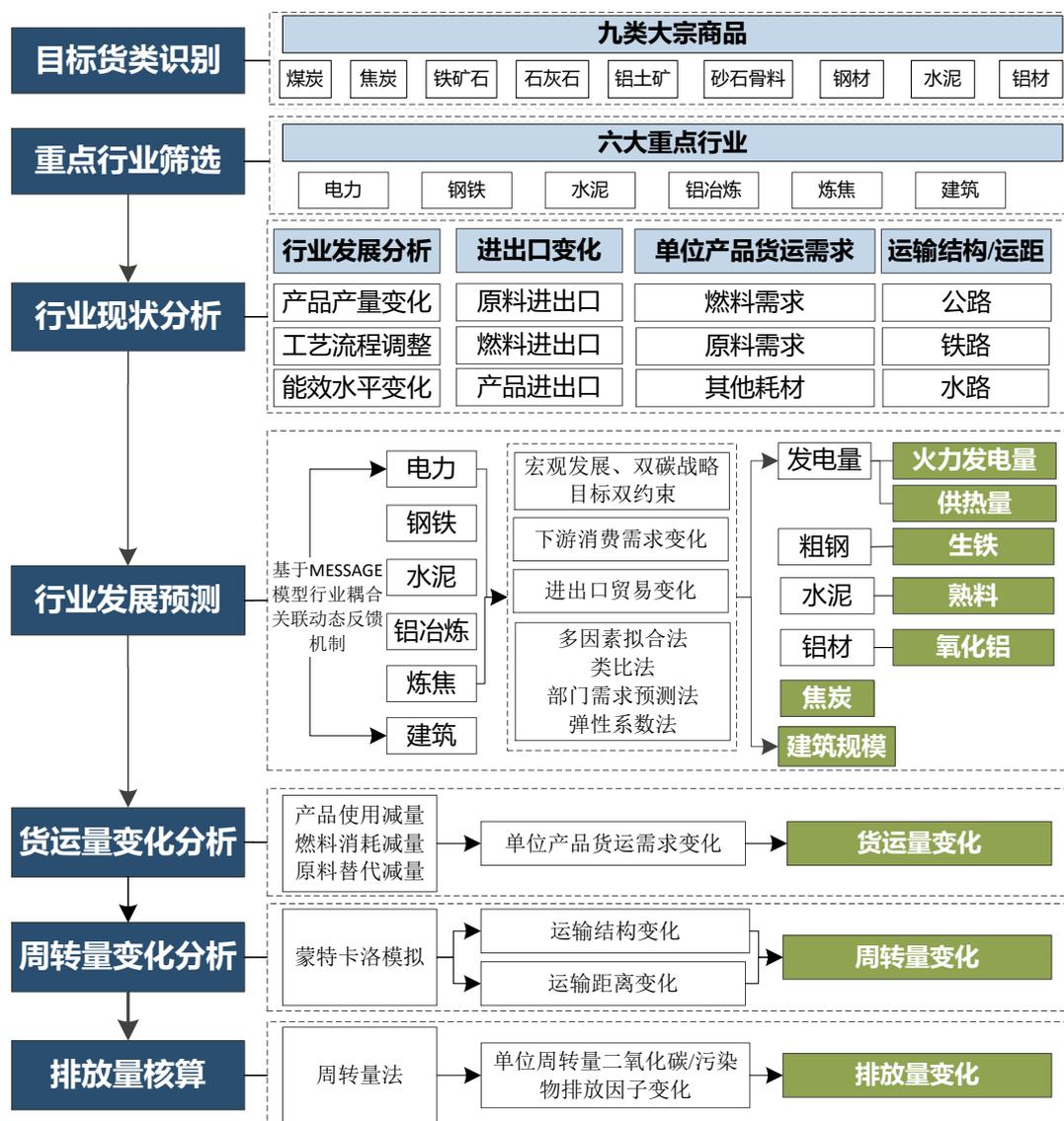


图 11 研究框架

3.3 研究范围

3.3.1 目标货类识别

大宗商品是指可进入流通领域，但非零售环节，具有商品属性并用于工农业生产与消费使用的大批量买卖的物质商品。在金融投资市场，大宗商品指同质化、可交易、被广泛作为工业基础原材料的商品。大宗商品可分为三类，即能源商品、基础原材料和农副产品。大宗商品运输具有大规模、大批量、以长距离运输为主、时效性要求低、附加值较低、联合运输为主、重量大、重载化需求高等特点。

大宗产品长期是中国货运的主体。2020年，全国公路、铁路、水路货运总量达464.3亿吨，三种运输方式合计贡献了货运总量的98.2%，三种运输方式的运输货类主体均为大宗商品。2020年，全国营业性货运车辆完成货运量342.6亿吨，占全国货运总量约72.4%，根据交通运输部《2019年道路货物运输量专项调查公报》对全国85547家拥有50辆及以上货运车辆的企业货运状况的调查^[44]，如图12所示，在公路货运的货类构成中，矿建材料及水泥占比达到38.7%，是公路运量最大的货类，煤炭及制品、金属矿石占比分别为12.6%和7.1%，三类大宗商品合计约占公路货运量的58.4%，是公路运输的主体。2020年铁路货运量45.5亿吨，占全国货运总量约9.6%。根据《中国统计年鉴2021》统计，如图13所示，铁路运输货类以大宗商品为主，煤炭、金属矿石、钢铁及有色金属、矿建材料、石油、焦炭、非金属矿石和水泥分别占铁路货运量的37.3%、10.8%、5.0%、2.8%、2.4%、2.0%、1.8%和0.5%，合计约占62.6%。2020年水路货运量合计76.2亿吨，占全国货运总量约16.1%。根据《中国统计年鉴2021》统计，2020年沿海港口吞吐量94.8亿吨，内河港口吞吐量50.7亿吨，合计145.5亿吨。海运同样以大宗能源、原材料商品为主。如图14所示，在沿海及内河港口吞吐量分货类构成中，煤炭及制品、矿建材料、金属矿石、钢铁、非金属矿石、水泥分别约占水运总吞吐量的18.4%、17.7%、16.8%、4.8%、3.7%、3.2%，合计约占水运总吞吐量的64.6%，大宗商品在公路、铁路、水路运输货类中的占比均在60%以上。

大宗商品过去十年间产销量持续增长，是促进货运需求增长的重要驱动力。过去十年间中国经济高速发展，现代化建设取得重大成就，工业化、城镇化持续

推进,全社会用电需求以及钢材、水泥、铝材等工业产品产量与消费量持续提升。2020年中国火力发电量达到5.2万亿千瓦时,钢材、水泥、原铝(电解铝)产量分别达到13.2亿吨、23.9亿吨和3708万吨,较2010年分别增长2.2万亿千瓦时、5.2亿吨、5.1亿吨和2131万吨,增幅分别为75%、65%、27%和135%。产品产量持续提升导致生产过程所消耗的煤炭、焦炭等化石燃料以及铁矿石、石灰石、铝土矿等原材料消费量持续增长,是拉动下游货运需求的重要驱动力。

大宗商品产量消费量与行业发展紧密相连,“双碳”战略目标下供需关系发生深刻变化。未来10年是中国基本实现现代化关键阶段,工业化、城镇化、信息化等多重发展带来能源消费与碳排放增长刚性压力。“双碳”战略目标下,未来中国经济发展方式、能源结构和产业结构将面临全面调整,煤炭等化石能源消费量将逐步降低,钢铁、水泥、石化、建材等传统高耗能高排放产业的发展空间将进一步收紧。大宗商品所对应的行业大多为高排放、高能耗重点工业行业,“双碳”战略目标下供需关系将发生深刻变化,进而对下游货运需求产生重要影响。

因此,本研究综合公铁水航货运比例、产业关联性、数据可获得性以及“双碳”战略影响等因素,选取煤炭、焦炭两类大宗能源商品,砂石骨料、铁矿石、石灰石、铝土矿四类大宗原材料以及钢铁、水泥、铝材三类大宗商品共9类大宗商品作为本研究的目标货类。其余大宗货类(如石油及天然气制品、木材、粮食、农副产品)以及其他货类(如集装箱、轻工医药产品、鲜活农产品等)不作为本研究重点。

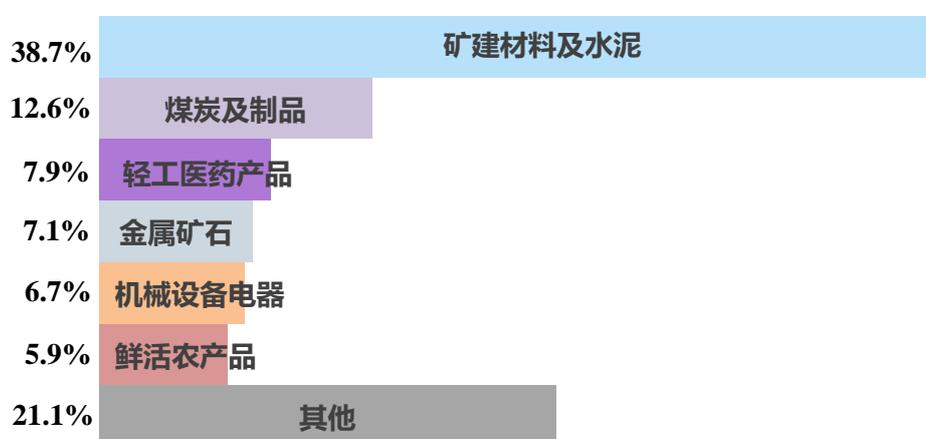


图 12 2019 年公路运输货类占比

注：数据来源于《2019 年道路货物运输量专项调查公报》

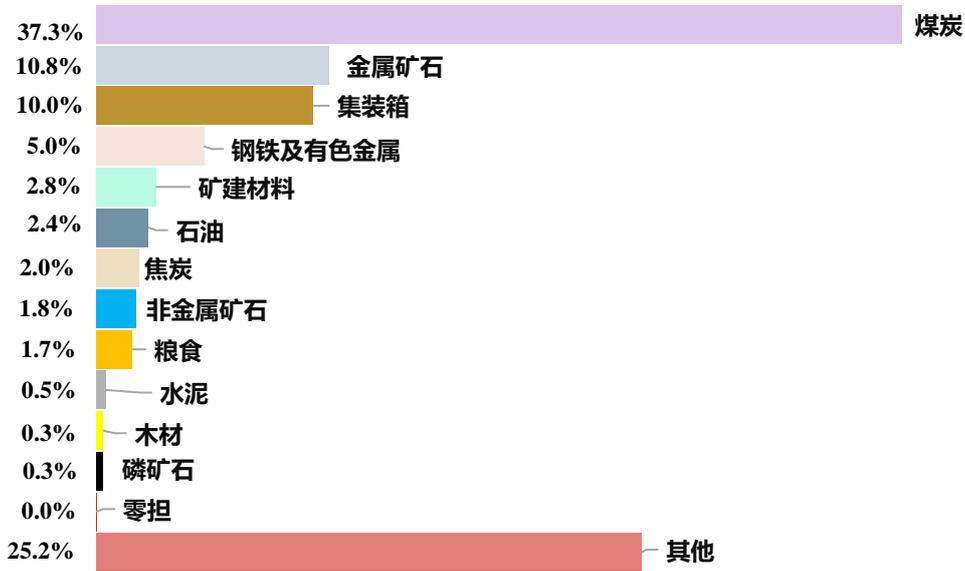


图 13 2020 年铁路运输货类占比

注：数据来源于《中国统计年鉴 2021》

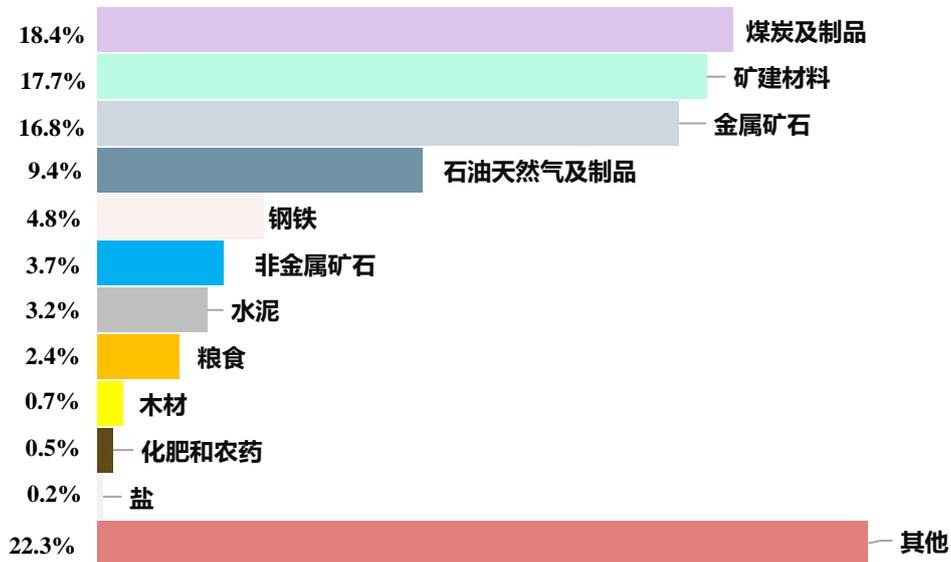


图 14 2020 年沿海及内河港口吞吐量货类占比

注：数据来源于《中国统计年鉴 2021》

3.3.2 重点行业筛选

煤炭是中国最重要的基础能源和工业原料，在能源消费总量中的占比约 57%。2020 年中国煤炭消费量约 40.5 亿吨，约占全球煤炭消费量的 54%。从煤炭消费

结构来看，如图 15 所示，约 61%的煤炭用于火电行业，炼焦、钢铁、水泥和电解铝等工业行业煤炭消费量占比分别为 16%、8%、5%和 1%，建筑领域（包含居民生活、服务业等）煤炭消费量约占 3%。因此，6 大行业 2020 年煤炭合计消费量约 38.3 亿吨，占据煤炭消费总量的 94.6%。其余 2.2 亿吨煤炭主要用于农业以及工业原料。因此，未来煤炭消费量及货运需求基于火电、炼焦、钢铁、水泥、电解铝、建筑 6 大行业发展趋势分行业预测。

焦炭是由炼焦煤在焦炉中经过高温干馏转化而来，作为还原剂、能源和供炭剂主要用于高炉炼铁和用于铜、铅、锌、钛、锑、汞等有色金属的鼓风炉冶炼，起还原剂、发热剂和料柱骨架作用。如图 16 所示，2020 年中国焦炭消费总量约 4.8 亿吨，其中钢铁行业高炉炼铁的焦炭消费量约 4.1 亿吨，占全国焦炭消费总量的 85%，其余 8%用于化学原料及化学制品制造业，7%用于非金属矿物制品业、有色金属冶炼等其他行业。因此，未来焦炭消费量及货运需求基于钢铁行业发展趋势预测。

铁矿石是含有铁单质或铁化合物能够经济利用的矿物集合体，是钢铁生产企业的重要原材料。在自然界中主要以多种铁化合物的形式存在，形成了包括磁铁矿、赤铁矿、褐铁矿、菱铁矿等多种多样的铁矿石种类。矿石的铁含量是决定矿石能否直接冶炼的关键指标，一般品位（含铁量）低于 50%的铁矿石需要经过选矿才能冶炼利用。2020 年中国铁矿石表观消费量约 14.3 亿吨，约占全球铁矿石消费量的 67.7%。如图 17 所示，超过 99.6%的铁矿石用于钢铁生产，通过对铁矿石破碎、磨碎、磁选、浮选、重选等工序作为冶炼生铁的主要材料，此外极少数赤铁矿用于制造红颜料和磨料，极少数钛铁矿用于化工和石油部门。因此，未来铁矿石消费量及货运需求基于钢铁行业发展趋势预测。

全球 90%~95%的铝土矿被用于生产原铝，根据矿物成分铝土矿可分为一水硬铝石型、一水软铝石型和混合型。2020 年中国铝土矿消费量约 2.04 亿吨，如图 18 所示，约 89%的铝土矿用于铝冶炼行业，通过对铝土矿溶解、过滤、酸化和灼烧等工序提炼出氧化铝，然后通过电解熔融方式制备电解铝。其余 11%铝土矿用于耐火材料、研磨材料、化学制品和高铝水泥^[45-46]。因此，未来铝土矿消费量及货运需求基于铝冶炼行业发展趋势预测。

石灰石作为常见的非金属矿产应用极为广泛，在现代工业中石灰石是制造水泥、石灰、电石的主要原料，也是冶金工业中重要的熔剂，同时优质石灰石经过超细研磨后应用于纸制品、橡胶、油漆、饲料、医药等制造。据不完全统计，2020年中国石灰石消费量约 32.4 亿吨，图 19 所示，水泥行业熟料过程生产消耗石灰石约 19 亿吨，占比约 59%，钢铁生产过程中石灰石作为熔剂使用量约 1.8 亿吨，占比约 6%，水泥与钢铁行业石灰石消耗量合计约占全国石灰石消耗量的 62%。因此，未来石灰石消费量及货运需求基于水泥、钢铁两大行业发展趋势预测。

砂石骨料是指水利工程中砂、卵（砾）石、碎石、块石、料石等材料的统称，是各国建筑、道路、桥梁、水利等基础设施建设不可或缺、不可替代且用量最大的原材料，是目前全国需求最大的货类^[47]。据不完全统计，图 19 所示，中国每年用于混凝土的砂石骨料约 150 亿吨，加上沥青混凝土、水处理等其他用量，每年接近 200 亿吨，产量与用量均居世界首位。基于建筑领域的城镇居住建筑、城镇公共建筑、农村建筑未来发展趋势预测未来砂石骨料消费量及货运需求。

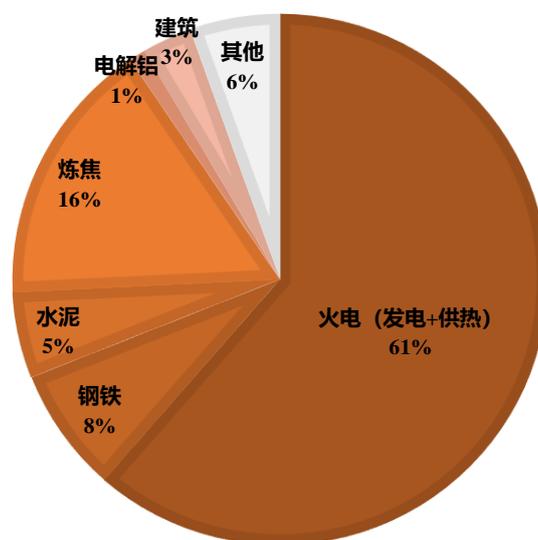


图 15 2020 年煤炭消费行业分析

注：数据来源于《中国统计年鉴 2021》、中国碳情速报研究（China Carbon Watch, CCW）

等

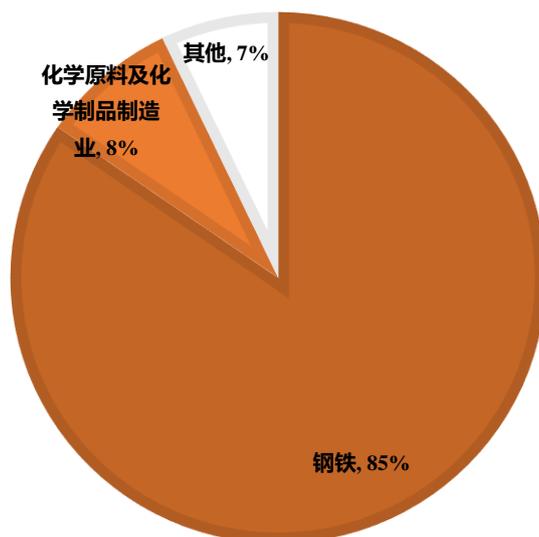


图 16 2020 年焦炭消费行业分析

注：数据来源于《中国统计年鉴 2021》、中国碳情速报研究（China Carbon Watch, CCW）

等

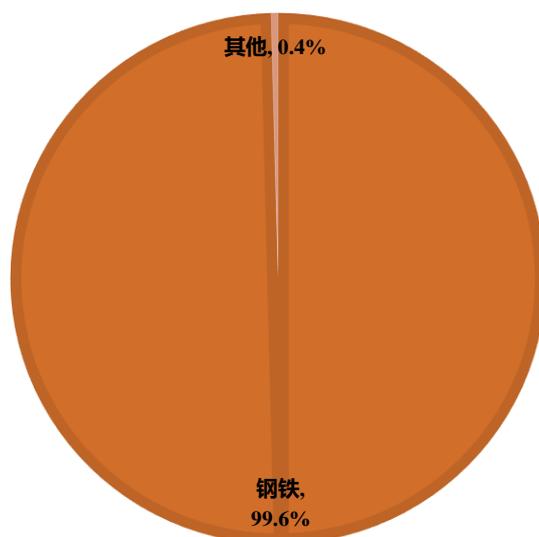


图 17 2020 年铁矿石消费行业分析

注：数据来源于《中国统计年鉴 2021》、中国碳情速报研究（China Carbon Watch, CCW）

等

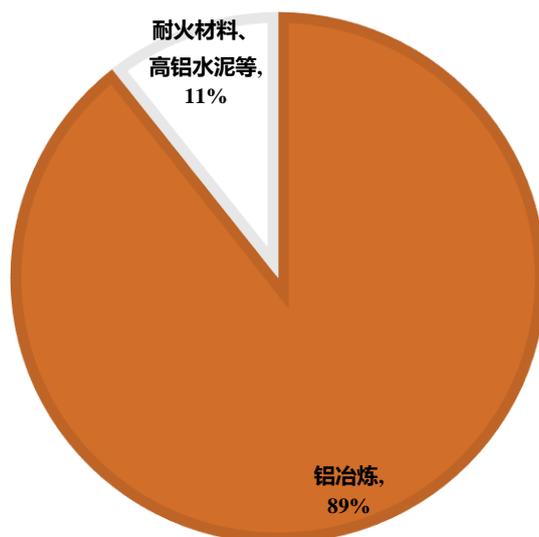


图 18 2020 年铝土矿消费行业分析

注：数据来源于《中国统计年鉴 2021》、中国碳情速报研究（China Carbon Watch, CCW）、中国有色金属工业协会等

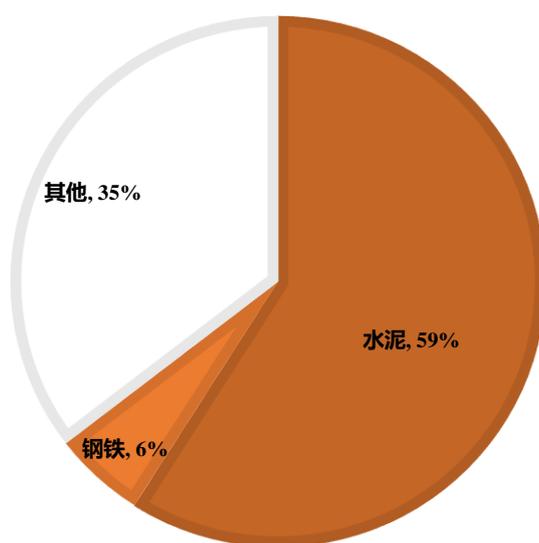


图 19 2020 年石灰石消费行业分析

注：数据来源于《中国统计年鉴 2021》、中国碳情速报研究（China Carbon Watch, CCW）等

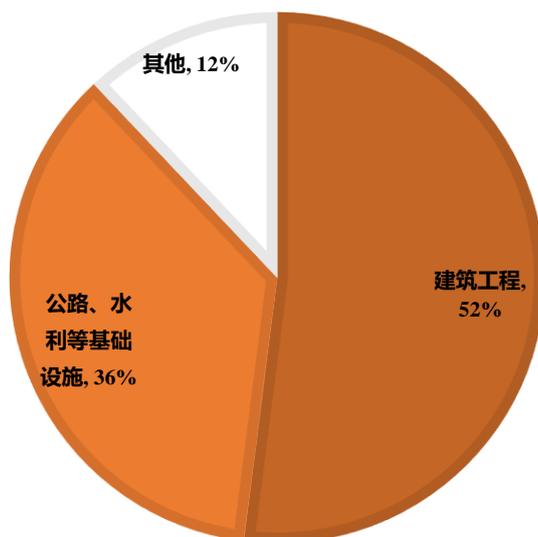


图 20 2020 年砂石骨料消费行业分析

注：数据来源于《中国统计年鉴 2021》、中国碳情速报研究（China Carbon Watch，CCW）等

2020 年我国二氧化碳直接排放量约 115.5 亿吨，电力（40%）、钢铁（14%）、水泥（11%）、炼焦（1%）、铝冶炼（1%）5 个行业以及建筑领域（6%）碳排放合计贡献率超过 72%^[48]，是化石能源消费与碳排放重点行业，也是实施减污降碳措施的关键行业。2021 年，国务院印发《2030 年前碳达峰行动方案》，针对电力行业提出严格控制新增煤电项目，加快煤炭减量步伐，加快建设新型电力系统。大力发展新能源，到 2030 年风电、太阳能发电总装机容量达到 12 亿千瓦以上^[49]。2022 年，工信部等三部门联合印发《工业领域碳达峰实施方案》，明确提出到 2025 年，规模以上工业单位增加值能耗较 2020 年下降 13.5%，单位工业增加值二氧化碳排放下降幅度大于全社会下降幅度，重点行业二氧化碳排放强度明显下降。针对钢铁行业，提出严格落实产能置换和项目备案，到 2025 年废钢铁加工准入企业年加工能力超过 1.8 亿吨，短流程炼钢占比达 15%以上，到 2030 年，流程炼钢占比达 20%以上。针对水泥行业，提出严格执行水泥产能置换政策，到 2025 年水泥熟料单位产品综合能耗水平下降 3%以上，到 2030 年原燃料替代水平大幅提高。针对电解铝行业，提出坚持电解铝产能总量约束，到 2025 年铝水直接合金化比例提高到 90%以上，再生铝产量分别达到 1150 万吨，到 2030 年电解铝使用可再生能源比例提至 30%以上。多项产能置换与减排措施并将对上下

游货运需求产生重要影响^[450]。重点行业发展趋势和碳排放变化是决定全国整体碳排放达峰时间、碳达峰质量、平台期和峰值大小的关键，也是影响未来大宗货运需求的关键。行业端实施的各项减污降碳措施将对上下游货运需求产生重要影响。

因此，综合目标货类与行业间的生产消费关联关系，如图 21 所示，本研究选取火电、钢铁、水泥、炼焦、电解铝、建筑共 6 大行业作为本研究的重点行业。



图 21 本研究目标货类与重点行业

3.4 排放量核算方法

3.4.1 核算方法

交通运输是 CO₂ 与大气污染物排放的重要来源，其中，货运是 CO₂ 与氮氧化物 (NO_x) 的主要贡献者。中国交通运输领域能源消费统计与温室气体、大气污染物排放核算基础较为薄弱，国家层面仅发布《道路机动车大气污染物排放清单编制技术指南（试行）》与《非道路移动源大气污染物排放清单编制技术指南（试行）》作为核算交通大气污染物排放的参考，尚未公布统一的交通温室气体核算方法。温室气体与大气污染物排放均存在底数不清、核算边界差异、核算方法不统一等问题^[51-52]。

交通排放核算方法总体分为自下而上和自上而下两类。如表 1 所示，自上而下的方法包括“燃油法”、“周转量法”、“里程法”等^[53-55]。其中，“燃油法”基于交通运输工具在目标时间段内运行过程中各类燃料的消耗量，结合对应燃料的

排放因子核算排放量。该方法数据简单，计算快捷，但由于中国能源统计口径将交通运输、仓储和邮政行业作为一个整体进行划分，未剔除仓储和邮政业的能耗统计，且非营运车辆的能耗并未纳入统计范围，应用该方法数据统计口径不完整且无法准确细分公铁水航不同运输方式排放量。“周转量”法基于公铁水航不同交通运输方式的货运周转量、客运周转量，结合单位周转量排放因子核算排放量。该方法计算简单快捷，能够细分不同运输方式排放构成，应用较为广泛，但该方法需要准确细致的单位周转量排放因子数据作为支撑。“保有量”法基于目标区域内各类交通工具实际保有量，结合不同类型交通工具年均行驶里程、单位行驶里程燃料消耗量以及不同燃料排放因子核算排放量。该方法适用于国家、省份、城市等不同区域尺度的排放核算，但由于涉及参数较多，并需要对交通工具进行更为细致的类别划分，各项参数均引入误差导致结果不确定性较高。

自下而上的核算方法包括“统计法”、“车流量法”等^[56-60]。其中，“统计法”以实际调研为基础，将各类交通运输工具作为用能主体进行能耗统计，并结合排放因子核算排放量，例如调研某地区加油站加油量等。统计法隶属于“燃油法”一种，通过增加样本数量提高结果准确性，能够对细分行业碳排放进行核算，但由于涉及的数据较多，数据获取和处理难度较大，不适用于计算大区域排放。“车流量法”通过卡口流量统计或车流量建模等方法获取某路段车流量数据，基于道路车流量、道路长度、车型结构、单位里程燃料消耗量及不同燃料的排放因子核算某路段排放量，将目标区域内所有路段排放量累加得到区域排放总量。该方法对于车辆排放核算的精细度和精确度均有大幅提高，但对于数据需求量庞大、车流量数据难以获取，不适用于计算大区域排放，同时不适用于计算铁路、水运、航空排放。

在核算国家交通排放量时，周转量法由于数据统计健全、计算简单、结果精度较高并能够细分不同运输方式排放构成而被广泛应用^[61-62]。《2030年前碳达峰行动方案》针对交通运输绿色低碳行动提出到2030年营运交通工具单位换算周转量碳排放强度比2020年下降9.5%左右，国家铁路单位换算周转量综合能耗比2020年下降10%的目标，该数据即根据周转量法计算得出^[49]。2022年5月，中国民航局发布的《2021年民航行业发展统计公报》指出2021年中国民航吨公里

油耗为 0.309 公斤，较 2005 年（行业节能减排目标基年）下降 9.2%，该数据同样依据周转量法计算^[63]。因此，为评估未来交通运输需求变化对于二氧化碳与大气污染物量的影响，并与国家碳达峰目标核算方法保持一致，本研究采用“周转量法”，基于 2022~2040 年公铁水航各种运输方式的货运周转量，结合不同运输方式单位货运周转量的排放因子，评估未来货运需求变化对于 CO₂ 与 NO_x 的影响。

表 1 交通排放核算方法

方法	公式	数据需求	缺点
燃油法	燃料消耗量（实物） × 燃料排放因子	各类燃料消耗实物量、各类燃料温室气体/大气污染物排放因子	无法细分各类运输方式、时空分辨率低、统计口径不明晰
周转量法	运输周转量×单位周转量排放因子	不同运输方式客、货运周转量、单位周转量温室气体/大气污染物排放因子	准确细致的吨公里、人公里排放因子支撑
保有量法	保有量×年均行驶里程×单位里程燃料消耗×燃料排放因子	各类交通工具实际保有量（分细类）、年均行驶里程、单位里程燃料消耗量、温室气体/大气污染物排放因子	涉及参数较多，各项参数均引入不确定性
统计法	燃料消耗量（实物） × 燃料排放因子	不同运输方式各类交通工具燃料消耗实物量、各类燃料温室气体/大气污染物排放因子	涉及的数据较多，数据获取和处理难度较大，不适用于计算大区域排放
车流量法	车流量×时间×道路长度×单位里程燃料消耗×燃料排放因子	规定时间内道路长度、道路车流量、各类	数据量庞大、数据收集困难、计算复杂，不适用于计算大区域排放，不适用于计算铁路、水运、航空排放

3.4.2 排放因子

基于重型货车、铁路内燃机车和水运船舶不同交通工具单位周转量能耗，结合 CO₂、NO_x 排放因子得到公路、铁路和水运不同运输方式的单位货运周转量排放因子。其中，2020 年道路重型货车能耗水平参考课题组前期研究结果取值 0.015 千克/（吨·公里）^[64-65]，铁路内燃机车能耗水平参考中国产品全生命周期温室气体排放系数集（2022）取值为 0.0023 千克/（吨·公里），水运船舶能耗水平根据《中国交通年鉴》数据取 0.005 千克/（吨·公里）。2020 年 CO₂ 排放因子根据《IPCC 2006 年国家温室气体清单指南 2019 修订版》选取^[66]，货车 NO_x 排放因子参考清华大学 DEPC 模型选取^[67]；铁路内燃机车与水运船舶 NO_x 排放因子参考《城市大气污染物排放清单编制技术指南》运行阶段排放因子选取。随着新能源汽车推广、老旧车辆淘汰、新售车辆能耗水平下降以及污染物处理等措施的深入推进，公路货运车辆 CO₂ 与大气污染物排放水平均将呈现下降趋势，本研究参考结合新能源汽车导入、老旧车辆淘汰、排放标准提升等因素分析 2022~2040 年 CO₂ 排放因子，大气污染物排放因子的变化，用于核算未来交通排放量。

四、重点行业分析

4.1 行业发展现状

4.1.1 电力行业

电力规模持续增长，电源结构以煤电为主。中国电力装机容量持续增长，2011 年突破 10 亿千瓦，2015 年突破 15 亿千瓦，2019 年突破 20 亿千瓦。截至 2020 年，全国发电装机容量达到 22.02 亿千瓦，如图 22 所示，火电 12.5 亿千瓦、水电 3.7 亿千瓦、并网风电 2.8 亿千瓦、并网太阳能发电 2.5 亿千瓦、核电 0.5 万千瓦，分别占总装机容量的 57%、17%、13%、11%和 2%^[68]。非化石能源发电装机容量合计 9.8 亿千瓦，占全口径发电装机容量的比重为 44.8%。在电力生产供应端，如图 23 所示，全社会发电量持续增长，2001~2005 年、2006~2010 年、2011~2015 年和 2016~2020 年全社会发电量年均增长率分别为 13%、11%、6%和 7%。2020

年全口径发电量 7.78 万亿千瓦时，大约是 2000 年的 5.7 倍。与此同时，中国鼓励发展推广热电联产综合提高热电机组的利用率，发展热能梯级利用技术^[69]，提出按照“以热定电”的原则规划建设热电联产项目，优先发展背压式热电联产机组，多数火电企业承担供热任务。2020 年全国供热量合计 61.4 亿吉焦，热电联产供热量约 37.9 亿吉焦，占比约 61.8%。在电源结构方面，如图 24 所示，火力发电在中国占据绝对主体，2020 年火力发电量 5.3 万亿千瓦时，占总发电量的 68%，其中燃煤（含煤矸石）发电火力发电量的 95%，燃气发电约占 5%。非化石能源发电量近年来增长较快，2010、2015 和 2020 年非化石能源发电量占总发电量比重分别为 21%、26%和 32%，呈现持续增长态势。

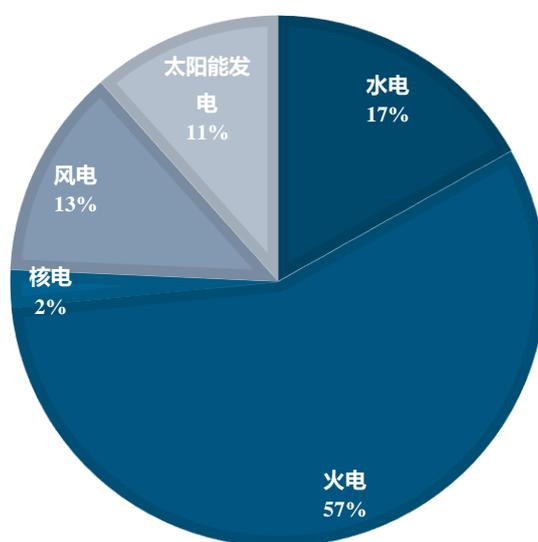


图 22 2020 年全国发电装机容量及比重

注：数据来源于《中国电力统计年鉴 2021》

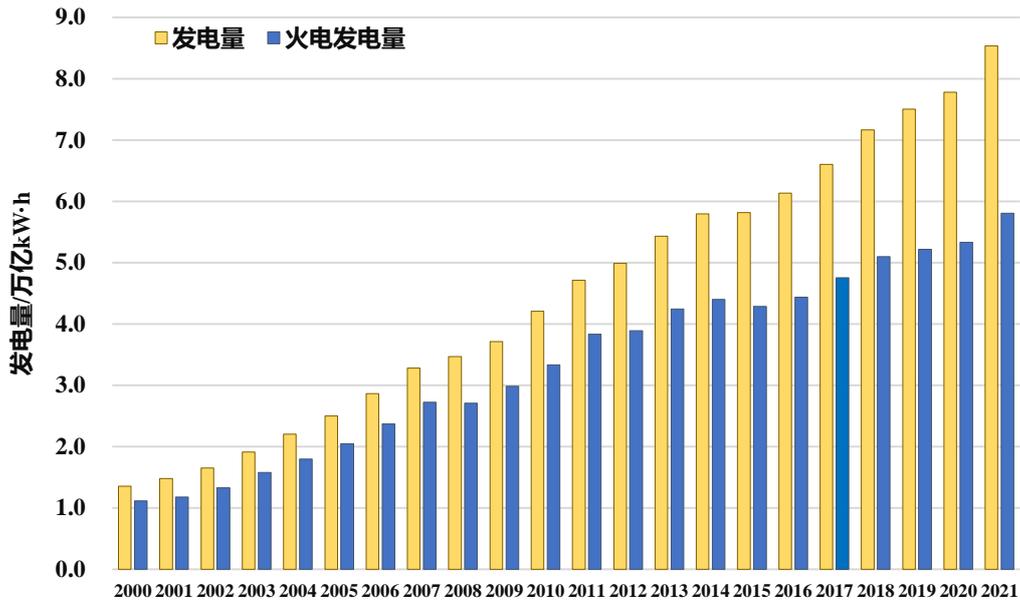


图 23 2000~2021 年中国全社会发电量与火力发电量

注：数据来源于国家统计局

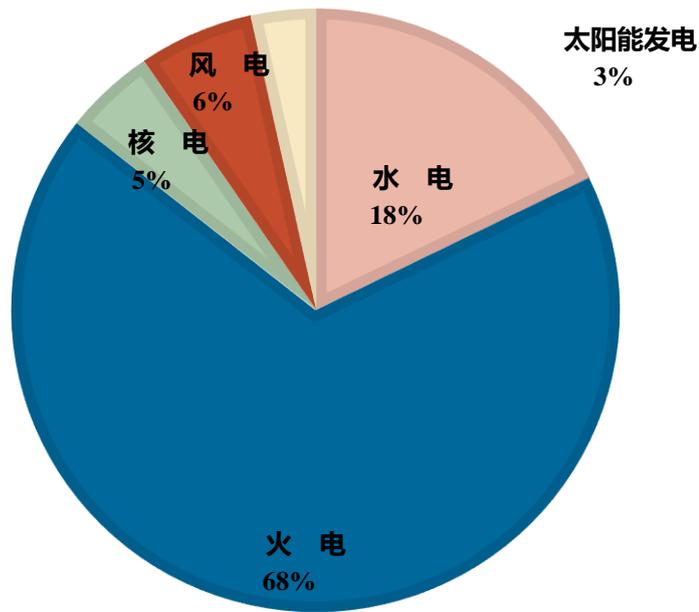


图 24 2020 年中国电源结构

注：数据来源于国家统计局

电力消费量持续增长，第二产业用电量约占全社会用电量 69%。在电力消费端，全社会用电量由 2000 年的 1.35 万亿千瓦时增长至 2020 年的 7.76 万亿千瓦时，电力消费占全球总量的 28% 左右。分行业来看，如图 25 所示，第一产业用电量相对稳定，农林牧渔业用电量由 2010 年 976 亿千瓦时增长至 2020 年 1422 亿千瓦时，2014 年后，第一产业在全社会用电量中的占比基本维持在 1.8% 左右，第一产业用电量的增长主要来自农网改造升级力度的提升和乡村用电条件的改

善；第二产业是中国电力消费的主体，二产用电量在全社会用电量的占比由 2000 年 75% 下降至 2020 年 69%，下降趋势明显。2020 年第二产业用电量约 5.3 万亿千瓦时，其中制造业、电力热力生产供应业、采矿业和建筑业用电量分别约为 4.0、1.0、0.2 和 0.1 万亿千瓦时。第二产业中用电量增长主要来自制造业，近五年来制造业用电量仍以年均 5% 的增长率持续增长，2020 年高技术及装备制造业、四大高载能行业（化学原料和化学制品制造业、非金属矿物制品业、黑色金属冶炼和压延加工业、有色金属冶炼和压延加工业）和其他制造业行业用电量增速分别为 4.0%、3.6%、3.3%；2020 年交通运输、服务业等第三产业合计用电量 1.1 万亿千瓦时，在全社会用电量中的占比由 2000 年的 10% 提升至 15%，近 5 年来第三产业用电量以年均 9.9% 的增长率高速增长。由于大数据、云计算、物联网等新技术快速推广应用，并促进在线办公、生活服务平台、文化娱乐、在线教育等线上产业的高速增长，信息传输/软件和信息技术服务业用电量同比增长 23.9%，是第三产业中用电量增长最快的产业^[70]；此外，随着城镇化率的持续提高，脱贫攻坚不断深入，居民消费水平不断升级，城乡居民用电快速增长。家用电器、消费电子产品等消费量提高，同时以电采暖为代表的居民生活领域电能替代也快速发展^[71]。2020 年居民生活用电量达 1.1 万亿千瓦时，在全社会用电量中的占比由 2000 年的 10% 提升至 15%，近五年来居民生活用电量以年均 8.6% 的增速持续增长，用电量增速成为仅次于服务业。

疫情的有效控制拉动工业、服务业等行业复工复产，电力需求激增，2021 年全国发电量与用电量同比大幅上升。2021 年全社会用电量增长至 8.3 万亿千瓦时，较 2020 年增长 0.8 万亿千瓦时，上升 10.3%。一产、二产、三产和城乡居民生活用电量分别同比增长 16.4%、9.1%、17.8% 和 7.3%。如图 26 所示，服务业、居民生活、电力热力生产供应、有色金属冶炼、黑色金属冶炼及计算机通讯设备制造是用电需求增长的主体，2021 年用电量分别同比增长 1897、793、638、530、390 和 361 亿千瓦时，合计占全国用电量增长的 60%。巨大的电力需求拉动发电量尤其是火力发电量大幅增长，2021 年全国全口径发电量 8.5 万亿千瓦时，同比增长 9.7%。其中，非化石能源发电量 2.9 万亿千瓦时，同比增长 12.0%，火电发电量 5.8 万亿千瓦时（含煤电 5.5 万亿千瓦时、气电 0.3 万亿千瓦时），同比增长

8.9%。

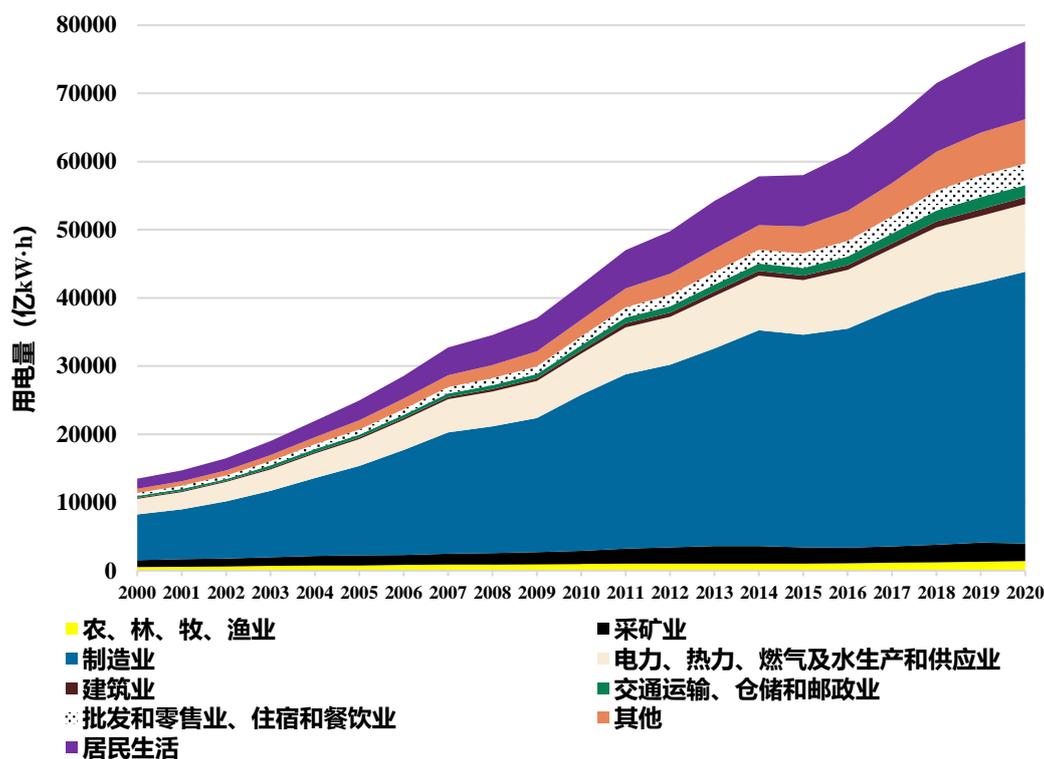


图 25 2020 年分行业电力消费总量

注：数据来源于国家统计局

单位：亿千瓦时

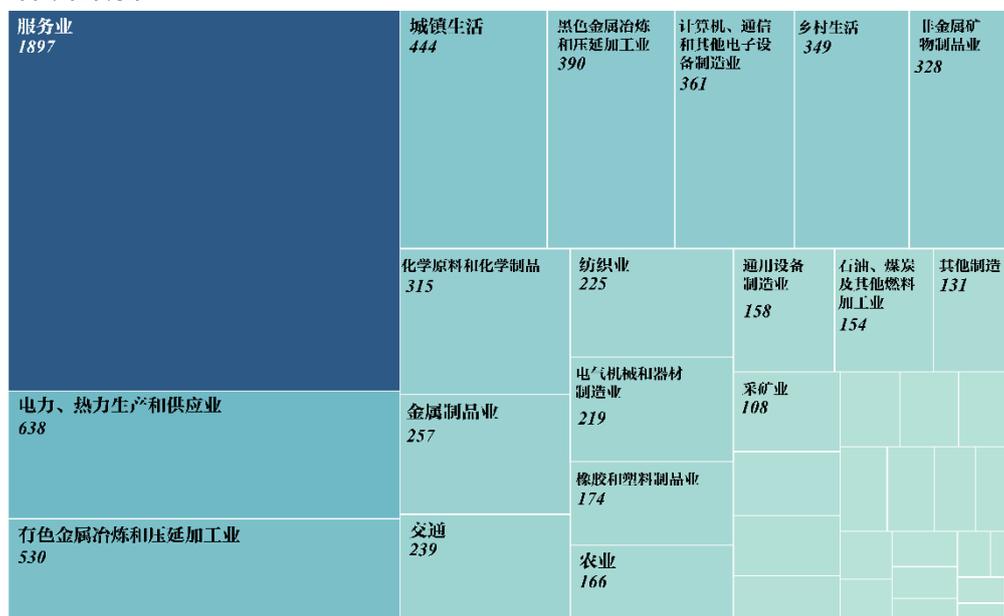


图 26 2021 年中国分部门/行业同比 2020 年用电增量

注：数据来源于全国电力工业统计快报（2021 年）

4.1.2 钢铁行业

钢铁产量在过去二十年持续增长，稳定支撑着中国制造业高质量发展。钢铁是国民经济的基础产业，是衡量一个国家综合国力和工业化程度的重要标志。中国钢铁行业经历了探索阶段（1949~1978年）、起步阶段（1979~2000年）和跨越发展阶段（2001~2014年）。2000年以来，随着中国工业化、城镇化的快速推进，房地产的崛起以及各类基建项目的落地，钢铁市场需求旺盛，行业迅速发展，产品产量持续增长。逐步发展形成以宝武钢铁有限公司、江苏沙钢集团有限公司、河钢集团有限公司等企业为代表的近千家钢铁企业。中国已经连续12年位居世界制造业第一大国的地位，钢铁产量则连续26年居于世界第一。2020年，由于国内钢材市场需求旺盛，超大规模的内循环市场为钢铁行业发展提供了有力支撑，全国生铁、粗钢和钢材产量分别达到8.89、10.65和13.25亿吨的历史峰值，分别占全球生铁、粗钢和钢材产量的63%、67%和57%，较2000年产量分别增长579%、729%和908%。2001~2010年是中国工业化、城镇化高速发展的时期，也是对于钢铁产量增速最快的时期。如表2所示，2001~2005年和2006~2010年粗钢产量年均增速分别达到23.5%和11.0%。如图27所示，2010年后，粗钢产量仍呈上升趋势，但增速逐步放缓。如图28所示，钢筋、线材、中厚宽钢带和棒材作为最主要的钢材产品，产量呈增长趋势。

表2 各经济周期的粗钢产量弹性系数

周期年份	经济年均增速 (%)	粗钢产量年均增速 (%)	粗钢产量弹性系数	单位 GDP 钢材消费系数年均增速
1991~1995	13.0	7.7	0.6	--
1996~2000	8.3	6.1	0.7	--
2001~2005	10.1	23.5	2.3	--
2006~2010	11.0	11.0	1.0	--
2011~2015	7.5	4.1	0.5	-4.5%
2016~2020	5.5	6.9	1.3	2.5%

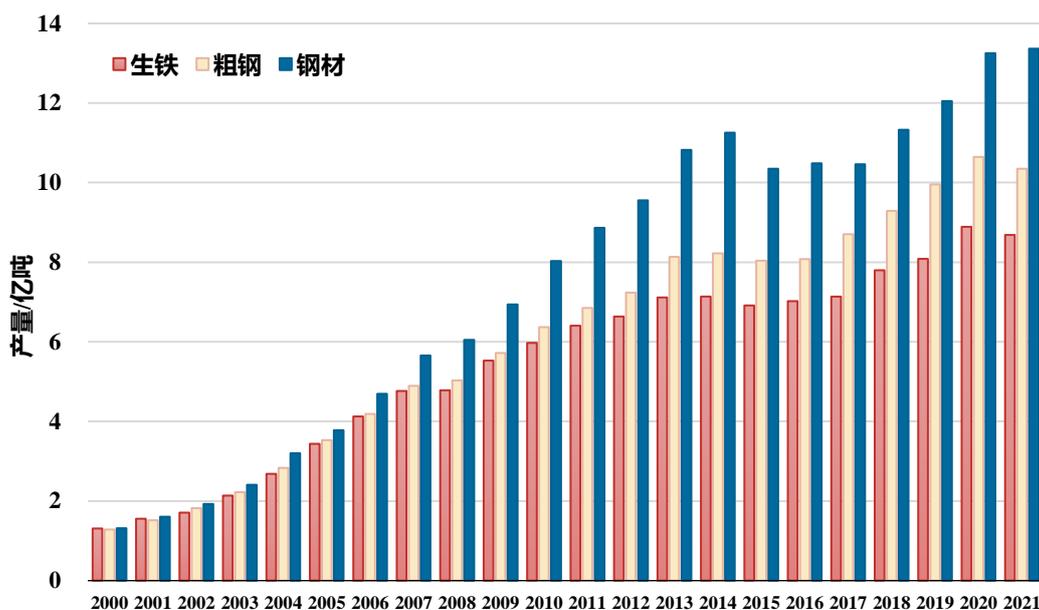


图 27 2000~2021 年中国粗钢、生铁与钢材产量

注：数据来源于国家统计局

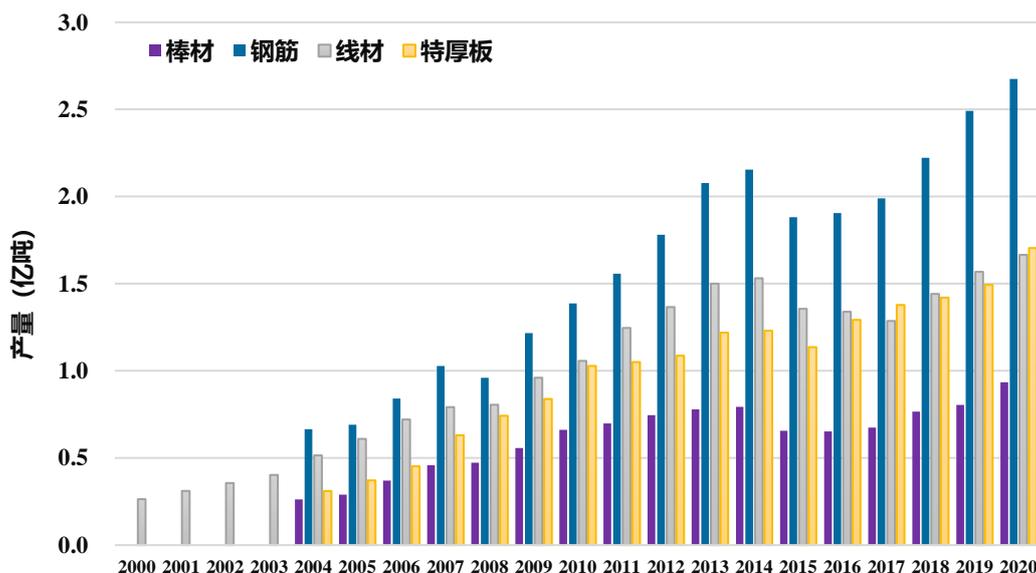


图 28 2000~2021 年中国主要钢材产品产量

注：数据来源于国家统计局

生产工艺以长流程炼钢为主，废钢资源利用率相对较低。以长流程炼钢为主的钢铁冶炼工艺高度依赖铁矿石、石灰石等原材料以及煤炭、焦炭等燃料，不仅导致资源、能源消耗突出，也导致较高的上下游货运需求。短流程炼钢不仅可以加强资源有效回收利用，降低单位产品碳排放与能耗，对于降低货运需求，减少铁矿石对外依存度等方面也有所增益。受废钢资源短缺、废钢分拣技术不过关、电价较高等多方面因素影响，中国短流程炼钢比例仅约 10%^[72-74]，相较于美国

70%、欧盟 40%、韩国 33%、全球平均 28%的比例，存在较大差距。同时，如图 29 所示，2020 年中国废钢资源总量约为 2.6 亿吨，其中炼钢用废钢消耗量为 2.3 亿吨，废钢炼钢比约 22%。全球废钢使用比例最高的土耳其达到了 82.8%，美国 69.1%、欧盟 54.8%、加拿大 49.1%、俄罗斯 42.5%、韩国 39.9%、日本 33.9%，与发达国家相比，目前中国废钢应用率仍处于降低水平。

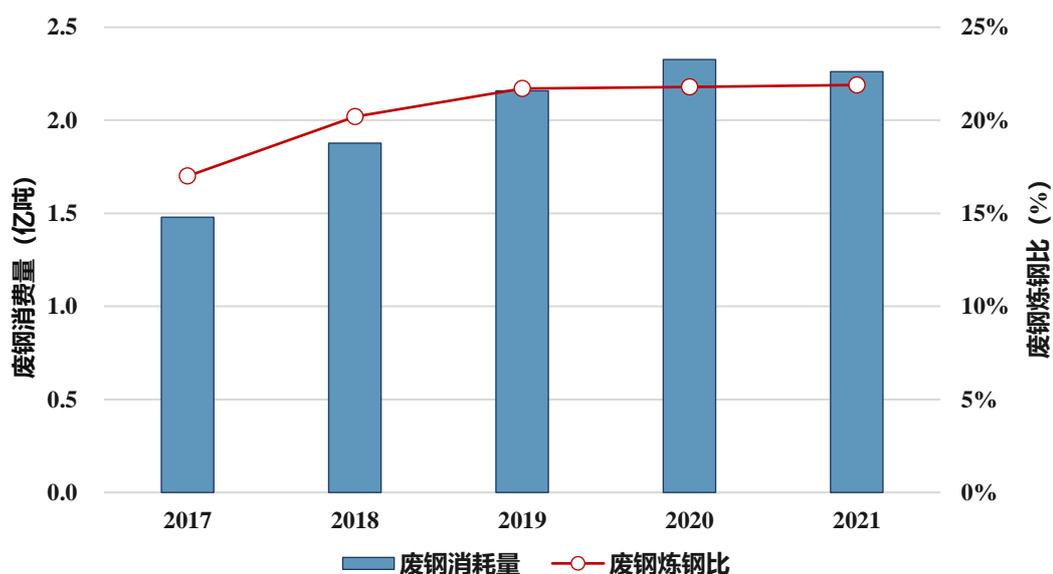


图 29 2017~2021 年中国废钢资源消耗量与废钢炼钢比

钢铁消费领域集中在房屋建设、机械以及汽车制造。中国拥有世界上最大且最活跃的钢铁需求市场，2020 年国内钢材需求 9.95 亿吨，国产钢材市场占有率 97.9%，为房屋、公路铁路、桥梁水利等基础设施建设以及机械、汽车制造提供高强钢筋、钢结构用钢等基础结构材料。钢铁主要产品不断向中、高端产品发展，从钢材消费结构来看，如图 30 所示，中国钢铁下游消费部门主要包括房屋建设、机械、汽车、基础设施建设、家电等，其中，房屋建设、机械以及汽车制造是最主要的钢材消费领域，合计钢材消费量约占全国总量 70%^[75-76]。

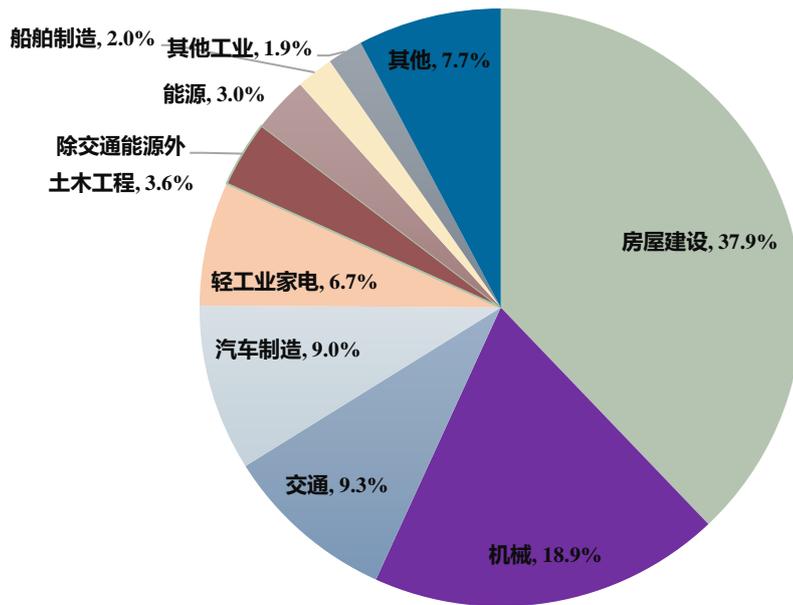


图 30 中国钢铁消费领域

铁矿石原料大量依赖进口，钢材产品净出口量逐年递减。中国铁矿石资源储量比较丰富，2019 年铁矿石已查明资源储量约 853.0 亿吨。且铁矿石原矿产量丰富，2010~2017 年铁矿石原矿年产量均超过 10 亿吨。但中国铁矿石品位较低，全世界铁矿石平均品位约 49%，南非和印度铁矿石品位均超过 60%，俄罗斯和伊朗平均品位在 50%~60%，澳大利亚和巴西平均品位则在 40%~50%，而中国铁矿石平均品位只有 34% 上下，贫铁矿约占总储量的 94.6%。2021 年我国铁矿石原矿产量为 9.8 亿吨，折合成成品矿（折 62% 品位）约 3.05 亿吨，铁矿石供应量不能够满足钢铁实际生产的需要，依赖大量进口^[77]。如图 31 所示，中国对于铁矿石进口量逐年递增，铁矿石对外依存度逐步提高，2016 年之后铁矿石进口量均在 10 亿吨以上，2020 年达到 11.7 亿吨。进口地区集中度逐渐提高，巴西、澳大利亚与南非进口铁矿石占比分别为 20%、63% 和 6%。中国钢铁行业的定位是以满足内需为主，不以出口为导向。如图 32 所示，2005 年前中国钢材进口量高于出口量，2005 年后出口量高于进口量，2005~2015 年间钢材净出口量逐年提高，2015 年达到 1 亿吨峰值。2015 年后中国钢材出口量逐年递减，2020 年中国钢材累计出口为 0.54 亿吨，进口 0.20 万吨，钢材净出口 0.33 亿吨。进口钢材以热系板材以及方坯、板坯等半成品为主。出口钢材以板材为主，占比达到 61%，其次为管材、棒线材、角型材等。

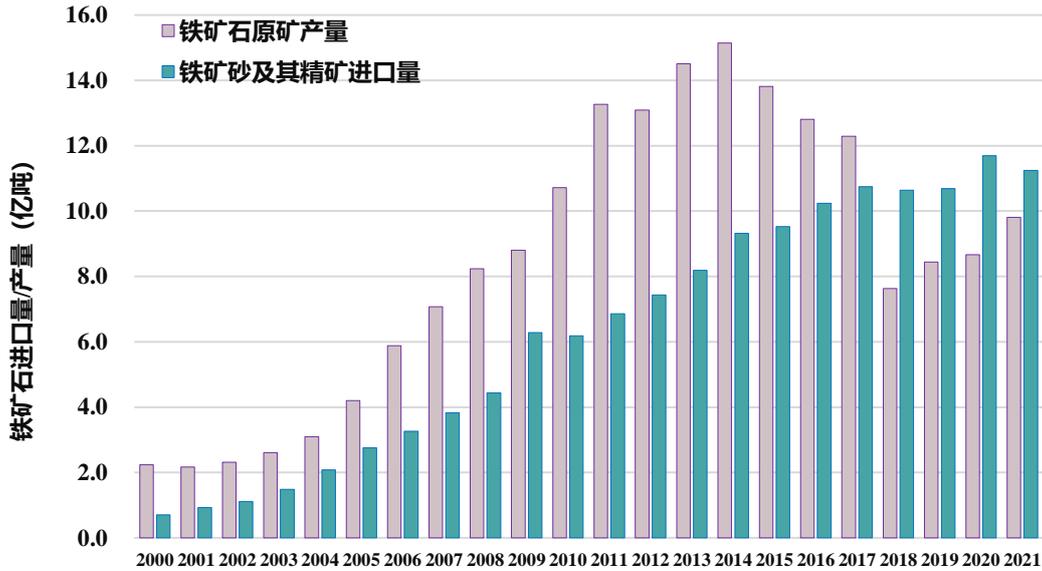


图 31 2000~2021 年中国铁矿石原矿产量及铁矿砂及其精矿进口量

注：数据来源于国家统计局

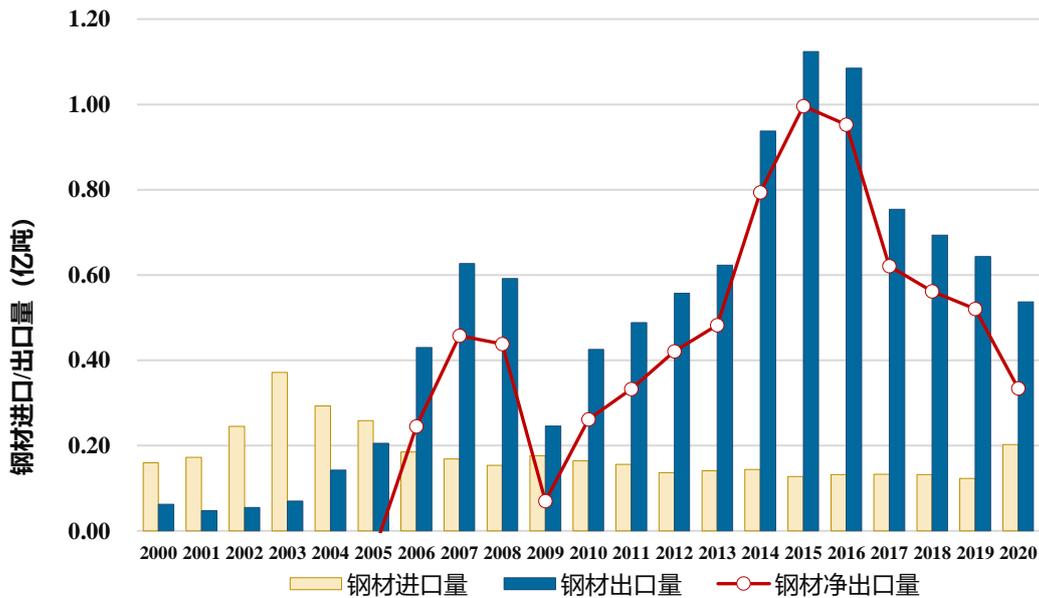


图 32 2000~2021 年中国钢材净出口量

注：数据来源于国家统计局，中华人民共和国海关总署等

钢铁超低改造推动大宗物料清洁运输。2019 年，生态环境部等五部委联合印发《关于推进实施钢铁行业超低排放的意见》，提出全国新建（含搬迁）钢铁项目原则上要达到超低排放水平，推动现有钢铁企业超低排放改造，到 2025 年底，重点区域钢铁企业超低排放改造基本完成，全国力争 80% 以上产能完成改造的目标。不仅要求钢铁企业烧结、球团、炼焦等所有生产工艺满足超低排放要求，对钢铁企业大宗物料运输也提出严格要求。钢铁企业对于精铁矿、煤炭、焦

炭等大宗物料产品采用铁路、水路、管道等清洁方式运输的比例不低于 80%，达不到的汽运部分全部采用新能源汽车或达到国六排放标准的汽车（2021 年底前可采用国五排放标准的汽车）^[78]。截至 2022 年 6 月，全国共 251 家企业约 6.8 亿吨粗钢产能已完成或正在实施超低排放改造，占全国粗钢产能的 63%左右。大宗物料产品清洁运输改造成效明显，截至 2022 年 8 月，完成公示的 50 家钢铁企业中仅 1 家企业尚未通过清洁运输评估监测，其他企业均已通过。共 29 家企业上报清洁运输改造详情，多数企业采取多项改造措施。通过新建铁路专用线、更换国六车辆、更换新能源车辆达到改造要求的企业均为 20 家。预计新增铁路专用线 970km，管廊长度近 35km，水运航线 120km，更换国六车辆和新能源车辆各 3800 多辆。

4.1.3 水泥行业

水泥与熟料产量持续增长，进入高位平台期。水泥制造行业是资源密集型、能源密集型的高消耗行业，资源消耗量与货运需求量非常大。中国是水泥制造第一大国，自 1985 年以来，中国水泥产量已连续 35 年稳居世界第一，目前产量约占世界水泥总产量的 57%^[79-81]。如图 33 所示，2006~2014 年是水泥产量以年均 6.3%的增速迅速增长，2014 年水泥产量达到 24.8 亿吨的阶段性峰值。2015~2020 年，全国水泥产量在 22.4~23.9 亿吨之间浮动，到达高位平台期。2020 年水泥产量为 23.9 亿吨，人均水泥消费量约 1.700 吨，远高于发达国家人均 0.6~0.7 吨的消费峰值。如图 34 所示，水泥熟料以石灰石和粘土、铁质原料为主要原料，按适当比例配制成生料，烧至部分或全部熔融，并经冷却而获得的半成品。2020 年底中国设计水泥熟料产能约 18.3 亿吨，实际年产能超过 20 亿吨^[82]。水泥熟料产能利用率的区域差异较大，2019 年全国产能利用率约为 75%，其中华东、中南、西南地区产能利用率在 80%左右，而西北、华北、东北不足 50%，产能过剩局面依然没有改变^[83]。近年来，中国水泥产品结构发生了变化，高标号水泥使用比例增长，在水泥消费量进入平台期的同时，水泥熟料消费量仍持续增加，2020 年全国水泥熟料产量创历史新高达到 15.8 亿吨。

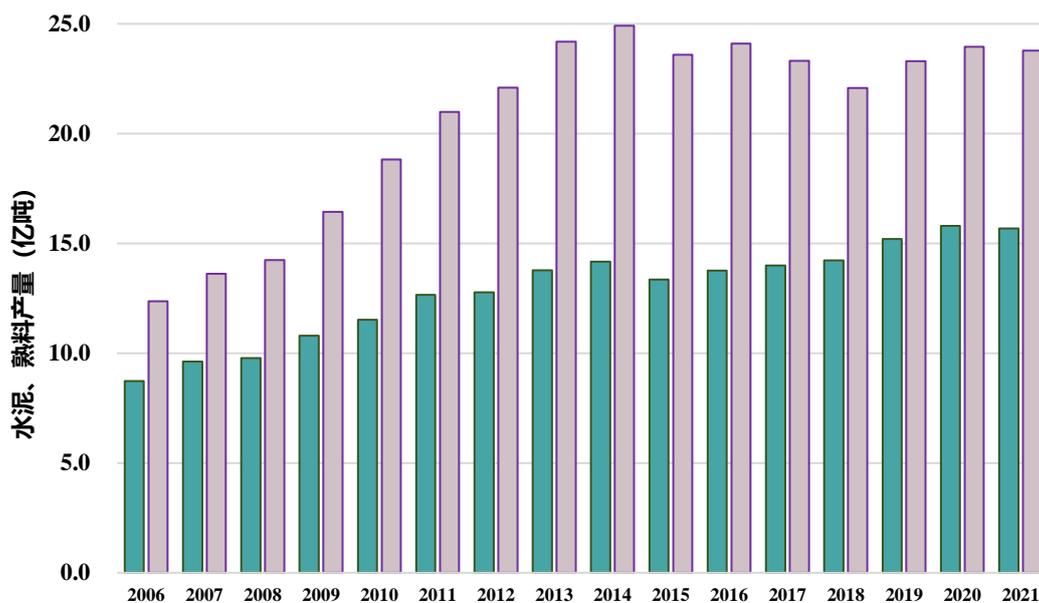


图 33 2006~2021 年中国水泥与熟料产量

注：数据来源于国家统计局

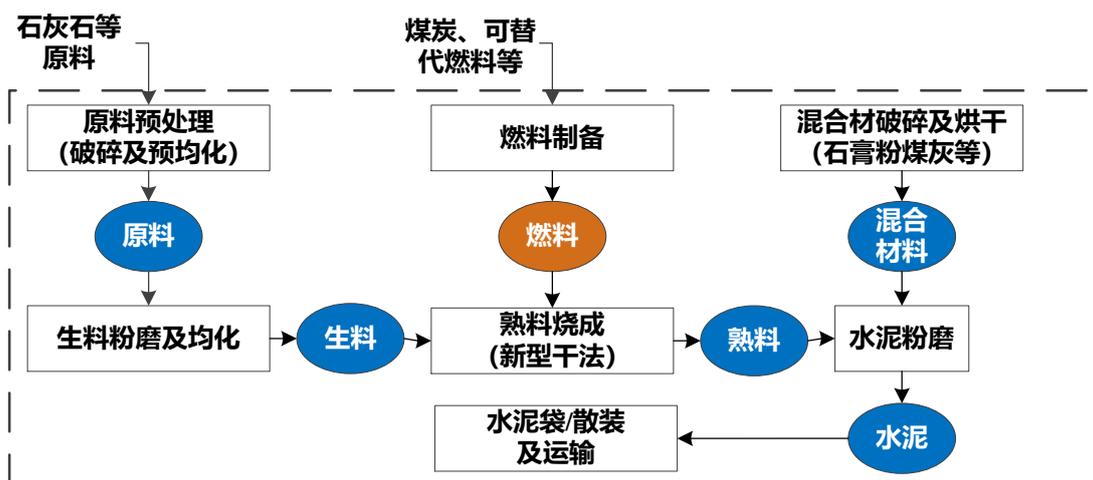


图 34 水泥生产工艺流程

水泥消费领域集中在房地产和基础设施建设。水泥作为用途最广、用量最多的一种建筑工程材料，消费领域几乎遍布中国 20 个国民经济行业门类，尤其广泛应用于土木建筑、水利、国防等工程建设^[79,84]。2020 年房地产和基础设施建设水泥消耗量分别约占全国水泥消耗总量的 40%~45%和 35%~40%，是中国水泥消费最重要的领域，此外，农村建设及其他领域水泥消耗量约占 15%~25%。其中，房地产投资与水泥消费呈正相关关系，对水泥消费的影响更加直接，甚至成为部分地区影响水泥消费需求的主导因素。

水泥熟料进口量有所上升，约占消费量的 2%。2017 年以前中国一直是水泥

出口远高于进口的国家，水泥和熟料出口量在 1000 万吨以上，水泥和熟料进口量一直保持在 300 万吨以下。自 2018 年以来，水泥行业实施“错峰生产”、“停窑限产”等政策措施，造成了水泥区域性、阶段性短缺和价格高位运行，为水泥产能过剩的东南亚国家向中国出口水泥创造了契机。由于熟料相较运输便利且储存时间长，进口以熟料为主水泥为辅，但进口总量占比较低，进口熟料主要运往我国东部沿海经济大省与直辖市。2019 年我国水泥和熟料进口量达到 2475 万吨，其中熟料进口量 2274 万吨。2020 年熟料进口规模进一步上升至 3400 万吨，占全国水泥熟料消费量的 2.1%。中国在连续三年熟料进口大幅增长后，2021 年首次出现下降，进口熟料 2772 万吨，比上年下降 16.9%。进口量下降的主要原因是全球海运费大幅上涨，压缩了贸易利润，贸易商进口动力有所减弱。

4.1.4 铝冶炼行业

中国是世界上最大的铝土矿、氧化铝、原铝、铝材的生产国与消费国^[85]。铝冶炼行业上下游产业链较长，如图 35 所示，铝资源在社会整个生命周期过程中可分为铝土矿的开采与制备、原铝生产、加工制造、消费使用和回收利用 5 个环节。经加工制造产生的铝产品投入市场，被广泛用于建筑、包装、电力、交通、家电等领域，且随着工业化进程的推进，铝材产品使用范围也将不断扩大，达到寿命的铝制品经过回收与分类处理，一部分可重新投入生产环节再利用，不可回收的以废弃物形式填埋或焚烧，废铝回收有效降低了铝土矿资源消费与能源消费，减少废弃物对环境的危害，是铝工业重点发展方向。

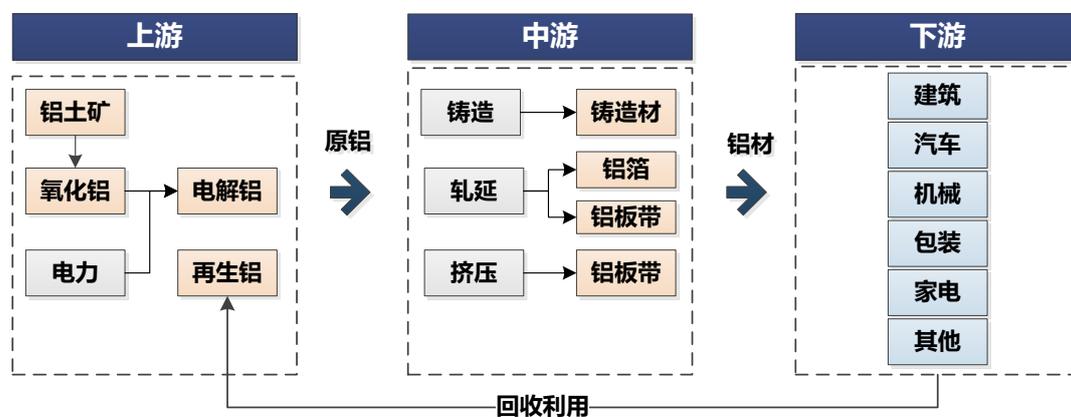


图 35 铝材行业上下游产业链

电解铝产量持续增长，已达设定产能天花板。电解铝是铝材的直接原材料，

主要使用氧化铝通过电解工艺生产。过去二十年间中国铝行业的不断发展，电解铝产能有序增长。同时中国对电解铝产能实施总量控制，设定产能天花板约 4500 万吨/年，要求项目建设须实施等量或减量置换。2021 年中国电解铝产量达到 3850 万吨，产量占据全球总产量的 57.2%，是全球最大的电解铝生产国。电解铝产业能源结构以电力为主，2020 年电解铝行业全年用电量 5010 亿千瓦时，占全社会用电量的 6.7%。电解铝产业集中度较高，前十大企业集团产能占比 72%，产能分布主要以低的电力成本为核心进行布局。2019 年之前，“煤-电-铝”一体化为主要特征，电解铝企业主要分布在山东、新疆、内蒙古、甘肃等地区。从 2019 年开始，转变为围绕清洁能源发展“水-电-铝”，正在向云南等地进行新一轮产能转移。行业持续深化供给侧结构性改革，严控电解铝新增产能，严格落实产能置换，行业运行态势良好，效益明显改善^[86]。

氧化铝产量持续提升，主要用于电解铝生产。氧化铝是生产电解铝的主要原料，中国氧化铝的 95%用于生产电解铝，其余用于医药、轻工、化工等非冶金行业。碱法生产氧化铝是世界上大部分国家采用的生产方法，包括拜耳法和烧结法^[87]。中国氧化铝生产工艺多样，但拜耳法在实际生产中占有极高比例。如图 36 所示，中国氧化铝产量呈现逐年增长趋势，2020 年产能 8853 万吨/年，产量 7313 万吨，约占全球总量的 55%。

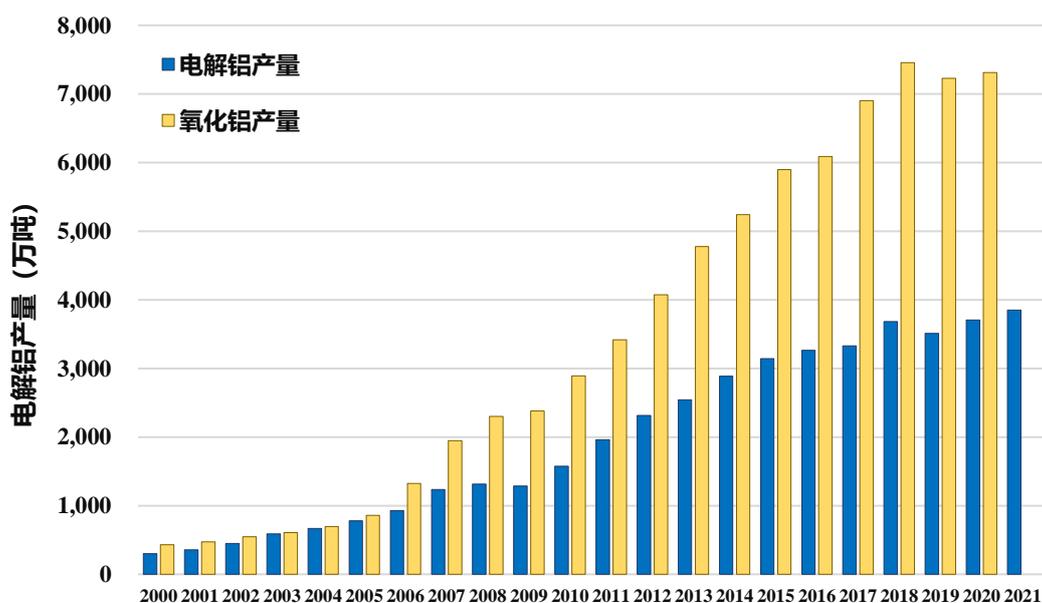


图 36 2000~2021 年中国电解铝与氧化铝产量

注：数据来源于国家统计局

再生铝产量持续增长，废铝资源循环利用体系尚不健全。再生铝是指以废铝作为主要原料，经预处理、熔炼、精炼、铸锭等生产工序后得到铝合金。铝的抗腐蚀性强，在使用过程中损耗程度极低，且在多次重复循环利用后不会丧失其基本特性，具有极高的再生利用价值。除具有显著的经济优势外，再生铝还能有效节约自然资源、保护生态环境。通过废铝资源回收再利用发展循环经济，可以有效缓解铝矿供需矛盾，降低铝矿资源对外依赖度。原铝的生产涉及铝土矿的开采、长途运输等，氧化铝和电解铝生产能耗巨大，与原铝生产相比，再生铝生产固定资产投资较小、生产成本低，再生铝具有显著的经济性^[88]。中国的再生铝工业发展相对较晚，2000年后再生铝进入快速增长期，2001~2020年内再生铝的年产量年均增长率超过12%。2020年中国再生铝产量为740万吨，同比增长2.1%。占全世界再生铝总量的20%，是世界上年产再生铝最多的国家之一。再生铝占原铝产量的20%左右，距离发达国家还有比较大的差距。因此，中国再生铝消费市场潜力巨大，目前还处于持续上升发展的重要机遇阶段。同时，中国废铝资源降级利用问题明显。由于回收体系不健全，废铝资源混杂现象严重，部分优质废铝原料被降级使用，再生铝产品以铸造铝合金为主，再生变形合金占比较少。如易拉罐废料等变形铝合金尚未实现保级循环利用，每年约100万吨废旧易拉罐及工艺废料被降级使用，造成无法挽回的资源浪费。

铝材消费领域集中在和建筑、交通、电力和包装领域。金属铝及其合金材料的密度小、耐腐蚀性强、可塑性高等优良特性，与其他金属相比更容易进行表面处理，目前金属铝材已经是仅次于钢铁材料的第二大金属。广泛应用于建筑结构、交通运输、电子电力、包装容器、耐用消费、机械装备等众多领域。如图37所示，建筑结构是中国铝材消费的第一大领域，主要用作门窗框、吊顶、幕墙、楼梯扶手等建筑的主要材料，建筑铝材消费量约占总消费量的28%；交通运输领域铝材用量占整个铝材消费结构的20%，铝材已代替了大部分钢铁材料被用于车身结构、汽车零部件、轮毂等制造；电力行业铝材用量约占10%，主要用于电缆制造；包装行业使用铝材量占整个铝材消费结构的10%，主要应用于易拉罐、烟草、化妆品和医药行业包装。此外，每年约13%的铝材用于出口^[89-93]。

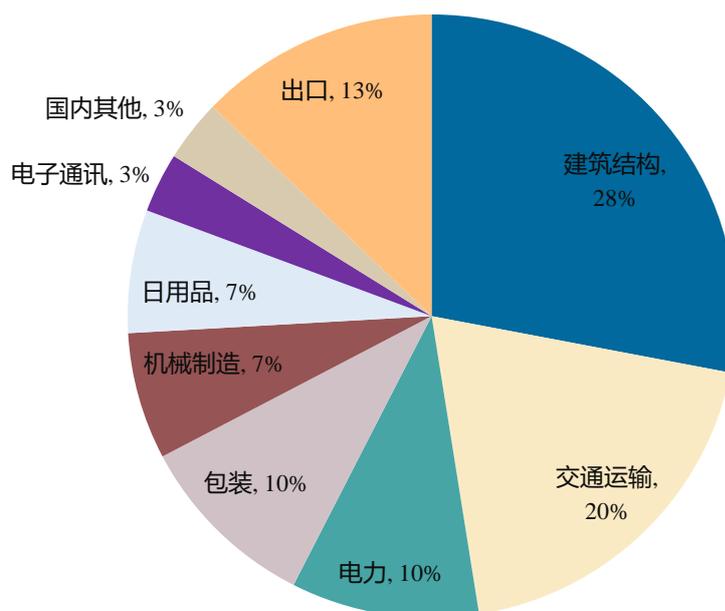


图 37 中国铝材消费领域

铝土矿依赖大量进口，氧化铝、原铝、铝材能够满足国内需求。铝土矿的主要用途是生产氧化铝，中国属于铝资源贫瘠型国家，铝土矿储量较少、品位低、开采难度大。生产 1 吨氧化铝需要约 2 吨高品位铝土矿^[46]，而生产 1 吨高品位铝土矿至少需要消耗 2 吨铝土矿储量。近年来随着中国氧化铝产量加速增长，国内市场对铝土矿的需求十分强劲，原料供求关系趋于紧张，铝土矿供应量不能满足铝材实际生产的需要，依赖大量进口。1998 年后，中国由铝土矿净出口国变为净进口国，从通过出口资源争取外汇的阶段转向以进口资源型产品来满足国内发展需求的阶段。中国对于铝土矿的进口量逐年递增，2006 年铝土矿进口量为 926 万吨，2007 年进口升至 2300 万吨，2014 年中国成为最大的铝土矿进口国^[94]，2018 年进口量突破 1 亿吨，2020 年达到 1.12 亿吨，主要来源为印尼、印度和澳大利亚。中国铝土矿逐步呈现出进口量增速快、进口国过于集中、使用企业过于集中的特点。

如图 38 所示，近年来随着冶炼产能的扩大促进了氧化铝消费量的增长，长期以来，中国对氧化铝的进口量远高于出口量，近年来随着氧化铝总产能的释放进口量有下降趋势。当前，中国氧化铝供应处于小幅短缺或紧平衡状态^[95]。2020 年氧化铝进口量为 381 万吨，出口 15 万吨，出口量远高于进口量。如图 39 所示，2018 年之前中国铝材出口量呈现逐年上升趋势，2018~2020 年以年均 3.6% 的降幅下降。2020 年中国铝及铝合金产品进口量为 271 万吨，出口 486 万吨。

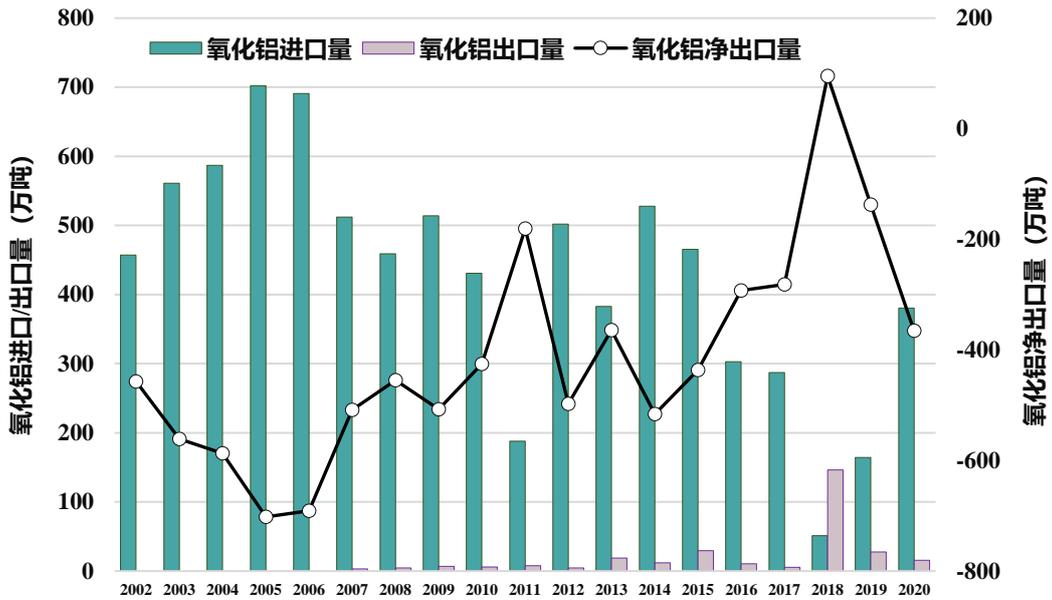


图 38 2002~2020 年中国氧化铝进出口量

注：数据来源于国家统计局，中华人民共和国海关总署等

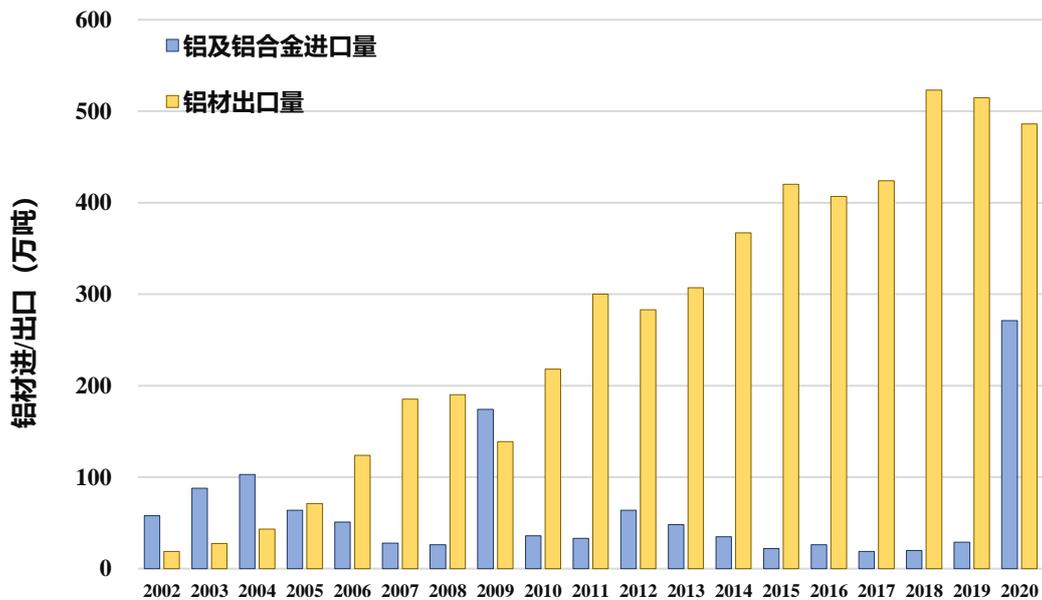


图 39 2002~2020 年中国铝材进出口量

注：数据来源于国家统计局，中华人民共和国海关总署等

4.1.5 炼焦行业

炼焦是传统煤化工的代表行业，焦炭产量持续增长。炼焦是指炼焦煤在隔绝空气条件下加热到 1000°C 左右（高温干馏），通过热分解和结焦产生焦炭、焦炉煤气和其他炼焦化学产品的工艺过程。1991 年中国的焦炭产量跃居世界第一，1994 年焦炭年产量超 1 亿吨。过去二十年间中国炼焦行业迅速发展，焦炭产量

持续上升。2021 年全国焦炭产能达到 6.3 亿吨，产量为 4.6 亿吨，较 2000 年增长 3.4 亿吨。如图 40 所示，2001~2005 年、2006~2010 年间全国焦炭产量分别以 17.1%和 8.0%的年平均增速迅速增长，2010 年之后焦炭产能和产量整体平稳，2011~2015 年、2016~2020 年间焦炭产量年均增速分别降至 3.2%和 1.1%。

焦炭主要用于钢铁冶炼。2020 年全国焦炭消费约 4.8 亿吨，按用途可分为冶金焦（高炉焦、铸造焦和铁合金焦等）、气化焦（用于生产煤气的焦炭）和电石用焦。其中，焦炭在钢铁冶炼过程中起到骨架支撑、提供热源、还原剂、渗碳剂等重要作用，高炉用冶金焦用量占全国焦炭消费总量的 85%左右，是焦炭最主要用途。由于用量较大，为降低成本提高综合效益，降低货运需求，钢铁联合焦化企业产能与产量呈现逐渐上升趋势。大多数独立炼焦企业由于上游没有煤矿，下游缺少钢铁企业作为依托，产业集中度较低不具备规模优势，近年来产量逐渐下降。2021 年钢铁联合焦化企业焦炭产量为 1.1 亿吨，同比增长 5.5%，约占全国焦炭产量的 24%；其他焦化企业焦炭产量 3.5 亿吨，同比下降 4.3%，占比约为 76%。此外，化工、机械、有色行业焦炭消费占比分别为 8%、1.6%和 1.4%。

焦炭进口量逐渐增长，出口量下降。如图 41 所示，从进出口情况看，中国焦炭净出口量整体呈现下降趋势。2000~2008 年焦炭年出口量稳定在 1400 万吨左右，进口量极低；2009~2012 年出口量骤减，年出口量降低至 300 万吨以下；2012~2018 年焦炭出口量有所反弹，年均出口量上升至 740 万吨，同时进口量有所上升；2018 年后焦炭出口量逐年递减，进口量明显上升，2018、20019 与 2020 年焦炭进口量分别为 9、52 和 298 万 t。2020 年中国焦炭出口 349 万吨，进口 298 万吨，净出口 51 万吨，是近 20 年来最低值。相较于其他煤种，炼焦煤属于稀缺资源，中国低硫分优质主焦煤资源尤其有限。2020 年我国炼焦煤进口量达到 7264 万吨，近年来每年需要从国外进口焦煤约 7000 万吨，且进口煤占我国焦煤总供给的比例逐年提升，对外依存度逐渐提高。

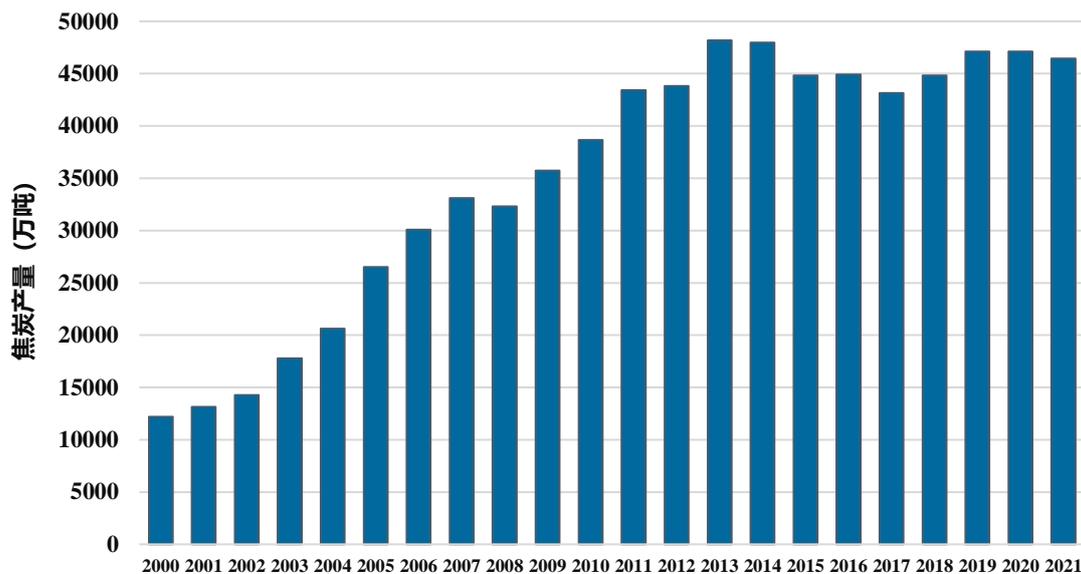


图 40 2000~2021 年中国焦炭产量

注：数据来源于国家统计局

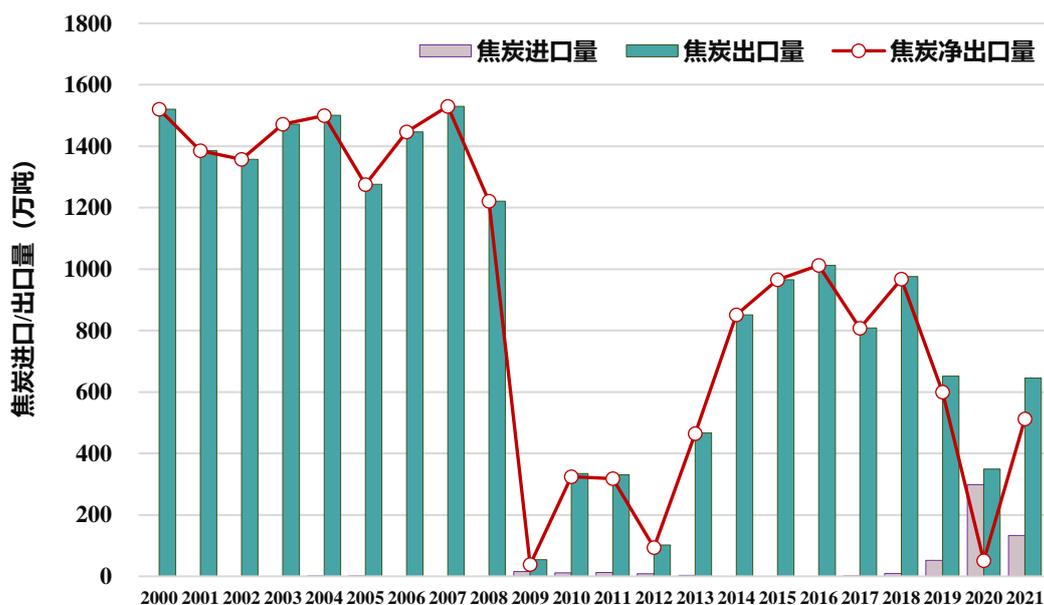


图 41 2000~2021 年中国焦炭净出口量

注：数据来源于国家统计局，中华人民共和国海关总署等

4.1.6 建筑行业

中国建筑面积总量高速增长，增量来自城镇居住建筑与城镇公共建筑。如图 42 所示，2010~2020 年间，中国建筑面积总量以年均 3.9% 增速持续增长，由 469 亿平方米增长至 688 亿平方米。其中，城镇居住建筑增速最快，由 2010 年 141 亿平方米增长至 2020 年 287 亿平方米，年平均增速达 7.4%，2020 年城镇居民建

筑占全国建筑总面积的 42%；城镇公共建筑面积由 75 亿平方米增长至 127 亿平方米，年均增长率为 5.4%，2020 年城镇公共建筑面积约占建筑总面积的 18%；农村建筑逐步达到平台期，由 2010 年 253 亿平方米增长至 2020 年 274 亿平方米，年均增长率仅为 0.8%，2020 年农村建筑约占总面积的 40%。由此可见，受中国近十年来城镇化进程影响，农村建筑面积增幅较小，城镇居住建筑和公共建筑是建筑规模主要增长领域。与此同时，人均建筑面积不断增加。2010~2020 年，中国城镇人均居住建筑面积从 21 平方米/人提高到 33 平方米/人，城镇人均公共建筑面积从 11 平方米/人提高到 15 平方米/人，农村人均建筑面积从 3 平方米/人提高到 51 平方米/人。随着人民生活水平提高，我国城镇和农村人均建筑面积均逐年上升，但受到城镇化发展过程中农村人口大量进城影响，农村人均建筑面积增幅远高于城镇人均建筑面积^[96]。

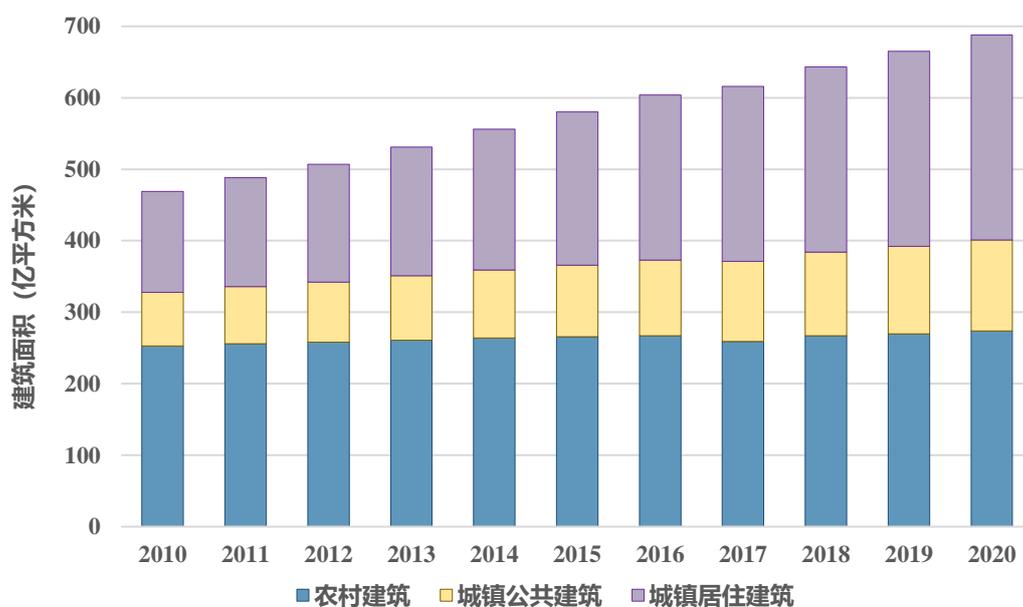


图 42 2000~2021 年中国各类建筑规模变化

建筑领域能源消费以电力、煤炭和天然气为主。2020 年，建筑领域能源总消费量为 7.7 亿吨标煤，其中，电力消费量为 2.9 亿吨标煤，占比 28%；煤炭消费量为 2.2 亿吨，占比 28%；天然气消费量为 1.5 亿吨标煤，占比 20%；液化石油气消费量为 0.59 亿吨，占比 8%；生物质、地热等其他能源消费量为 0.45 亿吨，占比 6%。从不同区域不同建筑类型来看，北方城镇集中供暖以煤炭、天然气和电力为主，城镇居住建筑用能以电力、天然气和液化石油气为主，城镇公共建筑用能以电力、天然气和煤炭为主，农村建筑能耗以电力、煤炭等为主。

4.2 货物运输现状

本研究通过文献资料分析、行业专家咨询、企业实际调研等方法，结合宏观统计数据摸清重点行业货运需求现状，包括各行业主要运输货类、单位产品原材料燃料消耗量、运输结构与运输距离等，详细数据如表 3 所示。

4.2.1 运输结构与运距

表 3 大宗商品货运现状

大宗商品 货类	涉及行业	运输结构 (公路：铁路： 水路)	公路 运距 (km)	铁路 运距 (km)	水路 运距 (km)	数据 来源
煤炭	电力、钢铁、水泥、 铝冶炼、炼焦、建筑	13%：73%：14%	433	656	1390	102 家电力企业调研 国家统计局
焦炭-独立炼焦	炼焦、钢铁	44%：31%：25%	840	992	1390	5 家炼焦企业调研 国家统计局
焦炭-联合炼焦	炼焦、钢铁	100%：0%：0%	23	0	0	35 家钢铁企业调研 国家统计局
铝土矿	铝冶炼	28%：34%：38%	176	501	1390	15 家铝冶炼企业调研 国家统计局
铁矿石	钢铁	30%：38%：32%	790	501	1390	35 家钢铁企业调研 国家统计局
石灰石	水泥、钢铁	89%：6%：5%	255	534	1390	36 家水泥企业调研 国家统计局
钢材	钢铁	44%：36%：20%	555	806	1390	35 家钢铁企业调研 国家统计局
水泥	水泥	93%：2%：5%	334	359	1390	36 家水泥企业调研 国家统计局
铝材	铝冶炼	46%：26%：28%	1200	806	1390	15 家铝冶炼企业调研 国家统计局
砂石骨料	建筑	90%：2%：8%	155	327	1390	5 家建筑企业调研 国家统计局

(1) 煤炭

2020 年中国煤炭消费量约 40.5 亿吨，其中煤炭产量约 38.4 亿吨，进口 3.03 亿吨，基本实现供需平衡。煤炭供需格局受资源分布、生产分布、消费分布、运销链环节以及政策调控要素影响，中国煤炭资源北多南少、西富东贫，煤炭生产主要分布于山西、陕西及内蒙古以及新疆等地，如图 43 所示，2020 年“晋陕蒙”

三个省份煤炭产量约 27.4 亿吨，占全国煤炭产量的 71%，2021 年国内煤炭产量进一步中西部集中“晋陕蒙”煤炭产量占比提升至 72%。如图 44 所示，煤炭下游消费地区除山西、内蒙古外，更多集中在华东、华南等地区，煤炭生产和消费之间存在错配，促使我国形成了“北煤南运，西煤东运”的煤炭物流基本格局。

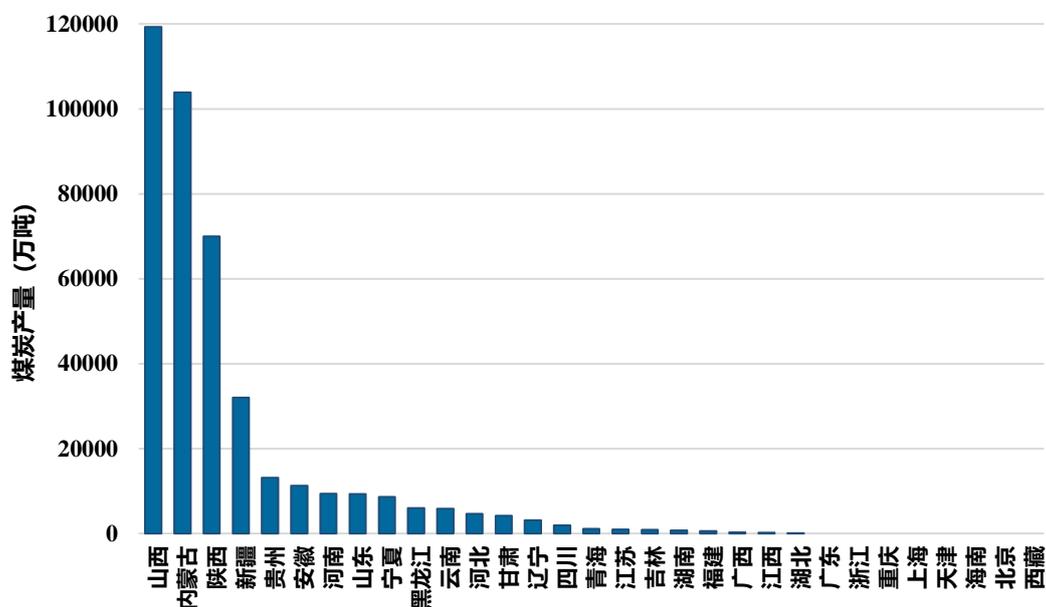


图 43 2020 年中国各省煤炭产量

注：数据来源于国家统计局

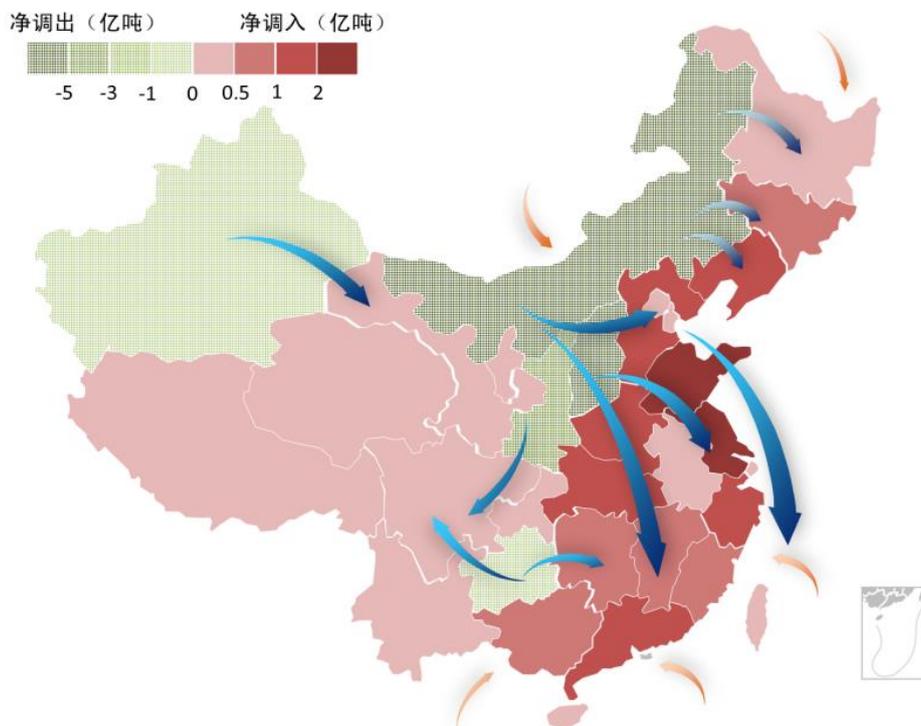


图 44 中国煤炭运输格局

注：图片来源于《煤炭工业发展“十三五”规划》

煤炭利用铁路、水路和公路运输，包括直达运输或铁公水多式联运。研究显示中国煤炭铁路、公路、水运占比为约 7:2:1，铁路是首要的运输方式，大量煤炭自西向东、由南向北、长距离、多次转运。为解决煤炭跨地域的供需矛盾，国家能源局发布的《煤炭工业发展“十三五”规划》^[97]，煤炭铁路运输将以晋陕蒙煤炭外运为主，全国形成“九纵六横”的煤炭物流通道网络，其中铁路通道包含“七纵五横”。从主产区的外运通道来看，晋陕蒙煤炭外运铁路通道由横向北通路（大秦、朔黄、蒙冀、丰沙大、集通、京原）、中通路（晋中南、石太、邯长、和邢）、南通路（侯月、陇海、宁西）以及纵向通路（焦柳、京九、京广、包西、蒙华）构成。上述地区主要以铁路直达的方式供应京津冀、东北地区，以下水煤方式供应华东、华南等地，海进江方式供应长江沿线省市。其中，大秦、朔黄、蒙冀、瓦日为我国西煤东运四大通道。国务院办公厅印发《推进运输结构调整三年行动计划（2018~2020 年）》，提出以京津冀及周边地区、长三角地区、汾渭平原等地为主，推进大宗货物运输公转铁、公转水，减少公路运输量，增加铁路运输量^[98]。中国国家铁路集团有限公司日前发布的《2018~2020 年货运增量行动方案》提出，到 2020 年，全国铁路煤炭运量要达到 28.1 亿吨，较 2017 年增运 6.5 亿吨，铁路运输煤炭要占全国煤炭产量的 75%^[99]。受成本和运价影响，公路煤炭运输只适合于短途运输，作为铁路和水路运输的重要补充。从成本核算角度来看，公路运煤经济运距不应超过 510km^[100]，但在铁路运量紧张，铁路运能无法满足需求的情况下，许多用煤企业不得不选择公路运输。在煤炭生产基地和煤炭运输中转港腹地，一直有部分中短途公路直达运输或公路集港运输。水路运输包括海运和内河运输，海上运输首先通过铁路或公路将煤炭从生产基地集结到北方沿海中转港口，再由海轮运向环渤海湾、华东、中南地区和国外。内河运煤通道主要包括长江和京杭运河，将来自晋、冀、豫、皖等地及海进江（河）煤炭经长江或运河的中转港或主要支流港中转后，用轮驳船运往华东和沿江用户。煤炭主要下水港包括沿海北方七港，即秦皇岛港、天津港、黄骅港、京唐港、青岛港、日照港和连云港；内河下水港包括长江四港（南京港、武汉港、芜湖港、枝城港）及京杭运河上的徐州港和珠江水系的贵阳港。

目前对于公铁水各类运输方式的煤炭运输比例尚缺乏官方统计，《2018~

2020 年货运增量行动方案》预测 2020 年全国铁路煤炭运量要达到 28.1 亿吨，约占 2020 年煤炭实际消费量的 69.4%^[99]。本研究基于全国 21 个省份 102 家²火电企业实际调研，并对比文献资料调研数据综合研判，估算 2020 年全国火电企业煤炭运输铁路、水路、公路比例分别为 73%、13%和 14%。公路煤炭的平均运距基于 102 家火电企业调研公路煤炭运输半径交叉分析，如图 45 所示，公路煤炭平均运距为 433km；水路煤炭运距参考 2020 年全国水路货运平均运距 1390km；铁路煤炭运距参考 2020 年全国铁路煤炭平均运距 656km。

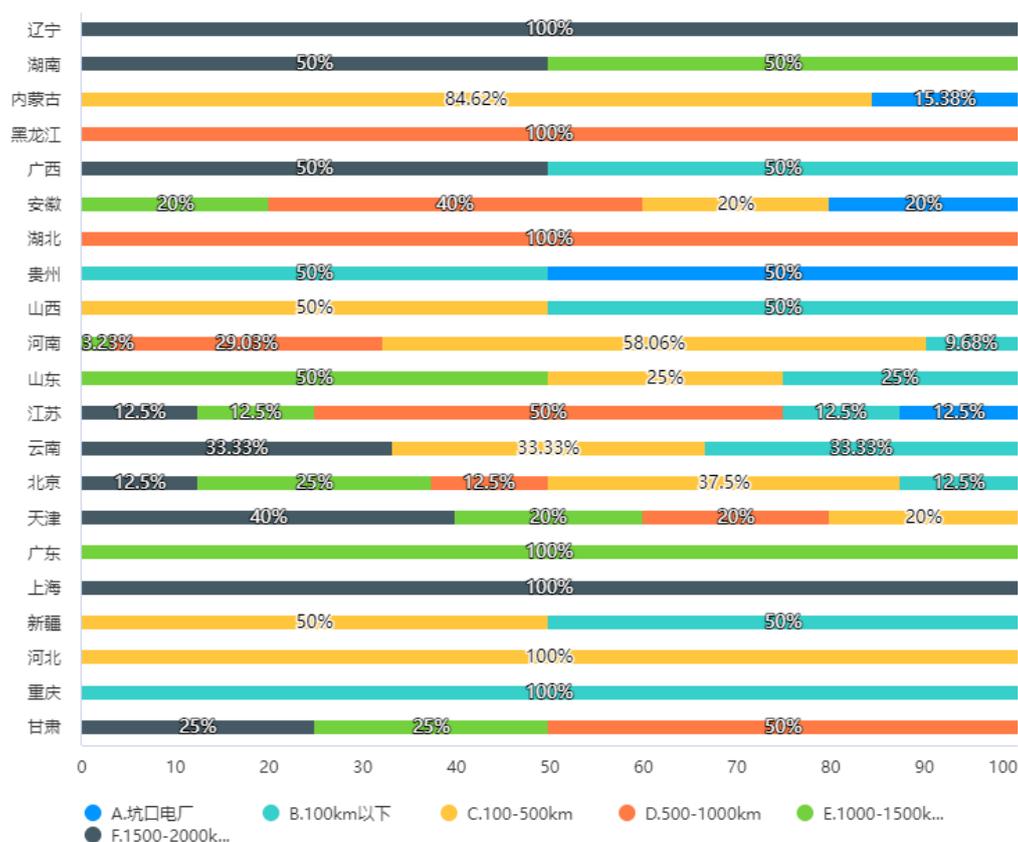


图 45 各省调研火电企业公路煤炭运输半径交叉分析

(2) 焦炭

焦炭生产区分独立炼焦与钢铁企业联合炼焦，不同生产方式的企业运输方式与运输距离差别较大。根据 2021 年数据，钢铁联合焦化企业焦炭产量约占 24%，

² 102 家调研企业分布于全国 21 个省市自治区：河南（31 家）、内蒙古（13 家）、辽宁（10 家）、江苏（8 家）、安徽（5 家）、浙江（5 家）、山东（4 家）、新疆（4 家）、江西（4 家）、云南（3 家）、湖南（2 家）、广西（2 家）、山西（2 家）、黑龙江（2 家）、河北（1 家）、湖北（1 家）、广东（1 家）、福建（1 家）、重庆（1 家）、陕西（1 家）、上海（1 家）

独立炼焦企业焦炭产量约占 76%。对于独立炼焦，基于 5 家炼焦企业调研数据估算公路、铁路和水路运输比例为 44%：31%：25%，焦炭公路运距参考其他研究取值 840km^[101]，焦炭铁路运距参考 2020 年全国铁路焦炭平均运距 992km，水路焦炭运距参考 2020 年全国水路货运平均运距 1390km。对于钢铁联合炼焦企业，按照 100%由公路运输估算，基于 35 家钢铁企业调研数据平均运距为 23km。

(3) 铁矿石与钢材

钢铁企业物料运输区分为内部运输与外部运输。内部运输方面，钢铁企业设施布局紧密，大宗原料、燃料多采用厂内皮带运输的方式^[102]，在外部运输方面，基于布局、采购与销售半径及运输成本等多方面因素的综合考量，采用多种运输方式满足企业的外部运输需求，包括铁路、水路、公路、管道和皮带等。国内早期建设投产的大型钢铁企业基本有自己的矿山，但仍需每年从国外进口的大量铁矿石。进口铁矿石运输大致分为三类，一是对于少数紧邻沿海港口的大型钢铁基地，通过港口直接输送到生产企业，大大降低运输距离与成本；二是对于内地钢铁企业需要通过港口倒运的方式运输至企业，例如需要通过沿海港口倒小船进行内河运输，运至内河港口，之后再通过皮带机、公路、铁路专用线等运输方式运至工厂（长江沿线马钢、武钢、沙钢等）；三是部分内地企业直接采用铁路运输方式利用国铁线路运输至企业与国铁的接轨站，再由公路或铁路专用线运至场内（华北地区太钢、邯钢，西北地区包钢，西南地区攀钢、水钢等）。基于对 35 家国内长流程钢铁企业调研数据并结合文献资料分析，估算 2020 年全国钢铁企业铁矿石公路、铁路、水路运输比例分别为 30%、38%和 32%，铁矿石公路运距参考其他研究结果取值 790km^[101]，铁路运距参考 2020 年全国金属矿石平均运距 501km，水路运距参考全国水路货运平均距离 1390km。

钢材消费具有涉及行业类别多、规模小、用户分散、需求种类多等特征，钢铁企业难以满足分散且需求量小的用户需求，大部分通过市场经销商集散后流通到达用户，企业直销比例较低。通过对 35 家钢铁企业钢材运输情况实际调研，估算 2020 年全国钢铁企业公路、铁路、水路钢材运输比例分别为 44%、36%和 20%。全国不同地区钢材的公路运距差异较大，例如紧邻山东钢铁、日照钢铁等大型钢铁生产基地，山东省内钢材运输半径大多在 400km 以下；西南地区每年

消耗大量钢材,但因生产基地与消费地区不完全匹配,缺乏大型钢铁生产基地群,造成了钢材运输距离平均在 1000km 以上。本研究对于钢材的公路平均运距参考其他研究结果取值 555km^[101],铁路运距参考 2020 年全国钢铁及有色金属平均运距 806km,水路运距参考全国水路货运平均距离 1390km。

(4) 石灰石与水泥

水泥由于具有原料和产品运输量大、运费占售价比重高、产品保质期较短等因素的影响,在销售范围上存在一定的地域限制。就普通水泥而言,一般通过汽车运输的合理运输半径约为 150~200 公里,通过铁路运输的合理运输半径约为 300~500 公里,通过水路运输的合理运输半径在 600 公里以上。无论是袋装还是散装,水泥的生产成本较低,成品水泥出厂一般在 200~300 元/吨,这就导致水泥的运输距离被限制在一定范围,通常公路汽运半径在 300 公里以内,运费 110 元/吨左右,若超出此距离,随着综合成本升高,与当地水泥相比,丧失竞争力。基于国内 36 家水泥企业调研数据结合文献资料分析,估算 2020 年全国水泥行业公路、铁路、水路运输比例分别为 93%、2%和 5%。水泥公路平均运距参考其他研究结果取值 334km^[101],铁路运距参考 2020 年全国水泥平均运距 359km,水路运距参考全国水路货运平均距离 1390km。

由于石灰石产区丰富且价格较低,运输成本成为石灰石物料运输中首要考虑的因素。由于用量较大,调研显示,多数水泥企业选择在石灰石资源丰富的地区建厂,通过传送长廊或汽车运输至厂区,既保证了石灰石质量与供应稳定,又最大程度上降低了石灰石运输成本。基于对 36 家水泥企业石灰石运输现状调研,结合前述钢铁企业石灰石运输调研结果,估算全国石灰石公路、铁路、水路运输比例分别为 89%、6%和 5%,石灰石公路运距基于调研结果取值 155km,铁路运距参考 2020 年全国矿建材料平均运距 327km,水路运距参考全国水路货运平均距离 1390km。

(5) 铝土矿与铝材

铝冶炼行业物流特点及区域布局特征呈现出以资源、交通、市场为导向的不同产业集群。其中氧化铝围绕铝土矿主要产地,分布在山东、河南、广西、山西等地区。电解铝受电力成本影响较大,当前主要电解铝生产企业共有 150 余家,

从规模集中度来看，前十家电解铝产量占全国比例超过 80%，主要分布在西北、西南、山东、河南等地；铝加工产业受各地区工业基础和下游制造业分布影响，集中在河南、广东、山东等省区。鉴于资源产地、能源优势区域和终端市场在空间分布跨度较大，铝产业链的物流服务需求和物流量将持续上升。铝产业链上游的基础资源及下游产业集群布局在空间上的差异化分布，决定了大宗货物中场局转运的基本格局。基于对国内 15 家电解铝企业调研数据结合文献资料分析，估算 2020 年全国铝冶炼行业公路、铁路、水路铝土矿运输比例分别为 28%、34% 和 38%。铝土矿公路运距参考 2020 年全国公路货运平均距离 176km，铁路运距参考 2020 年全国金属矿石平均运距 501km，水路运距参考全国水路货运平均距离 1390km。

基于 15 家典型企业调研数据结合文献资料分析，估算 2020 年全国原铝和铝材公路、铁路、水路运输比例分别为 46%、26%和 28%。公路运距采用 15 家企业调研平均运输运距 1200km，铁路运距参考 2020 年全国铁路钢铁及有色金属平均运距 806km，水路运距参考全国水路货运平均距离 1390km。

(6) 砂石骨料

我国建筑砂石骨料生产企业基本没有存货，生产出成品料后在短时间内销往下游用户。从全流程的链条看，砂石骨料运输主要包括矿山开采、运输、搅拌站加工和使用四个环节，产品特性明显，为降低运输成本砂石骨料一般就近销售，运输半径小，跨区域协调和运输较为困难。根据建筑砂石骨料分省消费量分析，除北京、上海和天津等地的建筑砂石骨料基本上通过外省市进入，其他省市的建筑砂石骨料主要通过省市内部运输流通基本能够满足本省市建设需要^[103]。基于 5 家企业实际调研估算砂石骨料公路、铁路、水路运输比例分别为 90%、2%和 8%，公路运距参考其他研究结果取值 200km^[47]，铁路运距参考 2020 年全国铁路矿建材料平均运距 327km，水路运距参考全国水路货运平均距离 1390km。

4.2.2 单位产品货运需求

中国火力发电量的 95%左右来自燃煤（含煤矸石、煤泥等）电厂，天然气发电占比约为 5%，燃油发电占比极低。历史数据显示，火电企业整体能效水平持

持续提升，单位供电煤耗持续下降。根据中国电力企业联合会统计，如图 46 所示，2020 年，全国 6000 千瓦及以上电厂供电标准煤耗 304.9 克/千瓦时，较 2010 年 333.3 克/千瓦时下降 8.5%。单位供电煤耗持续下降但降速放缓，“十二五”时期年均下降 1.1%，“十三五”时期年均下降 0.6%，2018、2019 和 2020 年降幅分别为 0.6%、0.4%和 0.5%。如图 47 所示，基于 2020 年全国 2143 台火电机组数据得到单位供热煤耗与单位供热煤耗加权平均值，结果如表 4 所示。

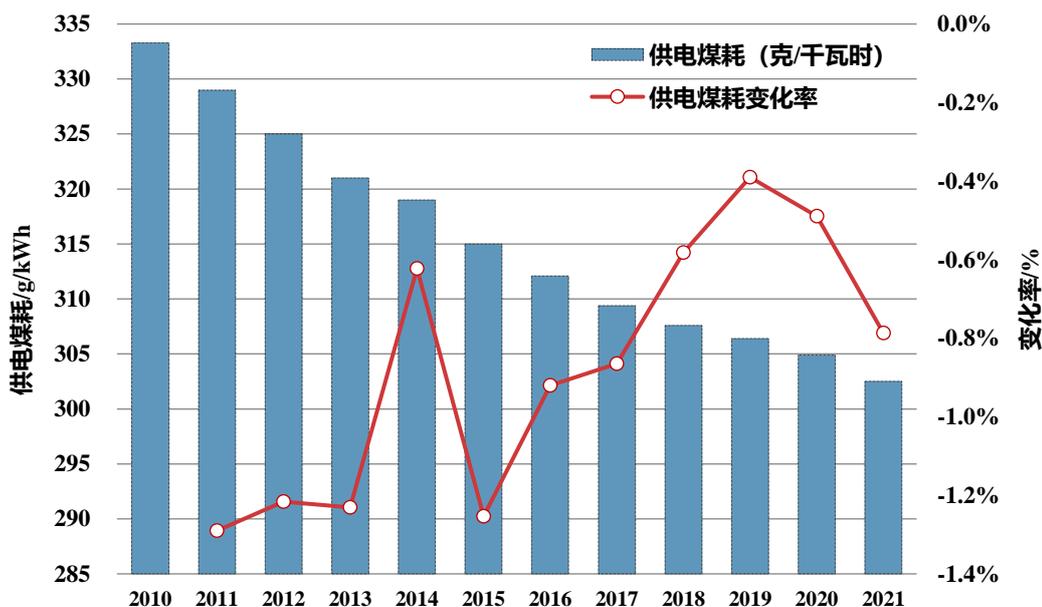


图 46 2010~2021 年全国 6000 千瓦及以上电厂供电标准煤耗

注：数据来源于中国电力企业联合会

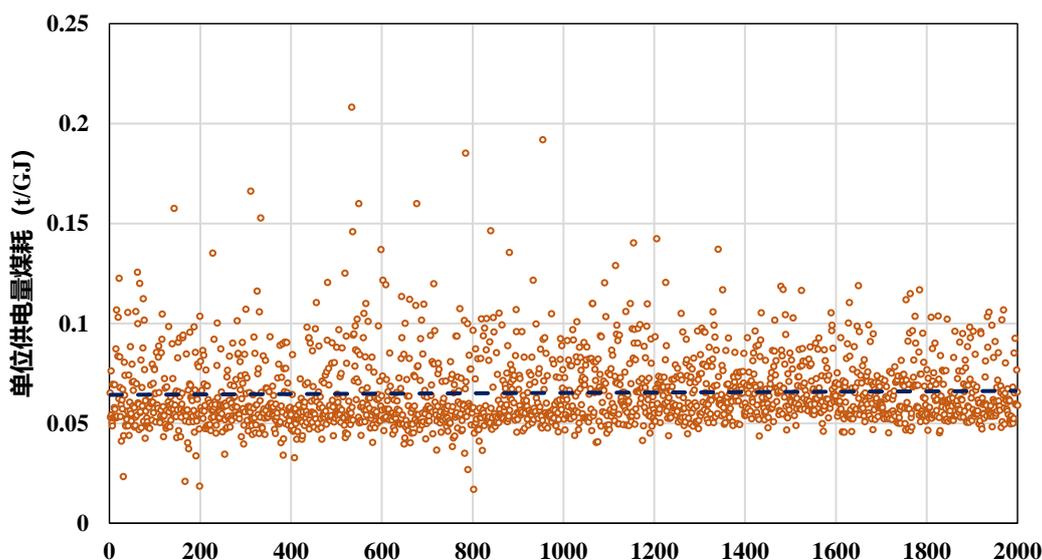


图 47 2143 台样本机组单位供热量煤耗量

钢铁行业大宗商品运输主要包括三类，一是对铁矿石、石灰石大宗原材料的

采购与运输；二是对于焦炭、煤炭等大宗燃料的运输，三是钢材产成品的运输，包括型钢、棒材、钢筋、线材、钢板等。此外，钢铁企业其他运输需求来自对于树脂、盐酸、润滑油等耗材的采购与运输以及对于炉渣等废弃物的运输。本研究对于钢铁行业运输货类仅针对于铁矿石、石灰石、煤炭、焦炭、钢材的运输。长流程与短流程炼钢的货运需求差异较大。如图 48 所示，长流程炼钢是从烧结矿、球团矿、焦炭等炼钢所需原燃料准备开始，原料进入高炉经还原冶炼得到液态铁水，向铁水中加入氧化剂、脱氧剂和造渣材料，去除铁水中的杂质，铁水预处理后（如脱硫、脱硅、脱碳等）进入转炉，经过供氧吹炼、加矿石、脱炭等工序，将铁水中的杂质氧化除去，最后加入合金，进行合金化，便得到钢水。随后，将钢水导入钢包中，经二次精炼使钢水纯洁化，然后将钢水经连铸工艺凝固成型成为钢坯，再经轧制工序最后成为钢材。长流程炼钢过程涉及非常复杂的主料与辅料使用，吨钢货运需求大约在 4~5 吨^[104]。基于对于国内 35 家大型长流程钢铁企业调研数据，结合宏观统计数据计算，如表 4 所示，在无废钢资源替代的情况下，长流程炼钢每吨生铁大约需要铁矿石 1.6 吨、煤炭 0.31 吨、焦炭 0.42 吨，此外每吨粗钢还需石灰石约 0.2t。短流程炼钢主要指将废钢等投入电炉融化炼钢，短流程炼钢具有工艺简单、效率较高、能耗低、碳排放低、物料运输需求低等优势。短流程炼钢运输需求主要来自废钢等原材料运输以及产品运输。综合对于 5 家短流程炼钢调研结合行业专家判断，短流程炼钢每吨粗钢产品大约需要 1.07 吨废钢。

水泥行业货运具有运量需求大、所需货类多、运输半径短、时效要求高等特点。水泥行业货运需求主要包括三类，一是原材料的采购与运输，主要包括石灰石、粘土、铁质校正材料、石膏、混合材料、城市固废等，中国生产 1 吨通用水泥需要的直接物质投入大约 1.73 吨^[105]。二是对于煤炭等燃料运输。三是水泥熟料、水泥等产品以及其他固废的运输。因此，本研究对于水泥行业运输货类聚焦于对于石灰石、煤炭与水泥产品的运输。水泥熟料生产过程中的能源消耗以燃煤为主，煤炭占水泥生产所消耗能源的 80%~85%左右，电力消耗折合标煤占比 12%左右，其它燃料占 1%~2%。根据 900 余条水泥熟料生产线（涉及产量占水泥熟料总产量的 50%以上）实际运行情况分析，正常运行的熟料生产线熟料烧成煤耗

在 92~128 千克标准煤/吨，熟料综合电耗在 45~66 千瓦时/吨，熟料综合能耗在 98~136 千克标准煤/吨。2019 年已有 26 家水泥企业熟料综合能耗已达 100 千克标准煤/吨的世界先进水平，但也存在部分能耗较高的企业急需技术改造。调研显示 2020 年每吨熟料煤炭消耗量约 0.145 吨。研究显示，每生产 1 吨水泥熟料需消耗约 1.3 吨石灰质原料^[106-107]，根据 2020 年全国水泥行业石灰石消耗量约 19 亿吨，熟料产量约 15.5 亿吨，估算每吨熟料的石灰石平均消耗量约 1.23 吨。

对于炼焦企业，主要货运需求在于上游煤炭运输、下游焦炭运输以及少量焦油渣等固废运输。本研究货类仅针对于炼焦企业的煤炭与焦炭运输。根据对典型焦化企业调研显示，炼焦过程需要的主要原料是炼焦煤，分气煤、肥煤、焦煤、瘦煤四大类，炼焦过程需要将不同煤种按照一定比例混合粉碎后进行配煤，少数钢铁企业联合炼焦在配合煤中还掺混焦油渣和污泥，结果显示吨煤（干基）约产出 0.71~0.76 吨焦炭。从行业宏观数据来看，2020 年炼焦行业投入煤合计 65968 万吨，产出焦炭 47188 万吨，单位焦炭煤耗约为 1.398 吨煤/吨焦炭。

铝冶炼行业主要货运需求在于上游煤炭、铝土矿、氧化铝、再生铝、炭阳极等原料燃料以及下游原铝、铝材产品运输。本研究货类仅针对于铝冶炼行业的铝土矿、煤炭、原铝和铝材运输。铝土矿等原料与煤炭等燃料的消费与运输主要用于氧化铝的生产环节。氧化铝是生产电解铝的主要原料，中国 95% 以上的氧化铝用于生产电解铝，研究显示，生产 1 吨电解铝需要约 2 吨氧化铝^[46,108]。氧化铝生产工艺流程分为烧结法、拜耳法或两种混合，当前中国大多数工厂使用拜耳法生产氧化铝^[109]。2020 年中国氧化铝产量为 7313 万吨，消耗铝土矿约 1.7 亿吨，每吨氧化铝大约需要消耗 2.346 吨铝土矿，合计消耗煤炭 4149 万吨，每吨氧化铝生产过程中平均消耗 0.567 吨煤炭。

对于建筑行业，运输需求分为建造阶段与使用运行环节的运输需求。建造阶段的运输需求主要针对建筑材料及制品、非金属矿物材料、无机非金属新材料的运输，包括使用量巨大的水泥、砖瓦、沙石等，以及平板玻璃、建筑陶瓷、保温材料等。本研究货类仅针对于建筑行业在建造阶段的砂石骨料运输。建筑砂石骨料是指混凝土中起骨架或填充作用的粒状松散材料，主要包括砂和石子，建筑砂石骨料是工程建设过程中使用最多的基建原材料。在 2007~2014 年间，我国砂石

骨料需求量从 102 亿吨迅速上升至 187 亿吨，需求量年均增长 9.1%，2014 年后砂石骨料需求量趋于稳定，需求量在 168~181 亿吨之间波动^[110]。据研究综合测算，每平方米民用建筑需砂石骨料 0.8 吨，每公里的道路建设需砂石骨料 60 吨^[47]，根据中国沙石协会统计，中国每平方米城镇建筑砂石骨料用量约为 0.8t^[111]。

表 4 2020 年各行业单位产品运量需求

行业类别	工艺流程	产品类型	所需货类	单位产品货运需求
电力	-	发电量	煤炭	0.397t/MWh
		供热量	煤炭	0.0619t/GJ
钢铁	长流程	生铁	铁矿石	1.60t/t
			煤炭	0.31t/t
			焦炭	0.42t/t
	短流程	粗钢	石灰石	0.20t/t
			钢材	-
			废钢	1.07t/t
水泥	-	熟料	废钢	1t/t
			煤炭	0.145t/t
			石灰石	1.23t/t
铝冶炼	电解铝	氧化铝	水泥	1t/t
			铝土矿	2.346t/t
			煤炭	0.567t/t
炼焦	-	铝材	-	1t/t
		焦炭	煤炭	1.398t/t
		焦炭	-	1t/t

4.3 货运量变化影响因素分析

对数平均迪氏指数法(LMDI)模型是以驱动效应分析的经典因子分解模型，使用部门加总数据，提取关键指标进行因素分析。LMDI 方法具有公式简洁、易于建模，在消除残差的同时还能满足因素可逆等优势，适用于研究连续变化的特征，广泛应用于交通、能源、环境等领域^[112-114]。货运需求变化受多种复杂因素影响，且影响程度不同。为量化分析不同影响因素对货运需求的影响，本研究采用 LMDI 方法建立分解模型，聚焦电力、钢铁、水泥和铝冶炼四个行业中运量最大的货类，通过分析不同货类 2011~2020 年货运量变化特征，提取关键指标，识别各类影响因素及作用效果。

4.3.1 煤炭驱动力分析

煤炭是电力行业运量最大的货类，对于煤炭货运量变化的综合效应分解为电力需求变化效应、电源结构优化效应和能效水平提升效应三个维度，如公式（4-1）、（4-2）所示。电力需求变化效应指全社会发电量变化的影响；电源结构优化效应指全口径发电量中非化石能源发电对火力发电的替代作用，以及火力发电量中燃气发电对燃煤发电的替代；能效水平提升效应指火电企业采取节能减排措施导致的单位发电煤耗量的下降。

$$\begin{aligned} C_{\text{煤}} &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n P_{\text{电}} \times \frac{H_{i,j}}{P} \times \frac{C_{1,i,j}}{H_{i,j}} \\ &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n P_{\text{电}} \times D_{1,i} \times I_{1,i,j} \end{aligned} \quad (4-1)$$

$$\Delta C_{\text{煤}} = \Delta P_{\text{电}} + \Delta D_1 + \Delta I_1 \quad (4-2)$$

运用以上模型，将电力煤炭货运量变化分解为 2010~2015 和 2015~2020 两阶段，影响因素定量分解结果如图 48 所示：

（1）过去十年间电力煤炭货运量持续增长，2015 年货运量较 2020 年增长 3.05 亿吨，上升 21.8%，2020 年较 2015 年增长 3.16 亿吨，上升 18.6%。电力需求效应是促进电力煤炭货运需求上升的正向驱动力，电源结构优化、能效水平提升是负向驱动力，在相同产量条件下降低了货运量。

（2）电力需求增长拉动全社会发电量上升，是导致电力煤炭货运量增长的决定性因素。全口径发电量从 2010 的 4.2 万亿千瓦时增长到 2020 的 7.8 万亿千瓦时，增长 3.6 万亿千瓦时，上升 85%。2010~2015 和 2015~2020 年间，电力需求增长因素拉动煤炭货运量分别增长 5.2 和 5.4 亿吨，对于货运量实际增量的贡献率分别为 171% 和 172%。

（3）电源结构优化对于降低煤炭货运量的影响最为显著。中国非化石能源发电量由 2010 年 0.9 万亿千瓦时上升至 2020 年 2.4 万亿千瓦时，上升 180%，同时，天然气发电量在火力发电量中的占比由 2010 年 1.8% 上升至 2020 年 5.1%，电源结构不断优化，燃煤发电量在全社会发电量中的占比由 2010 年的 77% 下降至 2020 年 59%。2010~2015 和 2015~2020 年间，电源结构优化因素导致电力煤

炭货运量分别下降 1.45 和 1.52 亿吨，对于货运量实际增量的贡献率分别为-47%和-48%，是降低煤炭货运量的首要因素，且随着时间推移，电源结构优化对于货运量的削减作用逐渐显著。

(4) 能效水平提升是降低电力煤炭货运量的另一因素。近十年来火电行业整体能效水平持续提升，2020 年单位供电煤耗较 2010 年下降 8.5%。2010~2015 和 2015~2020 年间，能效水平提升因素导致电力煤炭货运量分别下降 0.73 和 0.73 亿吨，对于货运量实际增量的贡献率分别为-24%和-23%。

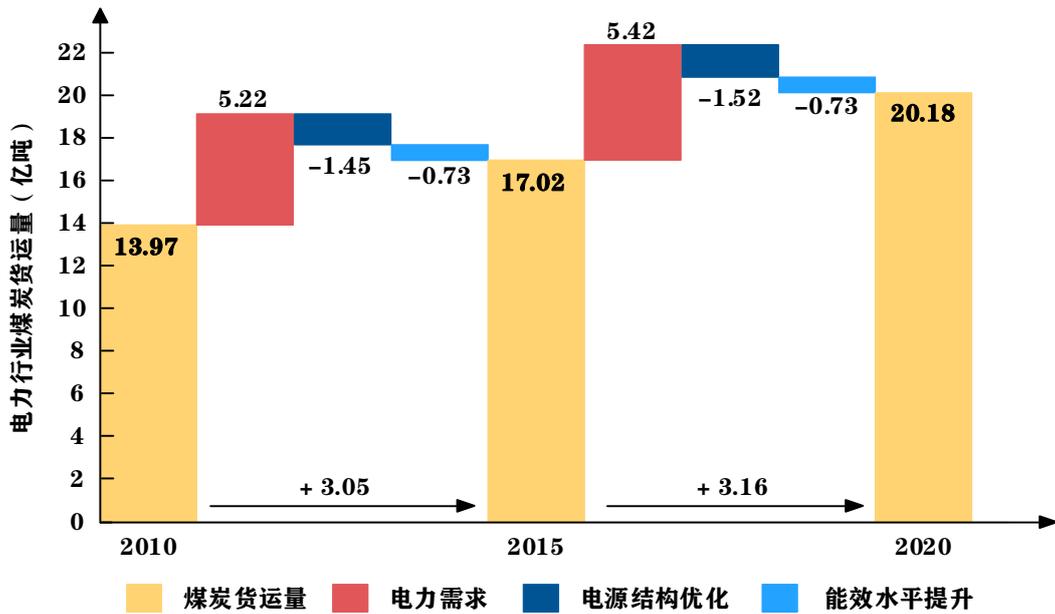


图 48 电力行业煤炭货运量驱动因素分解

4.3.2 铁矿石驱动力分析

铁矿石是钢铁行业运量最大的货类，对于铁矿石货运量变化的综合效应分解为粗钢需求效应、废钢替代结合工艺优化效应和矿料优化效应三个维度，如公式（4-3）、（4-4）所示。粗钢需求效应指由于下游钢材消费需求导致的粗钢产量变化；废钢替代结合工艺优化效应指废钢资源利用率变化以及长流程与短流程炼钢比例的影响；矿料优化效应指采用“多碎少磨”或“以碎代磨”等降低最终碎矿粒度等方式降低铁矿石消耗量的措施对于铁矿石货运量的影响。

$$\begin{aligned}
 C_{\text{铁}} &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n P_{\text{粗钢}} \times \frac{H_{2,ij}}{P} \times \frac{C_{2,ij}}{H_{i,j}} \\
 &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n P_{\text{粗钢}} \times D_{2,i} \times I_{2,ij}
 \end{aligned} \tag{4-3}$$

$$\Delta C_{\text{铁}} = \Delta P_{\text{粗钢}} + \Delta D_2 + \Delta I_2 \quad (4-4)$$

运用以上模型,将钢铁铁矿石货运量变化分解为 2010~2015 和 2015~2020 两阶段,影响因素定量分解结果如图 49 所示:

(1) 过去十年间钢铁行业的迅速发展,铁矿石需求量与货运量持续增长。2015 年铁矿石货运量较 2000 年增长 1.4 亿吨,上升 14.3%,2020 年较 2015 年增长 3.0 亿吨,上升 27.1%。粗钢需求增长是促进货运量增长的正向驱动力,废钢资源替代结合工艺优化、矿料优化是负向驱动力,导致相同粗钢产量下货运需求降低。

(2) 粗钢产量增长是铁矿石货运量上升的决定因素。2010~2020 年间,中国粗钢产量从 6.37 亿吨增长到 10.65 亿吨,增长了 4.28 亿吨,上升 67%。2010~2015 和 2015~2020 年间,粗钢需求增长因素拉动铁矿石货运量分别增长 2.49 和 3.85 亿吨,对于货运量实际增量的贡献率分别为 178%和 127%。

(3) 废钢资源利用率逐步提升结合短流程炼钢比例提高对于降低铁矿石货运量成效显著。废钢—电炉短流程炼钢大大减少了对于铁矿石的消耗量与运输需求,废钢资源不仅为短流程炼钢提供原料,在长流程炼钢过程中提高废钢炼钢比也是降低铁水比例、减少铁矿石用量的有效措施^[115-117]。2020 年废钢资源产生量达到 2.3 亿吨,废钢—短流程炼钢比例由 2010 年不足 2%上升至 2020 年约 10%。2010~2015 和 2015~2020 年间,提高废钢资源利用率结合炼钢工艺优化因素导致铁矿石货运量分别下降 0.95 和 0.67 亿吨,对于货运量实际增量的贡献率分别为 -68%和-22%,是降低铁矿石货运需求的重要因素。

(4) 矿料优化对于降低铁矿石货运量的效果有限。钢铁企业从优化预选工艺、提高精矿质量、采用“多碎少磨”或“以碎代磨”降低最终碎矿粒度等方式降低铁矿石消耗量^[118-119]。2010~2015 和 2015~2020 年间矿料优化因素导致铁矿石货运量分别下降 0.14 和 0.15 亿吨,对于货运量实际增量的贡献率分别为-10%和-5%,是降低铁矿石货运需求的一项因素,但从历史数据分作用有限。

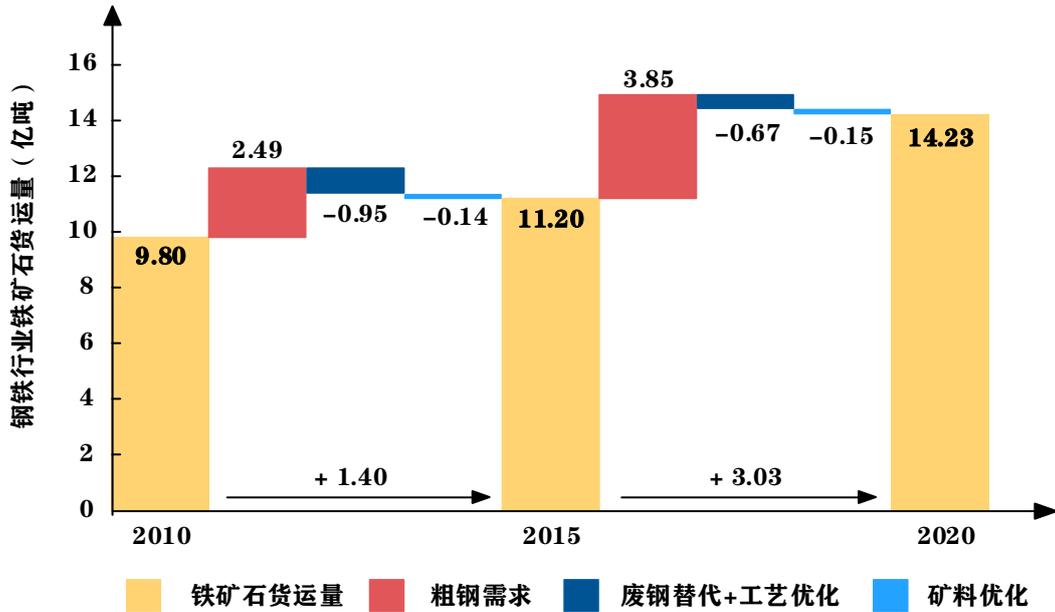


图 49 钢铁行业铁矿石货运量驱动因素分解

4.3.3 石灰石驱动力分析

石灰石是水泥行业除水泥产品外运量最大的货类，对于石灰石货运量的综合效应分解为水泥需求效应、熟料用量效应、熟料进口效应和原料替代效应四个维度，如公式（4-5）、（4-6）所示。水泥需求效应指由下游消费需求导致的水泥产量变化的影响；熟料用量效应指不同标号水泥单位产品熟料用量变化的影响；熟料进口效应指熟料消费量中进口熟料对国产熟料替代作用的影响；原料替代效应指采用电石渣、粉煤灰、钢渣、硅钙渣等替代石灰石作为水泥生产用原料对于石灰石货运量的影响。

$$C_{\text{石灰石}} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n P_{\text{水泥}} \times \frac{H_{3,i}}{P_{\text{水泥}}} \times \frac{M_{3,i,j}}{H_{3,i}} \times \frac{C_{3,i,j}}{M_{i,j}}$$

$$= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n P_{\text{水泥}} \times D_{3,i} \times B_{3,i,j} \times I_{3,i,j} \quad (4-5)$$

$$\Delta C_{\text{铁}} = \Delta P_{\text{水泥}} + \Delta D_3 + \Delta B_3 + \Delta I_3 \quad (4-16)$$

运用以上模型，将水泥石灰石货运量变化分解为 2010~2015 和 2015~2020 两阶段，影响因素定量分解结果如图 50 所示：

（1）过去十年间水泥行业的迅速发展导致石灰石货运量整体上升，2015 年石灰石货运量较 2010 年增长 2.1 亿吨，上升 14.5%，2020 年较 2015 年增长 2.8

亿吨，上升 17.0%。水泥需求和熟料用量效应作为正向驱动力促进货运量增长，熟料进口和原料替代效应是负向驱动力，降低相同产量条件下的货运需求。

(2) 水泥需求增长是推动石灰石货运量上升的决定因素。2010~2020 年间，水泥产量从 18.8 亿吨增长到 23.9 亿吨，增长了 5.1 亿吨，上升 27%。2010~2015 和 2015~2020 年间，水泥需求增长因素推动石灰石货运量分别增长 3.55 和 0.34 亿吨，对于货运量实际增量的贡献率分别为 169%和 12%。2010~2015 年间，水泥产量增长是导致铁矿石货运需求大幅上升的决定性因素，随着 2014 年水泥产量达到 24.9 亿吨的阶段性峰值，2015~2020 年水泥产量在 22.1~23.9 亿吨之间波动，对于石灰石货运量的驱动效应明显减缓。

(3) 产品结构变化对于石灰石货运量影响明显。近年来，中国水泥产品结构发生变化，高标号水泥生产使用比例增长^[120-122]。2015~2020 年间，水泥结构变化因素导致石灰石货运量分别上升 2.85 亿吨，对于货运量实际增量的贡献率为 101%，成为导致石灰石货运量持续上升的重要因素。

(4) 熟料进口量提高是导致石灰石货运量下降的重要因素。自 2018 年开始，中国水泥行业在产能严重过剩的背景下，大力推进供给侧结构性改革，水泥行业通过全面贯彻落实“错峰生产”、“停窑限产”等政策措施在化解产能过剩、减少污染排放的同时，也造成了区域性、阶段性水泥短缺和价格上涨，为国外熟料向中国出口创造了条件^[123]。2015~2020 年间，提高熟料进口量因素导致石灰石货运量下降 0.17 亿吨，对于货运量实际增量的贡献率为-6%。

(5) 原料替代是导致石灰石货运量下降另一项重要因素。水泥生产企业使用某些天然矿物或化工行业产生的工业废料替代传统的石灰石原料，不仅降低了石灰石货运需求，也减少了由于石灰石分解产生的 CO₂ 排放。用以替代的原料包括电石渣、硅钙渣、钢渣、石英污泥及造纸污泥等，不同工业废料在替代石灰石的同时还可能产生额外的协同效应。例如，如硅钙渣能提供硅质原料、钢渣可以改善生料易烧性等^[124-126]。2010~2015 和 2015~2020 年间，原料替代因素导致石灰石货运量分别下降 0.20 和 0.21 亿吨，对于货运量实际增量的贡献率分别为-10%和-7%，是降低铁石灰石货运需求的另一项因素。

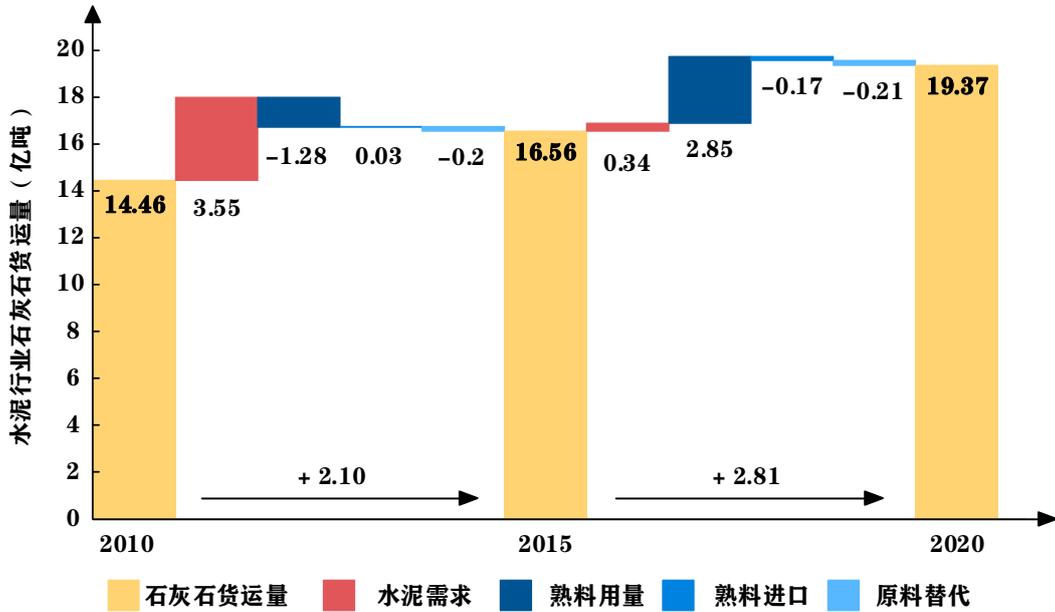


图 50 石灰石货运量驱动因素分解

4.3.4 铝土矿驱动力分析

铝土矿是铝冶炼行业运量最大的货类，对于铝土矿货运量变化的综合效应分解为铝材需求效应、再生铝替代效应和氧化铝进口效应三个维度。如公式(4-7)、(4-8)所示。

$$C_{\text{铝土矿}} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n P_{\text{铝材}} \times \frac{H_{4,i}}{P_{\text{铝材}}} \times \frac{M_{4,i,j}}{H_{4,i}} \times \frac{C_{3,i,j}}{M_{4,i,j}}$$

$$= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n P_{\text{铝材}} \times D_{4,i} \times B_{4,i,j} \times I_{4,i,j} \quad (4-7)$$

$$\Delta C_{\text{铝土矿}} = \Delta P_{\text{铝材}} + \Delta D_4 + \Delta B_4 + \Delta I_4 \quad (4-8)$$

铝材需求效应指由于下游消费需求导致铝材产量变化的影响；再生铝替代效应指在铝材生产过程中使用再生铝替代原铝的影响；氧化铝进口效应指氧化铝消费量中进口氧化铝对于国产氧化铝的替代对于铝土矿货运量的影响。

运用以上模型，将铝冶炼行业铝土矿货运量变化分解为 2010~2015 和 2015~2020 两阶段，影响因素进行定量分解结果如图 51 所示：

(1) 2010~2020 年间铝冶炼行业迅速发展导致铝土矿货运量增长约 1.0 亿吨，上升 146%。铝材需求效应是促进铝土矿货运需求增长的正向驱动力，再生铝替代和氧化铝进口效应是负向驱动力，导致相同产量条件下货运需求降低。

(2) 铝材产量增长是铝土矿货运量上升的决定因素。2010~2020 年间，中国铝材产量从 2238 万吨增长到 5579 万吨，增长 3341 万吨，上升 149%。2010~2015 和 2015~2020 年间，铝材需求增长因素拉动铝土矿货运量分别增长 9106 和 5052 万吨，对于货运量实际增量的贡献率分别为 129%和 127%。

(3) 促进废铝资源循环利用，提高再生铝在铝材生产过程中的使用率是降低铝土矿货运量的主要因素。再生铝是指以废铝作为主要原料，经预处理、熔炼、精炼、铸锭等生产工序后得到铝合金。铝的抗腐蚀性强，在使用过程中损耗程度极低，且在多次重复循环利用后不会丧失其基本特性，具有极高的再生利用价值^[127]，2010~2020 年再生铝产量由 400 万吨上升至 740 万吨。2010~2015 和 2015~2020 年间，提高再生铝用量导致铝土矿货运量分别下降 1485 和 1218 万吨，对于货运量实际增量的贡献率分别为-21%和-22%。

(4) 氧化铝进口对于铝土矿货运量的削减效应逐步增强。2010~2015 和 2015~2020 年间氧化铝进口因素导致铝土矿货运量分别下降 571 和 902 万吨，对于货运量实际增量的贡献率分别为-8%和-29%。

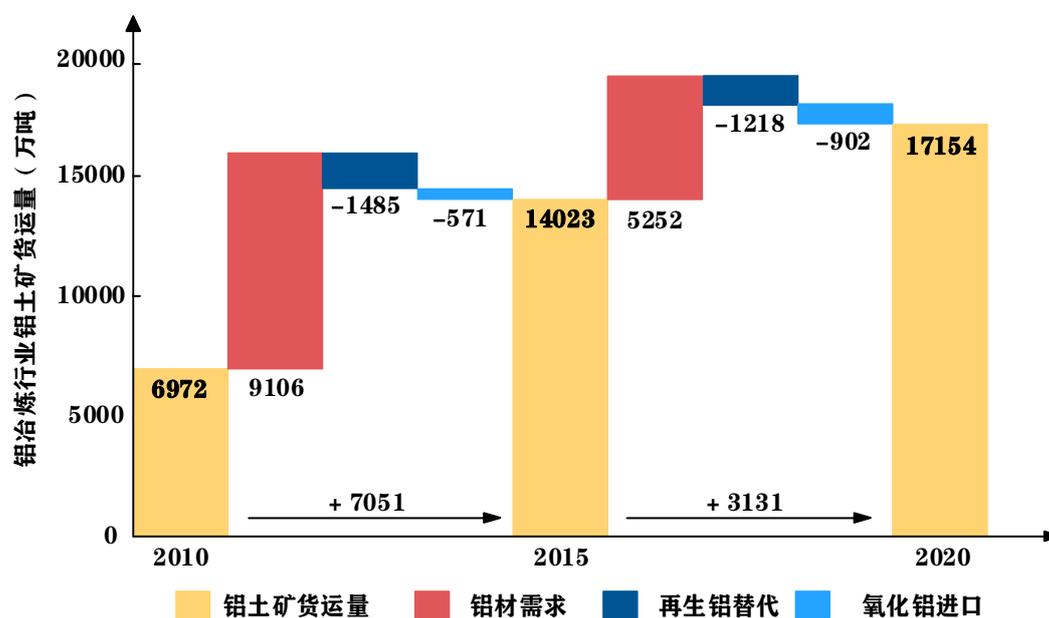


图 51 铝土矿货运量驱动因素分解

4.4 重点行业产品产量预测方法

本研究基于行业特征，采取不同方法预测各重点行业 2020~2040 年主要产品

产量变化，用来反映行业发展趋势，并作为货运需求预测的基础。每类产品产量均包括高、低两种需求情景。

(1) 电力产量预测

电力需求与社会经济发展、各部门用电需求变化密切相关。如图 52 所示，本研究采用部门需求预测法，将全社会用电部门分为工业（含制造业）、居民生活、服务业、交通运输和其他等 5 大类，在各部门用电规模与特征现状的基础上，结合各行业产品产量、电耗变化趋势及用电规律，采用产品单耗法、趋势外推法预测不同部门的用电需求，自下而上汇算得到高、低两种情景下全社会用电需求。采取用电量与发电量持平的原则，得到未来高、低两种情景下全社会发电量变化趋势。电源结构分为非化石能源与化石能源两类，坚持非化石能源优先发展，基于可开发资源量、电源项目建设周期、能源价格等方面因素，分别确定水电、核电、生物质发电规模，同时结合《“十四五”现代能源体系规划》^[128]、《2030 年前碳达峰行动方案》^[49]等政策规划提出的非化石能源发电及非化石能源消费比重发展目标，预测未来电源结构变化，同时根据天然气资源情况和分布式调峰需求，确定气电发展规模，最终得到未来高、低两种情景下的燃煤发电电量、热电联产供热量。



图 52 电力行业需求预测方法

(2) 钢铁产量预测

钢铁行业涉及工艺流程长，中间产品多，如图 53 所示，对于钢铁需求预测主要包括钢材产量、粗钢产量、废钢资源量和生铁产量四个模块。采用消费系数法和分部门需求预测法分别预测未来全国粗钢消费量，得到高、低两种情景下钢材消费量。由于中国是钢材净出口国，基于钢材消费量结合未来净出口量预测未来钢材产量。结合历史阶段钢材与粗钢产量之比，预测未来粗钢产量。废钢资源不仅是短流程炼钢的主要原料，在长流程炼钢中的原料替代具有重要影响，采用

社会钢铁蓄积量折算法，结合各类钢铁产品生命周期分布，预测未来废钢资源产生量。参考《关于促进钢铁工业高质量发展的指导意见》^[129]、《工业领域碳达峰实施方案》^[50]等政策文件对于中国短流程炼钢的发展规划，结合废钢资源产生量与利用率，预测未来短流程炼钢比例，进而得到长流程与短流程粗钢产量。最终，基于高、低需求情景下长流程粗钢产量与长流程废钢资源用量预测 2022~2040 年高、低需求两种情景下生铁产量。

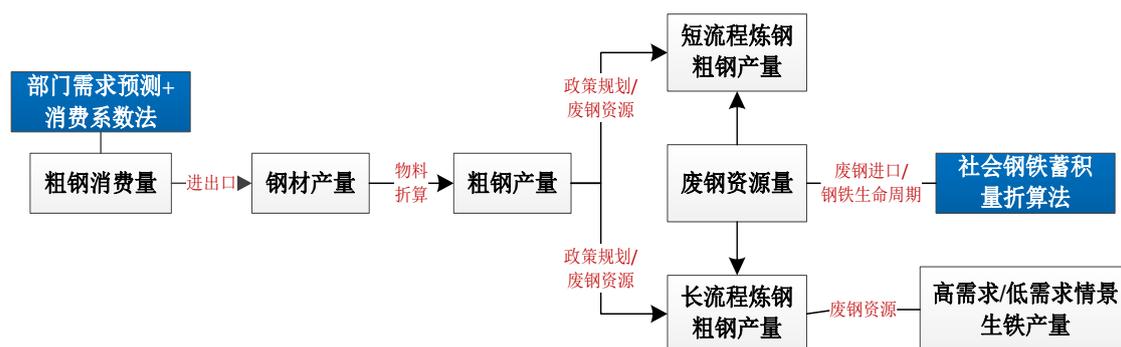


图 53 钢铁行业需求预测方法

(3) 水泥产量预测

经济发展模式和结构变化对于一个国家或地区的水泥熟料需求会产生很大影响，影响因素包括城镇化率、人均 GDP、固定资产形成总额、三次产业结构和固定资产投资结构等。如图 54 所示，本研究采用多因素拟合法，建立包含上述五类影响因素的多因素拟合模型，结合对未来中国经济发展形势、产业结构、人口及城镇化发展形势、固定资产投资趋势的预测结果，预测高、低情景下未来水泥熟料消费量。通过熟料消费量与水泥消费量历史折算比例，得到未来水泥消费量变化。最终，基于熟料消费量结合未来熟料出口变化预测高、低情景下熟料产量。



图 54 水泥行业需求预测方法

(4) 铝材产量预测

铝材需求量与社会经济发展，建筑、交通等领域用量以及进出口需求等密切

相关。如图 55 所示，本研究采用弹性系数法，基于人口增长趋势与人均铝材消费量变化，预测未来高、低需求情景下全国铝材消费量，并结合铝材进出口量得到铝材产量。铝材生产的主要来源包括原铝与再生铝，基于国内旧废铝、国内新废铝、进口废铝等预测未来再生铝产量。根据铝材产量与再生铝使用量，结合电解铝进出口政策、电解铝产能总量控制政策、国际贸易局势的综合分析，预测未来电解铝产量。氧化铝需求量主要取决于电解铝产量，综合考虑电解铝生产所需氧化铝折算比例、进口量等因素，最终得到未来高、低需求情景下氧化铝产量。

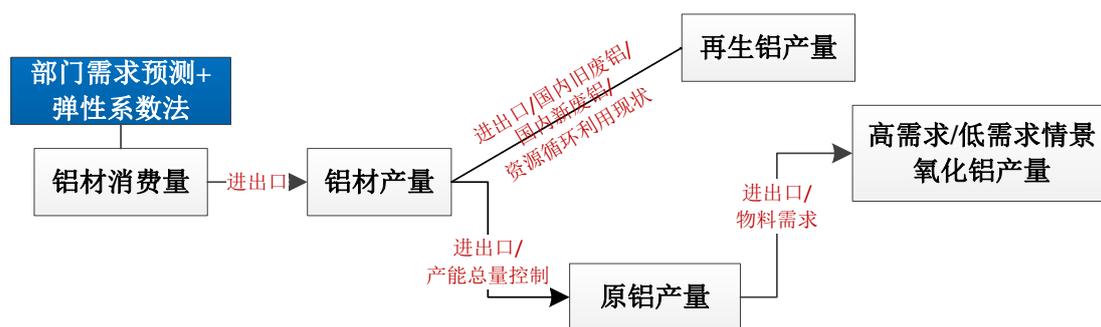


图 55 铝冶炼行业需求预测方法

(5) 焦炭产量预测

中国 85%以上的焦炭主要用于钢铁行业，如图 56 所示，本研究采用需求预测法，基于钢铁行业生铁产量与综合焦比预测冶金焦消费量，其他行业焦炭消费量与 2020 年持平，得到未来全国焦炭消费总量。同时，结合焦炭进出口变化预测未来高、低需求情景下焦炭产量。



图 56 焦炭产量预测方法

(6) 建筑规模预测

对于建筑规模的预测针对城镇居住建筑、城镇公共建筑、农村建筑三种类型，考虑民众不断提升的居住舒适度需求，对影响人均建筑面积的关键因素进行识别，根据人口、城镇化率、人均 GDP、投资结构、套户比等指标变化趋势，对比韩国、法国、德国、日本等城市化水平较高、可利用土地资源与我国类似国家的人均居住建筑面积，预测未来不同类型建筑人均面积。同时结合我国居住模式、人口和

城镇化率变化趋势，预测未来高、低需求情景下三类建筑规模发展趋势，汇总得到全社会建筑规模变化。

五、货运需求预测

5.1 宏观社会经济发展预测

本研究遵循构建新发展格局的总体要求，统筹考虑国内国际双循环对中国经济发展的宏观影响，结合宏观经济发展目标、2030年前碳达峰目标以及2035年远景目标，综合国内外主要研究机构预测情景与最新政策文件精神，分析经济增长态势与产业结构、人口和城镇化历史发展形势，提出2020~2040年不同阶段GDP增速、经济总量、人口总量、人均GDP、产业结构等主要宏观经济指标，奠定各重点行业产品产量预测与货运需求变化预测的基础。

人口总量达到平台期，老龄化快速发展。中国人口发展既符合世界一般性规律，又具有自身特点。欧美、日韩等发达国家人口老龄化都是经济社会发展到一定阶段的产物，大部分发达国家基本在人均GDP达到2万美元左右时才进入老龄化社会。与发达国家不同，中国由于人口生育控制政策的强力实施，人为地加快了人口转变进程与老龄化速度，导致还未富裕便进入老龄化社会。年龄结构带来的人口问题日益突显，人口峰值临近，老龄化加剧、低生育率等问题形势仍将持续。近年来我国新出生人口数量持续下行，若无政策调整，“十四五”期间不排除出现人口负增长的可能性。2019年中国65岁及以上人口占比已达12.6%，2022年将进入深度老龄化社会，2033年左右进入占比超过20%的超级老龄化社会，到2035年，老年人口将从2017年的2.4亿人上升到4亿人左右“人口红利”逐步衰减。综合相关机构研究结果，如表5所示，本研究预测2021~2025年间，中国人口将保持微增态势，人口增长至14.25亿左右；2030年前后人口将迎来14.3亿左右的峰值拐点；到2040年人口下降至14.0亿左右。

经济持续稳定发展，综合国力进一步提升。“十三五”时期，中国经济发展成效显著，经济总量实现了规划期保持中高速增长的目标，2016~2019年GDP年均实际增速达到6.7%。2020年受新冠疫情暴发影响经济增速大幅放缓，全年2.3%的GDP增速仍是世界主要经济体中唯一保持正增长的国家，经济显现出持续恢

复的势头。2020年GDP规模迈上百万亿元新台阶，是2010年的2.4倍左右。人均GDP突破1万美元，达到1.05万美元，全国居民人均可支配收入达32189元，比2015年增长42%，中等收入群体规模持续扩大经济发展的稳定性、可持续性明显增强，为“十四五”时期经济社会发展奠定了良好基础。疫情对中国经济的冲击是短期的、总体可控的，中国经济长期向好的趋势和基本面没有根本改变。2021年我国GDP总量达到114.37万亿元，实际增长率为8.1%，展现了强大的经济韧性。综合考虑疫情对中国经济增长的影响、经济社会发展目标以及相关研究机构最新预测结果，按照到2035年我国人均GDP到2万美元以上、人均GDP翻一番的目标要求，需要我国人均GDP年均增长保持在4.73%的水平。如表5所示，本研究预测“十四五”期间经济增长预期在4.5%~5.5%、之后经济仍保持增长趋势但增速放缓。2020年，我国人均GDP达到1.05万美元左右，预计到2025、2030、2035和2040年人均GDP分别在1.31~1.35、1.70~1.73、2.08~2.15和2.18~2.23万美元区间（2020年不变价、汇率水平）。2020~2035年是我国加快推进高质量发展，构建新发展格局，基本实现社会现代化的重要时期。按照十九届五中全会确定的人均国内生产总值达到中等发达国家水平的目标要求，基于上述经济发展预测分析，中国有潜力在2035年人均GDP高于2.1万美元，进入中等发达国家行列。

经济结构深刻调整，三产占比持续提升。2020年中国一产、二产、三产占GDP的比重分别为7.6%、37.8%和54.6%，通过深入推进供给侧结构性改革，经济结构加速变革。第一产业保持稳步增长，科技投入增加带动效率提升，初步形成绿色发展的良好态势。第二产业是供给侧结构性改革的聚焦领域，在总产出保持合理增速的情况下，通过淘汰落后产能促使生产效率明显提升，制造业增加值多年位居世界首位，2020年规模以上高技术产业增加值占比为15.1%。第三产业快速发展，服务业主导地位明显加强，信息传输、软件和信息技术服务业等新兴服务业“十三五”期间年均增速高达19%，成为助推服务业持续增长的新动能，也成为主要的就业渠道。总体来看，疫情的影响并不会在中长期改变中国经济运行趋势，也不会改变产业结构升级的趋势。2021~2035年是产业结构调整升级快速推进的时期。第一产业将在确保粮食安全的前提下，进一步提升生产效率和竞

争力；第二产业将补短锻长，努力从制造大国跻身制造强国，先进制造业、高新技术产业的规模和水平持续提升，创新能力显著增强，工业化和信息化融合迈上新台阶，智能制造取得新进展；第三产业将充分受益于最大消费场所带来的增长空间，随着新型城镇化的推进，服务业的应用场景不断扩大。如表 5 所示，本研究预计到 2025 年，三次产业结构调整为 7%：38%：55%；到 2030 年，三次产业结构调整为 6%：31%：63%，第三产业比重稳步上升，逐步成为经济发展的主导产业，服务于制造业和进出口贸易的生产性服务业迈向产业链的中高端；到 2040 年，三次产业结构调整为 5%：25%：70%。

城乡发展迈向一体，区域发展协调性明显增强。2020 年中国城镇化率达到 61.5%，新型城镇化质量稳步提高，中心城市和城市群人口集聚能力逐步提升，都市圈建设有序推进。区域协调发展战略深入实施，支持西部大开发、东北振兴、中部崛起、东部率先发展的政策体系更加完善，老少边贫等特殊类型地区加快振兴发展。如表 5 所示，综合美丽中国、“十四五”思路等研究和国内外机构预测，本研究预测中国城镇化进程总体已进入到后期阶段，2022~2035 年是城镇化迈向成熟期关键阶段，城镇化仍将是高质量发展的主要推动力与标志，城镇化进程将表现出集约化、多样化、可持续等特征。中西部地区将处于城镇化加速时期，是城镇化主要动力板块，东部和东北地区进入城镇化减速期。预计到 2025 年，常住人口城镇化率将达到 66%左右，进入中级城市型社会；到 2030、2035 和 2040 年，城镇化率分别达到 69%、72%和 74%左右，进入成熟稳定阶段。人口集聚发展特征将更加明显，人口由农村向城镇转移的趋势将减弱，由一般地区向沿江、沿海、铁路沿线地区聚集趋势将增强，重点经济区和城市群地区人口集聚度将明显加大。

表 5 宏观社会经济发展预测

年份	GDP 增速 (%)	GDP (万亿美元)	人口 (亿人)	人均 GDP (万美元)	三产结构 (%)	城镇化 率 (%)
2020	2.30%	14.7	14.12	1.05	7.6:37.8:54.6	61.50%
2025	5.0% (4.5%~5.5%)	19.2 (18.7~19.2)	14.25	1.35 (1.31~1.35)	7:38:55	65.70%
2030	4.80% (4.5%~5.0%)	24.5 (24.3~24.7)	14.3	1.72 (1.70~1.73)	6:31:63	69.20%

2035	4.00% (3.9%~4.5%)	30.1 (29.7~30.5)	14.3	2.10 (2.08~2.13)	6:29:65	72%
2040	2.90% (2.8%~3.5%)	31.0 (30.5~31.2)	14.0	2.20 (2.18~2.23)	5:25:70	74%

注：数据来源于中国工程院(2022), 我国碳达峰、碳中和战略及路径研究项目综合报告；生态环境部环境规划院(2021), 基于行业的全国碳排放达峰研究报告。

5.2 重点行业发展趋势与货运需求预测

5.2.1 电力行业

5.2.1.1 需求预测

(1) 全社会用电量

如图 57 所示，工业是中国最主要的用电部门，2020 年工业部门用电量 5.3 万亿千瓦时，占全社会用电量的 69%，有色金属冶炼和压延加工业、黑色金属冶炼和压延加工业、化学原料和化学制品制造业、非金属矿物制品业等为代表的高耗能制造业是最主要的耗电部门，四大行业合计用电量占工业部门总用电量的 42%。通过结合钢铁、水泥、铝冶炼、炼焦等行业高、低需求情景预测结果，采用产品单耗法预测各行业未来用电需求，其他工业行业用电需求根据 2014~2020 年用电量进行趋势外推。居民生活是第二大用电领域，2020 年居民生活用电量 1.1 万亿千瓦时，占全社会总用电量的 15%。根据 2002~2020 年人均居民生活用电量与人均 GDP 的相关关系，参比发达国家主要城市人均用电水平，按照 2025、2030、2040 年我国人均居民生活用电量分别为 1000~1100、1500~1600 和 1900~2000 千瓦时/年，预测居民生活用电需求。服务业是第三大用电领域，2020 年用电量 1.01 万亿千瓦时，占全社会用电量的 12%。互联网数据服务业及移动通信基站等新型基础设施建设将在“十四五”、“十五五”期间高速发展，是带动三产用电需求的最主要行业。综合考虑 5G 基站、大数据中心建设规模及能效变化等因素，预测未来新型基础设施的用电需求。交通运输领域用电主要包括电气化铁路、电动汽车、水上运输业、航空运输业等。其他服务业、交通运输业、农林牧渔业、建筑业等部门用电需求根据 2014~2020 年用电量，采用趋势外推方法，同时考虑节能措施等因素，预测未来用电需求。

如图 57 所示，未来我国电力需求将持续增长，农业、工业用电需求小幅增长并逐步到达平台期，居民生活、交通运输、服务业用电需求增长明显，居民生活、5G 基站和大数据中心、电解水制氢等将是未来我国电力需求增长的主要领域。工业用电占比到 2030、2040 年分别降低至 61%和 47%，服务业用电占比到 2030、2040 年分别上升至 13%和 21%。

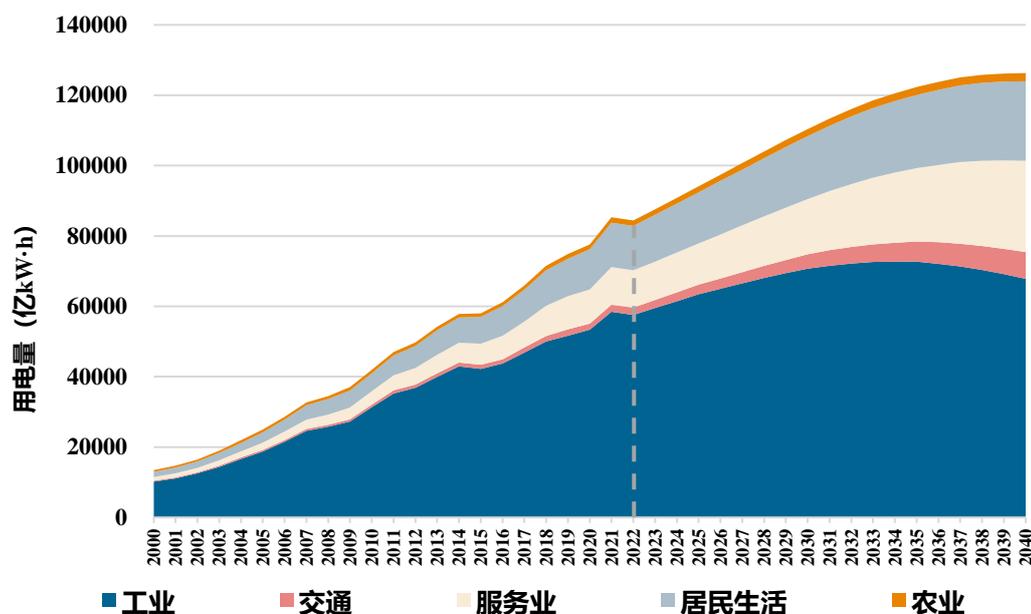


图 57 分部门用电需求预测

(2) 全社会发电量

为满足电力消费需求的持续增长，全社会发电量将持续上升，预计全社会发电量在 2030 年达到 11.1~12.6 万亿千瓦时，较 2020 年增长约 2.5~3.3 万亿千瓦时。

如图 58 所示，高需求情景下预计 2030、2035 和 2040 年全社会发电量将分别达到 11.0、12.2 和 12.6 万亿千瓦时，较 2020 年分别增长约 3.3、4.4 和 4.8 万亿千瓦时，增幅约为 41.9%、57.3%和 62.4%。全社会发电量年增长率逐渐下降，2020~2040 年每五年发电量年均增速分别为 3.9%、3.4%、2.1%和 0.6%。低需求情景下 2030、2035 和 2040 年全社会发电量将分别达到 10.3、10.8 和 11.1 万亿千瓦时，较 2020 年分别增长 2.5、3.0、3.3 万亿千瓦时，增幅约为 32.2%、38.9%和 42.2%，2020~2040 年每五年发电量年均增速分别为 3.7%、2.5%、1.0%和 0.5%。

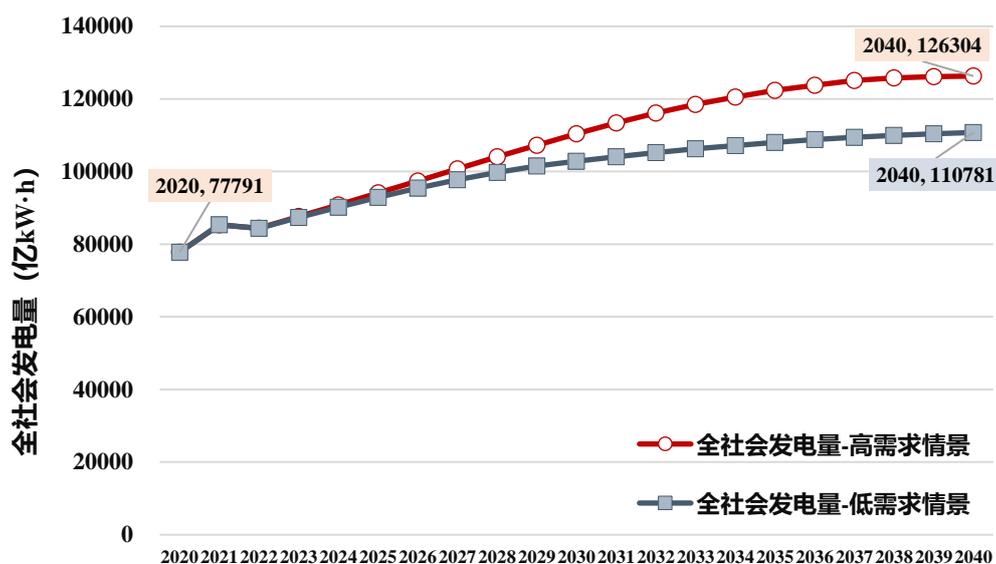


图 58 高、低需求情景下全社会发电量预测

(3) 电源结构

2020 年全国非化石能源发电量占总发电量比重为 32%，在全社会发电量持续增长的同时，风、光、水、核与生物质等非化石发电比例持续上升，电源结构不断优化。《“十四五”现代能源体系规划》^[128]提出，到 2025 年非化石能源发电量比重达 39%左右，结合全国宏观发展目标，同时结合图 59 所示的风光水核不同发电潜力预测非化石能源发电比例。如表 6 所示，预计中国非化石能源发电量将持续上升，2033 年非化石能源发电量占比将高于火力发电量。到 2025、2030、2035 和 2040 年，火力发电量在全社会发电量的占比分别降至 63%、55%、46% 和 36%。

同时，受“富煤、缺油、少气”传统资源禀赋影响，中国火力发电以燃煤发电为主，燃气为辅，燃油比例极低。天然气对外依存度较高，受供应能力与气价制约，天然气发电占比较低，仅在北京及上海、江苏、浙江等长三角、东南沿海经济发达省市应用。为稳步推进能源消费革命，构建清洁低碳、安全高效的现代能源体系，中国支持天然气发电“有序、适度发展”，2017 年国家发改委《加快推进天然气利用的意见》明确将天然气培育成为我国现代清洁能源体系的主体能源之一^[130]。预计未来天然气发电量仍将持续增长，但涨幅有限，火力发电仍将以燃煤为主，如表 6 所示，到 2025、2030、2035 和 2040 年天然气发电量在火电中的占比分别增至 5.5%、6.0%、6.5%和 7.0%。

	2020年	2030年	2035年	2040年
风电 	2.8	5.5	8.2	10.1
水电 	3.7	4.0	4.2	4.6
光伏 	2.5	7.5	11.0	12.3
核电 	0.5	1.2	1.9	2.4
生物质发电 	0.6	1.1	1.3	1.5

图 59 各类非化石能源发电装机容量预测

表 6 电源结构预测结果

年份	2020	2025	2030	2035	2040
火力发电量占比 (%)	68%	63%	55%	46%	36%
非化石能源发电占比 (%)	32%	37%	45%	54%	64%
火力发电量中燃煤发电占比 (%)	94.9%	94.5%	94.0%	93.5%	93.0%

(4) 火力发电量与燃煤发电量

根据全社会发电量，结合电源结构变化得到未来高、低需求情景下火力发电量变化趋势与燃煤发电量变化趋势，如图 60 所示。

高需求情景下火力发电量在 2030 年前将持续增长，并于 2030 年达到 6.1 万亿千瓦时的峰值，较 2020 年增长 0.8 万亿千瓦时，上升 14%。2030 年后火力发电量逐年下降，2040 年降低至 4.5 万亿千瓦时，较 2020 年降低 0.8 万亿千瓦时。燃煤发电量预计于 2029 年达到 5.7 万亿千瓦时峰值，较 2020 年增长 0.7 万亿千瓦时，上升 13%，随后逐年下降，2040 年将降低至 4.2 万亿千瓦时。

低需求情景下火力发电量在 2025 年前持续增长，并于 2025 年达到 5.9 万亿千瓦时的峰值，较 2020 年增长 0.6 万亿千瓦时，上升 12%，2025 年后逐年下降，2040 年将降低至 4.0 万亿千瓦时。燃煤发电量同样于 2025 年达到 5.6 万亿千瓦时峰值，较 2020 年增长 0.5 万亿千瓦时，上升 11%，随后逐年下降，2040 年将降低至 3.7 万亿千瓦时。

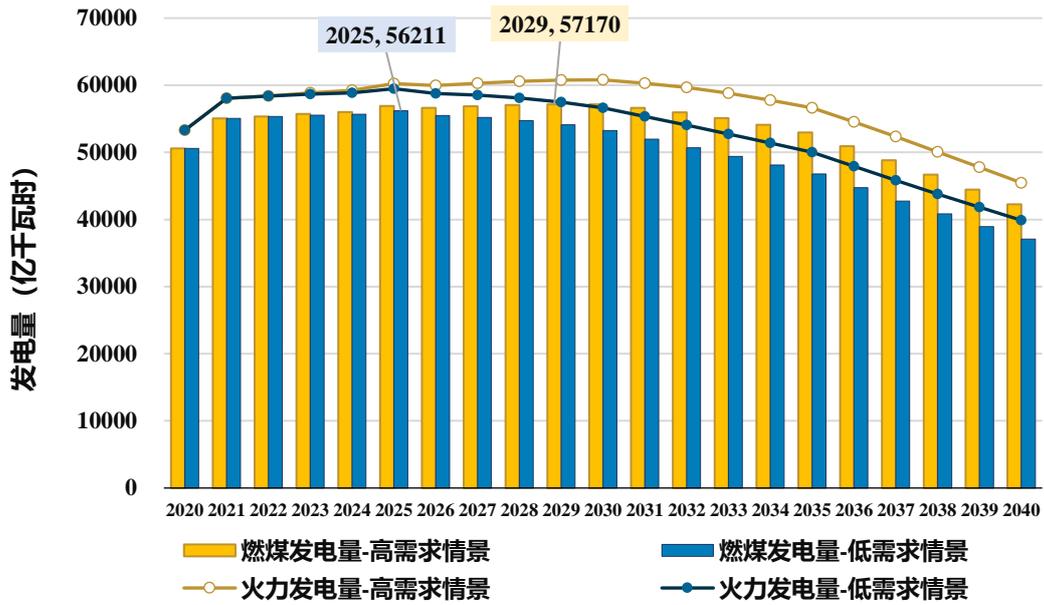


图 60 高、低需求情景下火力发电量、燃煤发电量预测

(5) 供热量

供热量主要来自燃煤机组热电联产，基于高、低两种情景下全社会燃煤发电量变化趋势，类比外推供热量变化趋势。如图 61 所示，高需求情景下供热量于 2030 年达到 42.9 亿吉焦的峰值，较 2020 年增长 4.9 亿吉焦，上升 13%，2030 年随后逐年下降，2040 年降低至 31.7 亿吉焦。低需求情景下供热量于 2025 年达到 42.1 亿吉焦的峰值，较 2020 年增长 4.2 亿吉焦，上升 11%，2025 年后逐年下降，2040 年降低至 27.8 亿吉焦。

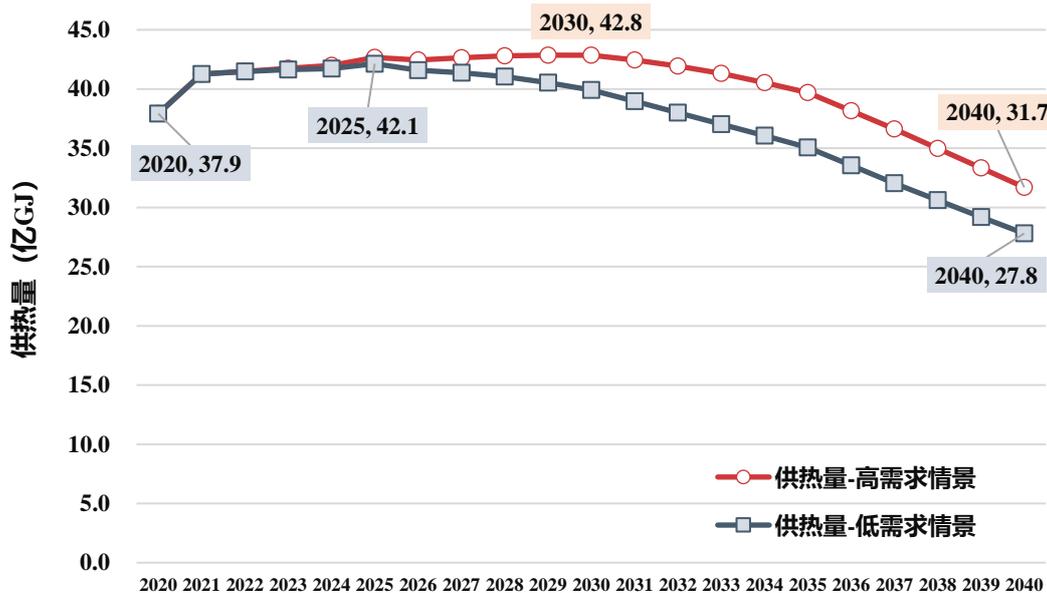


图 61 高、低需求情景下供热量预测

5.2.1.2 货运量预测

对于电力煤炭货运量影响因素分析结果显示，电力需求是导致电力煤炭货运量变化的决定因素，此外电源结构变化与能效提升是降低煤炭货运量的重要因素。

(1) 能效水平

提升发电企业能效水平是降低单位发电煤耗、减少煤炭货运需求的重要途径。2021年全国碳市场第一个履约周期纳入了2162家电力企业，以市场机制倒逼机组能效提升，火电机组能效水平仍有一定提升空间。火电机组供电煤耗持续下降，但降幅逐渐减小，2018年后年均下降0.5%左右。在无重大技术革新的情况下，仅依靠调整锅炉燃烧、优化燃料配比、提升机组运行经济性等措施对于发电煤耗下降作用有限。且中国燃煤机组承担调峰压力，全年平均发电负荷在65%左右，负荷降低机组难以达到最优运行工况，经济性和节能效率难以发挥，未来能效提升仍将以淘汰小型机组、提高余热利用率为主。综合上述因素，预计未来火电企业发电煤耗仍有下降空间，但幅度逐年降低。如图62、63所示，2020~2025年、2026~2030年、2031~2040年单位供电煤耗、单位供热煤耗年均下降0.5%、0.4%和0.3%。

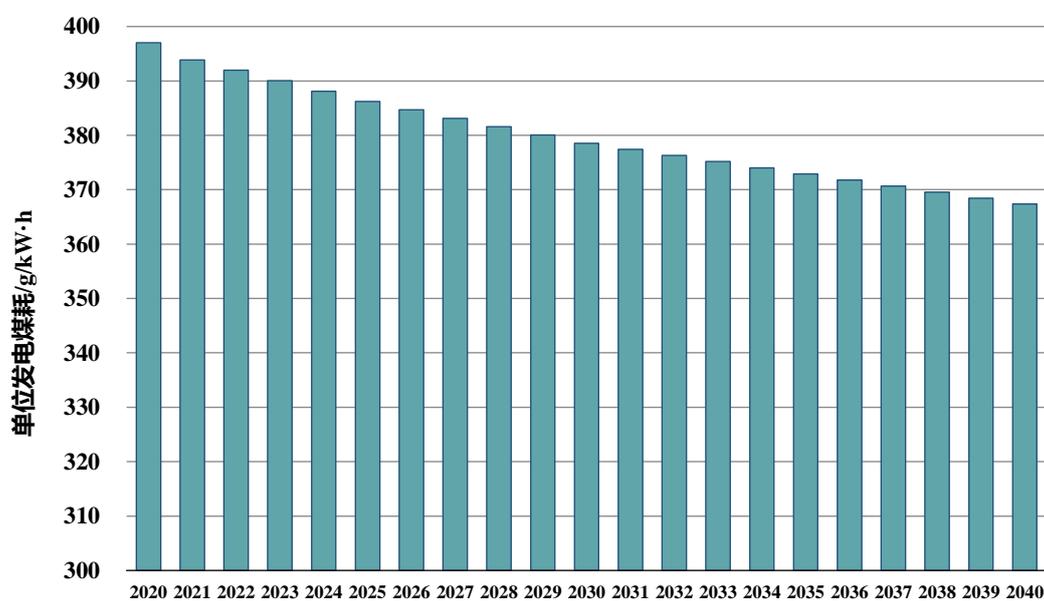


图 62 火电行业单位发电量煤耗变化趋势预测

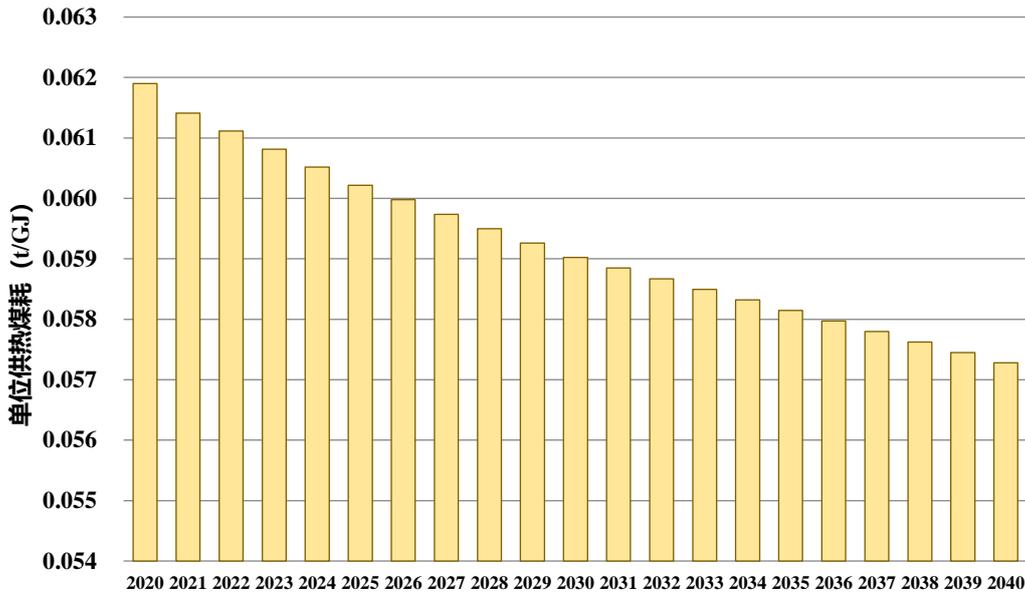


图 63 火电行业单位供热量煤耗变化趋势预测

(2) 货运量变化

如图 64 所示，短期来看，随着燃煤发电量的持续增长，2025 年前电力行业煤炭货运量仍将持续上升。“十四五”期间煤炭货运量以年均 1.6%~1.8% 的增幅增长，2025 年达到 24.2~24.5 亿吨的峰值。2025~2030 年货运量维持在 22.5~24.5 亿吨之间的高位平台期。长期来看，随着非化石能源发电量逐渐提高、单位发电煤耗持续下降，电力行业煤炭货运量将在 2030 年后持续下降。2035、2040 年电力煤炭货运量分别下降至 19.5~21.8 亿吨、15.2~17.1 亿吨。

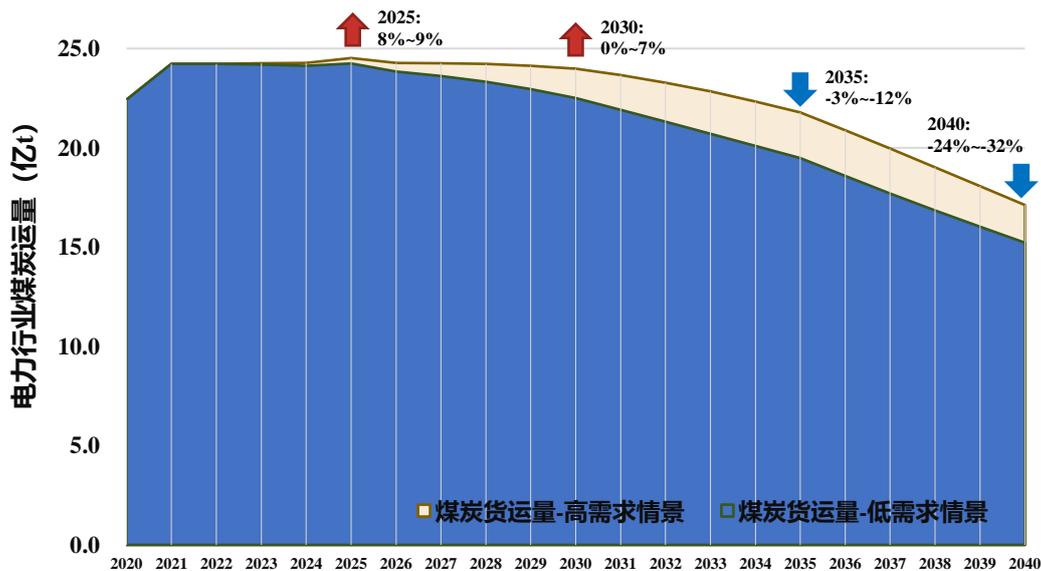


图 64 电力行业煤炭货运量趋势预测

(3) 措施影响分析

基于高需求情景下火力发电量，同时假设电源结构、能效水平等与 2020 年保持一致，设置不采取任何削减措施的基准情景评估不同措施对于货运量的削减作用。低需求情景货运量即叠加各类措施后的货运量变化。如图 65 所示，在不采取任何控制措施的基准情景下（图 65 基准情景货运量），随着全社会电力需求量的持续上升，全社会发电量继续增长，电力煤炭货运量也将持续上升。2030、2035 和 2040 年分别较 2020 年上升 9.2、13.3 和 15.1 亿吨，增长率分别大达到 41%、59%和 67%，货运需求增长非常巨大。仅依靠控制全社会用电需求，降低全社会发电量一项措施，在 2025、2030、2035 和 2040 年分别可减少煤炭货运量 0.3、2.1、4.0 和 4.2 亿吨，对于货运量削减量的贡献率分别为 13%、23%、24%和 19%，对于货运量削减的贡献率先增后降；依靠优化电源结构，提高非化石能源发电比例，在 2025、2030、2035 和 2040 年分别可减少煤炭货运量 1.6、5.6、10.2 和 15.5 亿吨，对于货运量削减量的贡献率分别为 60%、61%、63%和 69%，对于货运量削减的贡献率持续提高，是降低电力煤炭货运需求的首要措施；依靠提升能效水平，降低单位发电量煤耗量一项措施，在 2025、2030、2035 和 2040 年分别可减少煤炭货运量 0.7、1.4、2.1 和 2.6 亿吨，对于货运量削减量的贡献率分别为 13%、16%、13%和 12%，对于货运量削减的贡献有限，同时也是降低煤炭货运需求实现难度最高的措施。

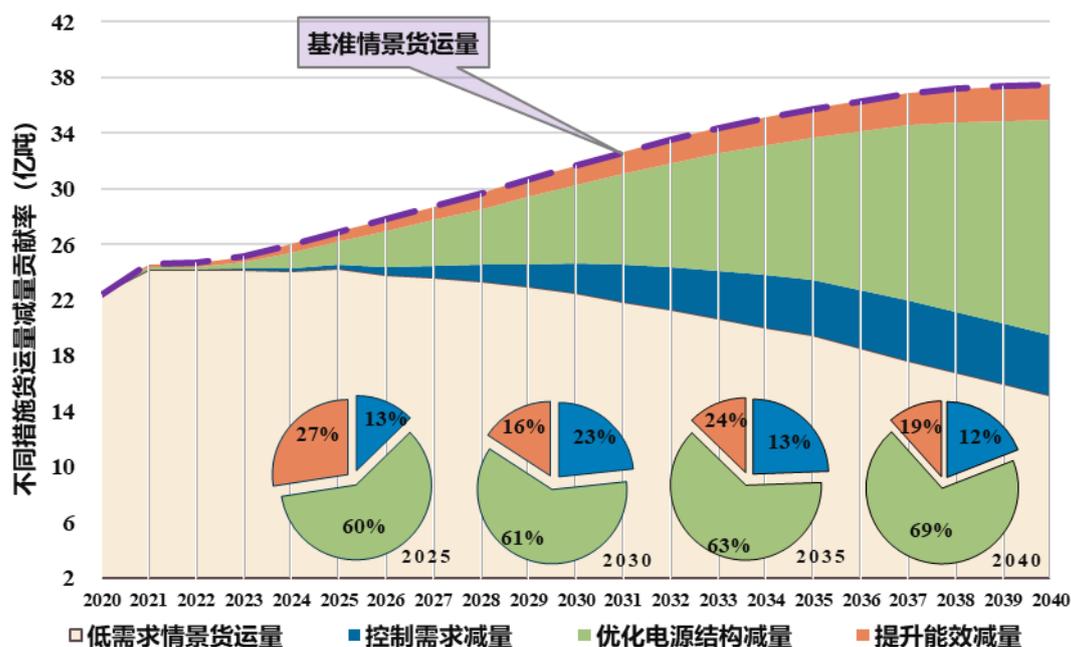


图 65 电力行业不同措施对于货运量削减贡献率

5.2.2 钢铁行业

5.2.2.1 需求预测

(1) 钢材产量

采用消费系数法和分部门预测法两种方法,结合 2020~2040 年我国宏观经济社会发展预测结果与钢材主要消费行业发展趋势,建立高需求、低需求两种情景预测未来国内钢材消费需求,结合进出口变化预测钢材产量。

高需求情景基于消费系数法预测国内钢材消费量,2010 年后中国逐步进入工业化中后期,“十二五”期间单位 GDP 钢材消费系数年均下降 4.5%,虽然在“十三五”期间消费系数出现整体反弹,但 2021、2022 年钢材消费市场呈现持续下降的大趋势。考虑未来中国立足新发展阶段、贯彻新发展理念、构建新发展格局要求,立足于中国工业化、城镇化发展所处阶段,预计未来中国钢材消费系数将呈现下降趋势。综合“十二五”和“十三五”期间单位 GDP 钢材消费系数变化情况,“十四五”按照单位 GDP 钢材消费系数年均下降 2.5%计、“十五五”按年均下降 5%计、“十六五”按年均下降 6%计、“十七五”按年均下降 7.5%计。同时,钢材产量与进出口量密切相关。考虑到以国内大循环为主体、国内国际双循环相互促进的新发展格局建设背景下,中国钢铁产业将更加着眼于满足国内市场为主,不以出口为导向,出口动力将逐步减弱。2021 年后,钢材贸易出口政策也发生新变化,自 2021 年 5 月 1 日起,取消部分钢铁产品出口退税,共涉及 146 个商品代码^[131]。自 2021 年 8 月 1 日起,国家再次对钢铁行业出口税费政策进行了调整,提高了铬铁、高纯生铁的出口关税,取消了 23 个钢铁产品的出口退税^[132]。这意味着国内原来享有出口退税的 169 个税号钢铁产品出口退税全部取消降为 0,国内钢铁产品出口不再享有出口退税红利。在实现“双碳”目标总体要求下,减少低端钢材出口逐渐成为控制钢铁产量、促进钢铁行业尽早高质量达峰的有效手段。2018 年以后中国钢材净出口量低于 6000 万吨,且逐年递减,2020 年更是仅有 3344 万吨。结合历史趋势与未来出口导向,如图 66 所示,本研究预测 2025、2030、2035 和 2040 年钢材进口量分别增长至 0.15、0.20、0.23 和 0.26 亿吨,进口钢材以高端特钢、深冲镀锡板、工具钢、高端索具钢丝绳用钢、部分汽

车及家电用钢为主；钢材出口量均保持在每年 5000 万吨，出口钢材产品类型逐步由热系板材、棒线材及管材等中低端低附加值产品转变为高档汽车面板、高档轴类钢、高档齿轮钢高附加值产品转变等，预计 2025、2030、2035 和 2040 年中国钢材净出口量分别降低至 0.35、0.30、0.27 和 0.24 亿吨。

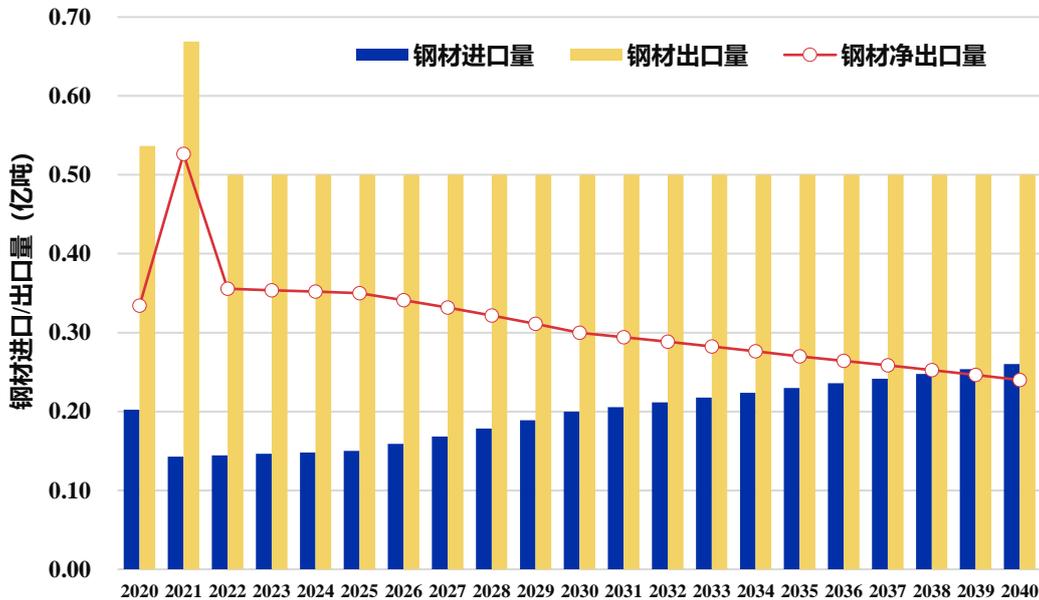


图 66 2022~2040 年中国钢材进口量、出口量、净出口量预测

低需求情景基于分部门需求预测法预测国内钢材消费量，并结合图 66 所示的钢材进出口量历史变化趋势预测钢材产量。考虑到中国钢材下游消费的重点集中在房屋建筑、机械、汽车、基建、家电等领域，分别预测不同领域钢材消费需求，其他领域基于历史消费比例采用类比方法测外推。房屋建筑领域用钢主要受建设需求影响，本研究根据历史数据构建人均住宅面积与经济社会发展参数的量化响应关系，通过趋势外推法对 2022~2040 年房屋建筑新增建设需求与钢材消费量进行预测；汽车制造领域钢材消费需求主要受汽车产量影响，本研究根据历史统计数据构建汽车保有量与 GDP 等经济社会发展参数响应模型，在此基础上结合汽车保有量与折旧量变化预测 2022~2040 年汽车产量与钢材消费量；基建部门钢材消费需求受到不同类型基础设施建设的影响，本研究按照铁路、公路、城市轨道交通以及新能源基础设施建设四个领域进行分类测算；机械制造领域活动水平主要与房屋建筑和基建活动密切相关，本研究采用同比外推方法进行预测；家电部门用钢需求主要与家电生产量密切相关，通过构建城镇和农村人均家电保有量与经济发展水平的量化响应关系，从而实现对于家电产量和用钢需求的预测。

对于钢材消费的新增领域，一是在房屋建筑部门，考虑发展钢结构装配式建筑等建筑领域供给侧改革举措对钢材需求的影响。二是在基建部门，考虑风电、光电等清洁能源发展对钢材消费需求的推动作用。根据测算，预计 2020-2040 年期间，电力基础设施建设将带动钢材消费需求额外增加 500-1000 万吨/年左右。

钢材产量预测结果如图 67 所示。预计高需求情景下钢材产量将在“十四五”期间小幅上升，并于 2025 年达到 13.8 亿吨的峰值，“十五五”期间保持高位平台期，“十五五”后显著下降。2030、2035 和 2040 年，钢材产量将分别降低至 13.8、12.2 和 8.7 亿吨，较 2020 年分别下降 4%、8%和 34%。低需求情景下预计中国钢材产量已于 2020 年达到 13.2 亿吨的峰值，之后逐年递减。2025、2030、2035 和 2040 年，钢材产量将分别降低至 11.9、10.7、9.0 和 6.6 亿吨，较 2020 年分别下降 10%、19%、32%和 50%。建筑钢结构加工量、新能源汽车制造领域钢材消费需求仍继续增加，其他部门的消费需求总体呈下降趋势。

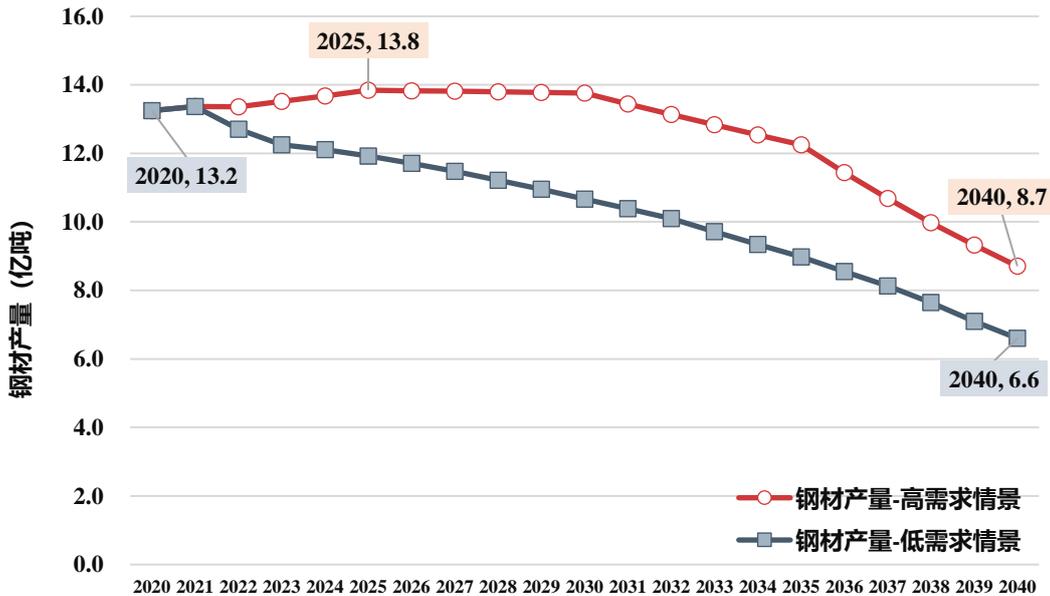


图 67 高、低需求情景下中国钢材产量预测结果

(2) 粗钢产量

基于高、低两种情景下钢材产量的预测结果，结合历史阶段钢材产量与粗钢产量的比例，得到 2022~2040 年高、低两种情景下中国粗钢总产量。未来各年份钢材与粗钢产量的比例值，根据 2017~2021 年 5 年间钢材与粗钢产量之比的平均值 (1.233) 选取。如图 68 所示，高需求情景下预计中国粗钢产量在“十四五”期间小幅上升，2025 年达到 11.2 亿吨的峰值，较 2020 年增加 0.6 亿吨，上升约

5%，2025年后逐年下降。2035和2040年粗钢产量将分别降低至9.9和7.1亿吨，较2020年分别下降7%和34%。低需求情景下中国粗钢产量已于2020年达到10.6亿吨的峰值，未来持续下降。2025、2030、2035和2040年粗钢产量将分别降低至9.7、8.7、7.3和5.4亿吨，较2020年分别下降9%、19%、32%和50%。

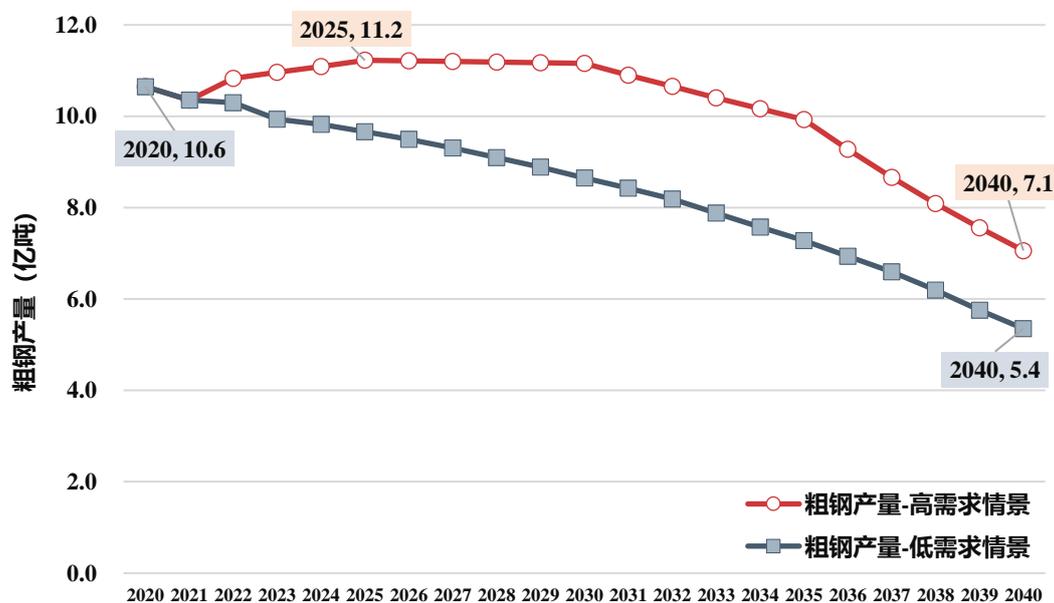


图 68 高、低需求情景下中国粗钢产量预测

(3) 废钢资源供给量

《关于促进钢铁工业高质量发展的指导意见》提出健全废钢回收加工体系，提高废钢利用水平，钢铁工业利用废钢资源量达到3亿吨以上的目标^[129]。采用社会钢铁蓄积量折算法，结合各类钢铁产品生命周期分布，预测未来废钢资源量。建筑部门钢材的寿命周期达50年，汽车、机械、造船、家电等部门平均使用年限约为10~15年。预计2025年钢铁蓄积量将达到120亿吨，废钢资源年产出量将达到2.3~2.7亿吨；2030年钢铁蓄积量将达到132亿吨，废钢资源年产出量将达到2.5~3.4亿吨。考虑到再生钢铁原料进口已于2021年初放开，国内废钢资源将进一步得到补充，预计2021~2025年废钢进口量在1000万吨左右，2030年之后或达到2000万吨。综合判断，2025、2030、2035和2040年全国废钢资源产生量将分别达到2.3~2.7、2.4~3.1、2.5~3.4和2.7~3.5万吨。

(4) 工艺流程变化

《关于促进钢铁工业高质量发展的指导意见》、《工业领域碳达峰实施方案》等文件对于钢铁生产工艺流程均提出到2025年短流程炼钢占比达15%以上、

2030 年达 20%以上的发展目标^[50,129]。结合宏观发展目标以及未来中国粗钢产量、废钢资源产生量预测结果，同时假设短流程电炉钢原材料全部来自废钢，预测未来粗钢产量中短流程与长流程炼钢的比例。如表 7 所示，预计 2025、2030、2035 和 2040 年短流程炼钢分别达到 15.1%、20.5%、23.5%和 27.0%，同时结合粗钢产量预测结果，得到 2022~2040 年高、低两种情景下长流程与短流程粗钢产量，如图 69 所示。

表 7 短流程炼钢预测

年份	2020	2025	2030	2035	2040
废钢-电炉短流程炼钢比例 (%)	10.0%	15.1%	20.5%	23.5%	27.0%

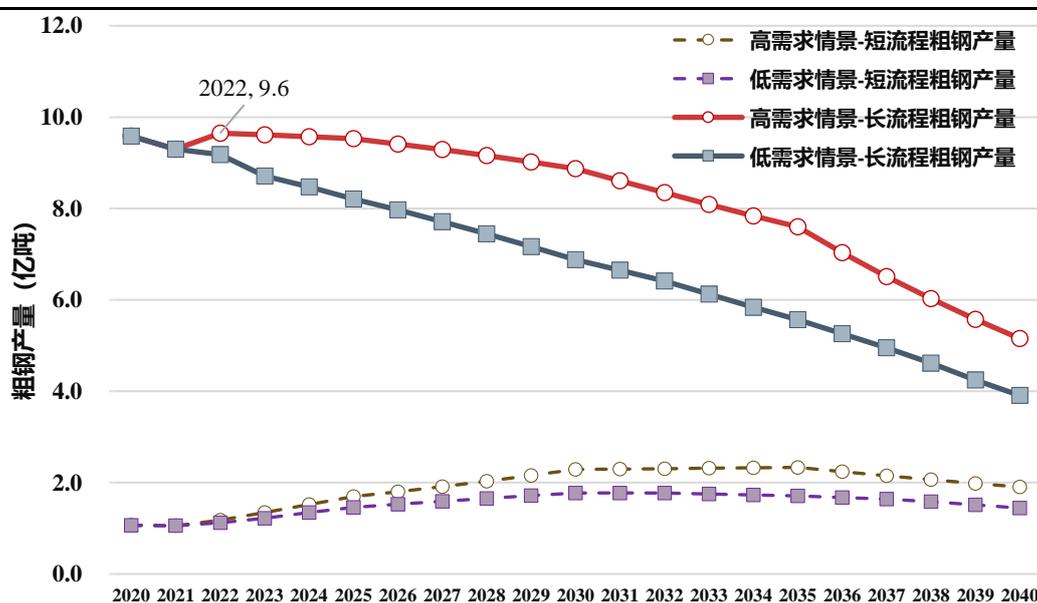


图 69 高、低需求情景下长、短流程流程粗钢产量预测结果

(5) 生铁产量

钢铁生产过程中铁矿石、煤炭、焦炭的消耗与运输需求主要在于产量生铁环节，基于高、低需求情景下长流程粗钢产量与长流程废钢资源用量，预测未来高、低需求情景下生铁产量，如图 70 所示。高需求情景下预计“十四五”期间生铁产量仍将小幅上升，2025 年达到 9.1 亿吨的峰值，较 2020 年增长 0.2 亿吨，之后逐年下降。2030、2035 和 2040 年生铁产量将分别降低至 8.6、7.1 和 4.0 亿吨。低需求情景下生铁产量已于 2020 年达到 8.9 亿吨的峰值，未来将逐年下降。预计 2025、2030、2035 和 2040 年生铁产量将分别降低至 7.9、6.7 和 5.2 和 3.0 亿吨。

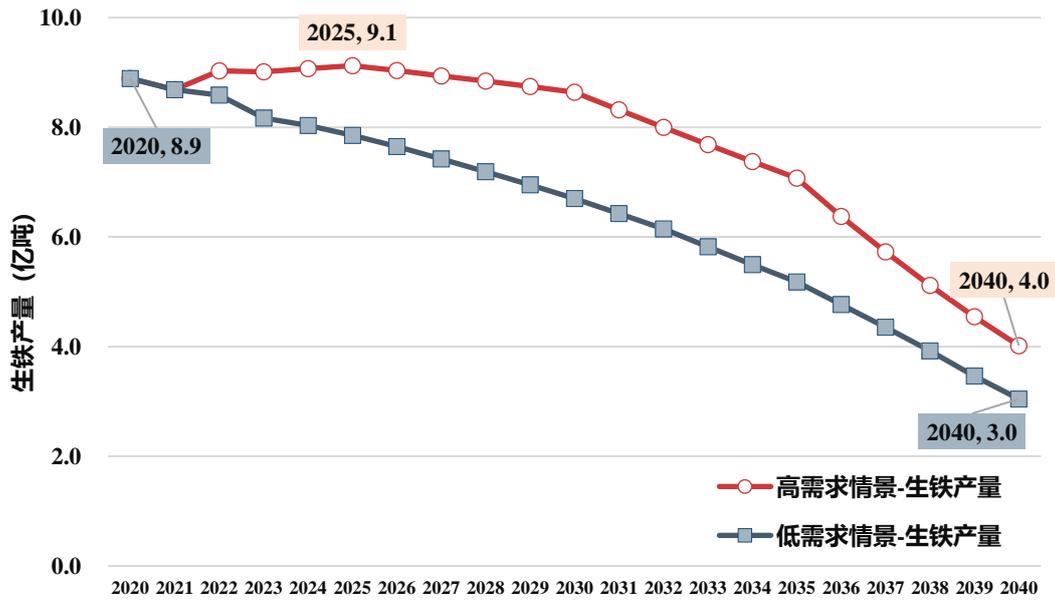


图 70 高、低需求情景下生铁量预测结果

5.2.2.2 货运量预测

(1) 货运量变化

“双碳”战略目标下未来钢铁行业供给侧改革持续深化，钢材消费需求收紧、净出口量逐渐下降，同时，短流程炼钢、废钢炼钢比例逐步提高，将共同导致2022~2040年钢铁行业货运量（含煤炭、焦炭、铁矿石、石灰石、钢材）整体呈现下降趋势。如图71所示，2020年钢铁行业煤炭、焦炭、铁矿石、石灰石、钢材五类大宗商品货运总量约为35.9亿吨，“十四五”期间钢铁行业货运量维持在高位平台期，2025年货运总量在31.9~37.1亿吨，“十四五”后货运量逐年下降，2030、2035和2040年钢铁行业货运量分别较2020年下降1%~23%、16%~39%和47%~60%。

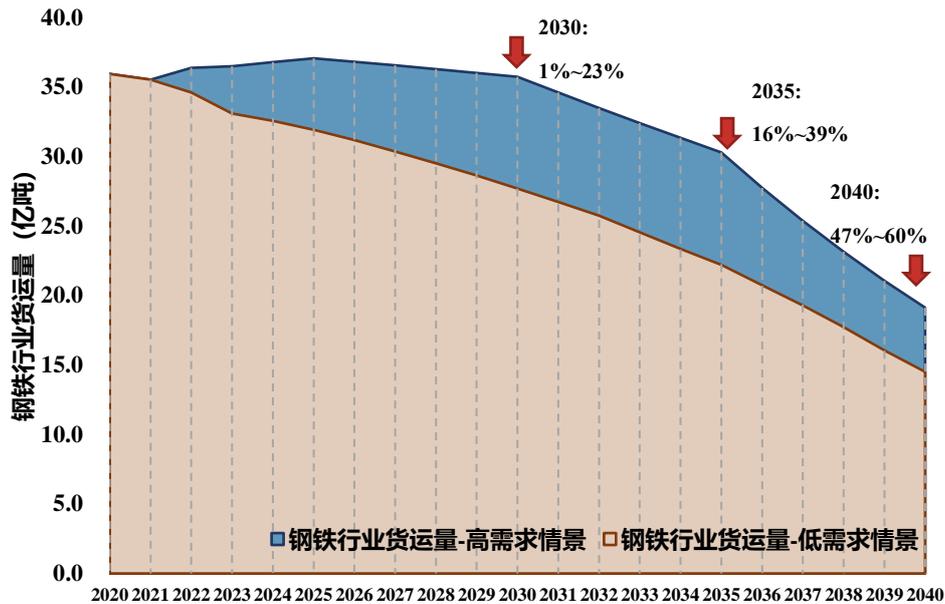


图 71 钢铁行业货运量预测

(2) 措施影响分析

基于高需求情景下粗钢产量，同时假设钢铁行业长/短流程炼钢比例、废钢资源供应量与利用率、能效水平等与 2020 年保持一致，设置不采取任何削减措施的情景下的基准情景，评估不同措施对于货运量的削减贡献，低需求情景货运量即各类措施叠加后的货运量。在不采取任何控制措施的情况下（图 72 基准情景货运量），钢铁行业货运量将在 2030 年前持续增长，2030 年达到 39 亿吨左右，较 2020 年增长约 2.7 亿吨。随着下游各部门对于钢铁消费需求的逐步削减，2030 年后钢铁行业货运量将自然下降，2035 和 2040 年分别下降至 35.0 和 24.5 亿吨。需求控制是降低钢铁货运量的首要措施。仅依靠降低粗钢产量一项措施，2025、2030、2035 和 2040 年可分别削减钢铁行业货运量约 5.7、9.2、9.7 和 6.2 亿吨，对于货运量削减量的贡献率分别为 90%、83%、77%和 63%，但随着时间推移需求控制的削减作用逐步减弱；依靠促进资源循环利用，提高废钢资源利用率，同时提高短流程炼钢比例，消纳废钢资源，到 2025、2030、2035 和 2040 年可分别降低货运量约 0.6、1.8、2.9 和 3.6 亿吨，对于货运量削减量的贡献率分别为 10%、17%、23%和 37%，是降低货运需求的另一项有效措施，且随着时间推移对于货运量的削减作用逐步增强；此外，优化炉料配比，提高资源利用率可少量减少对于铁矿石原材料的货运需求，但该措施对于货运总量的削减贡献有限，贡献率低

于 0.4%。

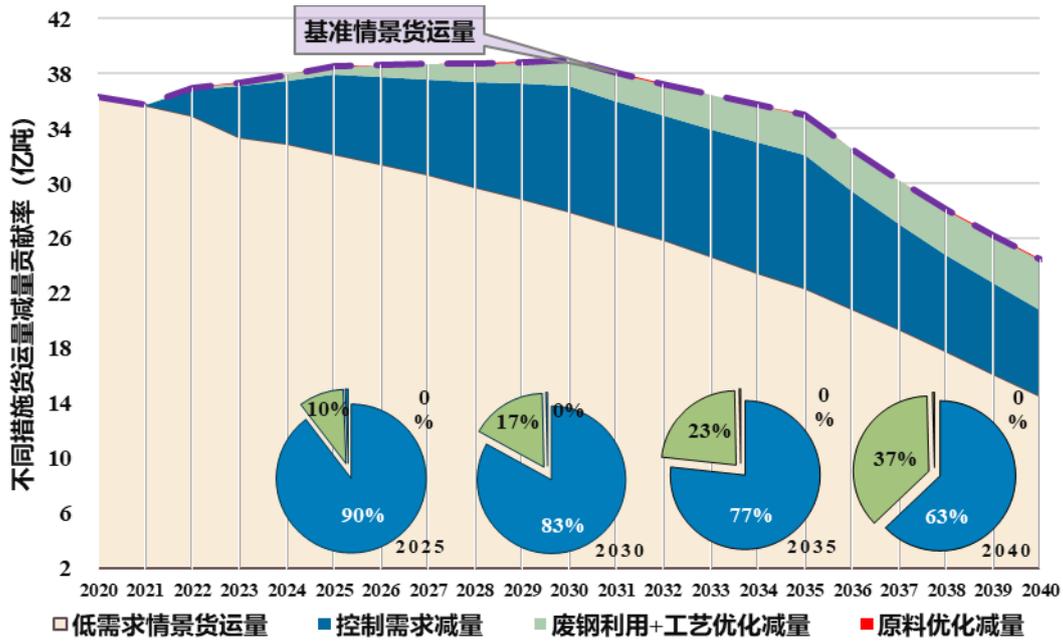


图 72 钢铁行业不同措施对于货运量削减贡献率

5.2.3 水泥行业

5.2.3.1 需求预测

(1) 熟料、水泥消费量

建立水泥熟料与城镇化率、人均 GDP、固定资产形成总额、三次产业结构与固定资产投资结构之间的多因素拟合分析模型，预测高、低需求情景下 2022~2040 年水泥熟料消费量。水泥熟料消费预测研究中以固定资本形成总额指标表征固定资产投资状况。虽然受投资结构优化的影响，中国经济增长中的投资拉动因素趋于弱化，但固定资本形成总额上行的趋势将保持不变，且有动力保持中等增速。预计 2025、2030、2035 和 2040 年，中国固定资产形成总额（2000 年不变价）将分别达到 37.3、45.2、53.0 和 59.8 万亿元。制造业、房地产和基础设施是固定资产投资的三大领域，其中房地产和基础设施投资与水泥消费量关联密切。“十四五”期间我国对新建房屋的刚性需求仍可支撑年均 26 亿平方米以上的建设规模，到 2025 年房地产投资占固定资产投资的比重为 21.0%。“十四五”之后，随着国家住房保障体系的逐步完善和基本住房需求的饱和，预计 2030 和 2035 年房地产投资的比重将下降至 19.5%和 18.0%。未来基建领域放大投资仍将是稳

定经济增长的重要举措之一，预计 2021~2040 年，我国基础设施投资占固定资产投资总额的比重将维持在 30%~38%。依据多因素拟合分析模型，预测高、低两种情景下水泥熟料消费量，水泥消费量根据熟料消费量与水泥净出口量折算得到。如图 73 所示，高需求情景下熟料消费量预计将于 2024 年达到 16.8 亿吨的峰值，2025 年前维持在 15.7~16.8 亿吨的峰值平台区，随后逐年下降。预计 2030、2035 和 2040 年，熟料消费量将分别降至 15.0、13.6 和 11.7 亿吨，较 2020 年分别下降 5%、14%和 26%，水泥消费量分别降低至 22.7、20.6 和 17.7 亿吨。低需求情景下熟料消费量预计已于 2020 年达到 15.8 亿吨的峰值，未来将持续下降。预计 2025、2030、2035 和 2040 年，熟料消费量将分别降至 15.2、13.7、11.6 和 9.0 亿吨，水泥消费量相应分别降低至 23.0、20.8、17.5 和 13.7 亿吨。

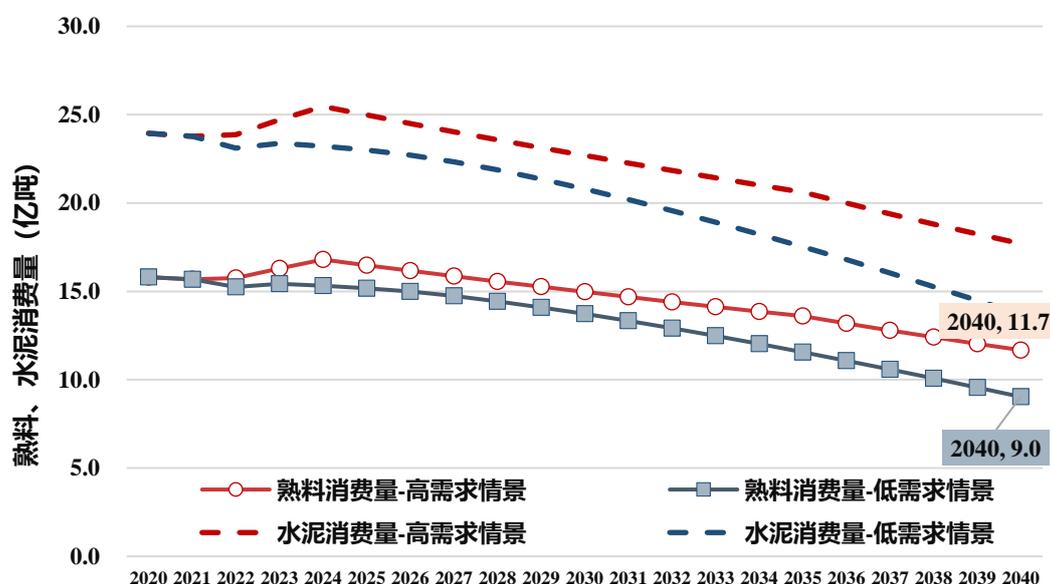


图 73 高、低需求情景下水泥、熟料消费量预测结果

(2) 熟料进出口量

在水泥价格及市场需求驱动下，中国已经成为东南亚各国熟料主要出口国。中国水泥熟料进口量自 2018 年起已经连续三年大幅增长^[133]，2018、2019、2020 年熟料分别进口 1363、2274、3337 万吨，年均增长 57%，2020 年熟料进口量占全国水泥熟料消费量的 2.1%。2021 年进口量有所下降，熟料进口总量为 2549 万吨。从历史及当前趋势来看，随着中国在行业结构调整、节能减排压力加大、人员成本增高等多重因素作用下，水泥区域性、阶段性供应紧张和价格高位运行的问题将在较长时期内存在，未来随着越南、印尼、菲律宾等东南亚国家水泥产能

继续扩张，贸易环境宽松进一步宽松，对中国的出口动力可能进一步增强，中国水泥熟料进口规模还有进一步扩大可能性^[123]。未来中国水泥熟料进口量预计不高于现有水平，2025、2030、2035 和 2040 年水泥熟料净进口量分别增长至消费量的 2.5%、3%、4%和 6%。

(3) 熟料产量

根据前述熟料消费量预测结果，结合未来熟料进出口变化测算未来高、低需求情景下熟料产量。如图 74 所示，高需求情景下预计 2024 年前熟料产量仍将小幅上升，2024 年达到 16.4 亿吨的峰值，较 2020 年增长约 1 亿吨，上升 6%，之后逐年下降。2030、2035 和 2040 年熟料产量将分别降低至 14.5、13.1 和 11.0 亿吨，较 2020 年分别下降 6%、16%和 29%。低需求情景下熟料产量于 2020 年达到 15.5 亿吨的峰值，未来将逐渐下降。预计 2025、2030、2035 和 2040 年熟料产量将分别降低至 15.0、13.3 和 11.1 和 8.5 亿吨，较 2020 年分别下降 4%、14%、28%和 45%。

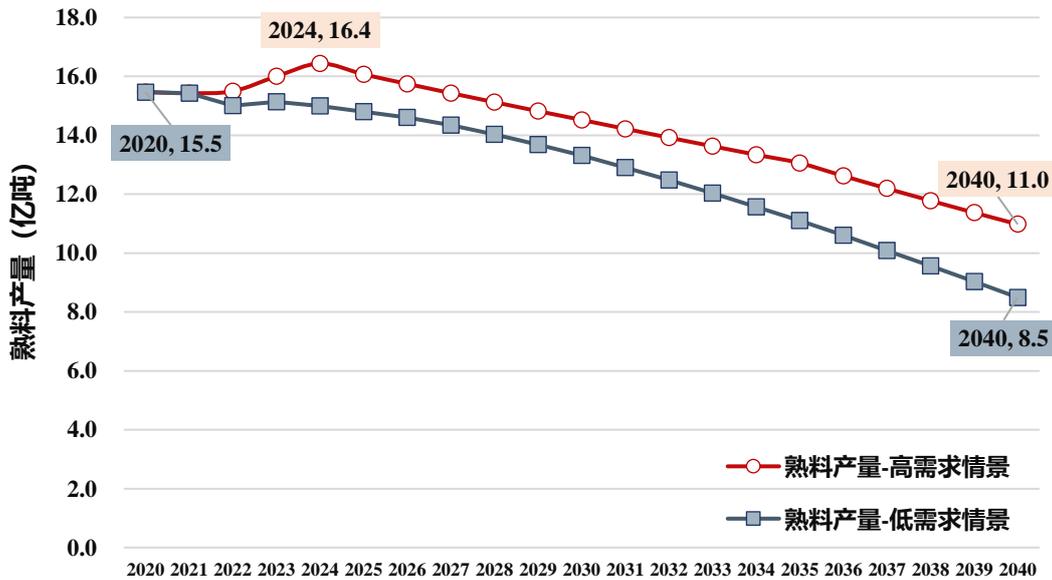


图 74 高、低需求情景下熟料产量预测结果

5.2.3.2 货运量预测

(1) 单位熟料煤耗

能耗水平是影响水泥行业碳排放和货运需求的因素之一，综合行业发展阶段，实际能效水平以及可预期的各种节能措施，预计水泥行业能耗水平仍有一定的下降空间。以 2020 年水泥企业熟料煤耗调研数据为基础，依据《水泥单位产品能

源消耗限额》(GB16780),“十四五”、“十五五”、“十六五”期间,分别对单位熟料煤耗(包括统计过程中余热发电折减的煤耗)大于112、109和105千克标准煤/吨的生产线进行淘汰或技术改造,预计实施淘汰或技术改造的生产线比例(按产能计)分别达到30%、50%和70%。据此估算2025、2030、2035、2040年水泥行业平均单位熟料煤耗分别为141、146、133和131千克/吨,较2020年下降了3%、6%、8%和10%。

(2) 水泥行业货运量

“双碳”战略目标下未来水泥行业消费需求进一步收紧,熟料净进口量持续提升,同时通过落后产能淘汰、节能改造、燃料替代、原材料替代等措施在降低水泥行业能源消费与排放的同时,降低上下游货运需求。如图75所示,高、低情景下未来水泥行业货运量(含石灰石、煤炭、水泥)均呈现下降趋势。2020年水泥行业石灰石、煤炭和水泥货运量约45.2亿吨,2024年水泥货运量达到43.7~47.9亿吨,2024年后逐渐下降。2030、2035和2040年分别下降至38.9~42.5亿吨、32.6~38.4亿吨和25.2~32.6亿吨,较2020年下降6%~14%、15%~28%和28%~44%。

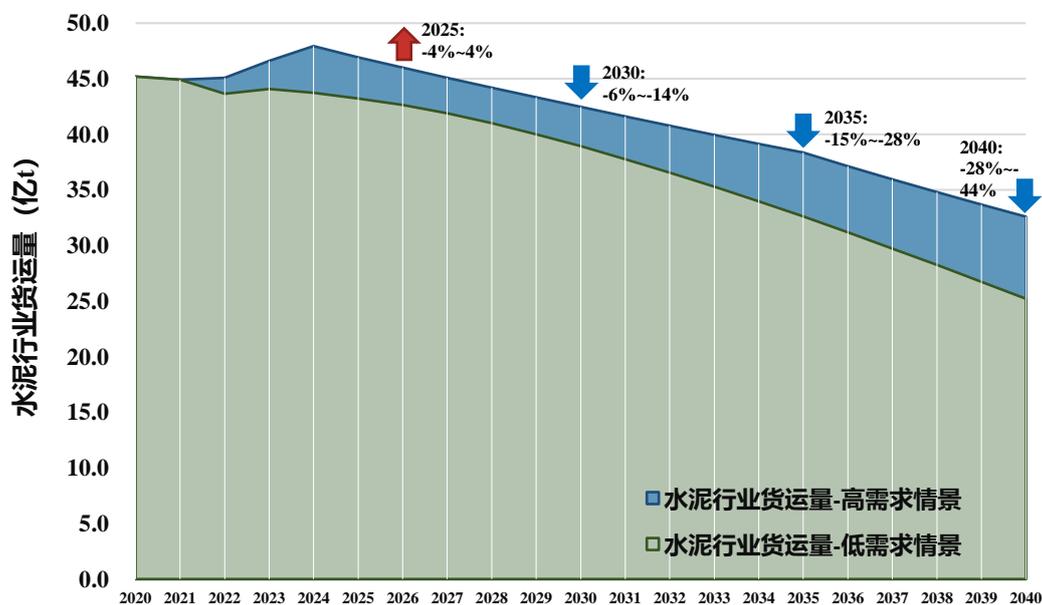


图75 水泥行业货运总量预测

(3) 措施影响分析

基于高需求情景下水泥产量,同时假设水泥企业水泥/熟料比例、熟料进口量、原料燃料替代率、能源结构、能效水平均与2020年保持一致,设置不采取

任何削减措施下的基准情景，评估不同措施对于水泥行业货运量的削减贡献，低需求情景货运量即叠加各类措施后的货运量。在不采取任何控制措施的基准情景下（图 75 基准情景货运量），水泥行业货运量将在 2024 年左右达到 48.1 亿吨，较 2020 年增长约 2.9 亿吨。随着对于水泥消费需求的递减，水泥行业货运量将逐渐下降，2035 和 2040 年分别下降至 38.8 和 33.3 亿吨。降低水泥行业货运量主要依靠降低水泥产量，需求控制一项措施在 2025、2030、2035 和 2040 年可分别削减水泥行业货运量约 3.8、3.6、5.9 和 7.6 亿吨，对于货运量削减量的贡献率分别为 96%、95%、96%和 97%。提升水泥企业能效水平、提高熟料进口量和促进原材料替代以对于降低水泥行业货运量的作用十分有限，三种措施在 2025、2030、2035 和 2040 年分别合计削减货运量约 0.2、0.3、0.4 和 0.5 亿吨，对于货运量削减量的贡献率在 3%~5%左右。

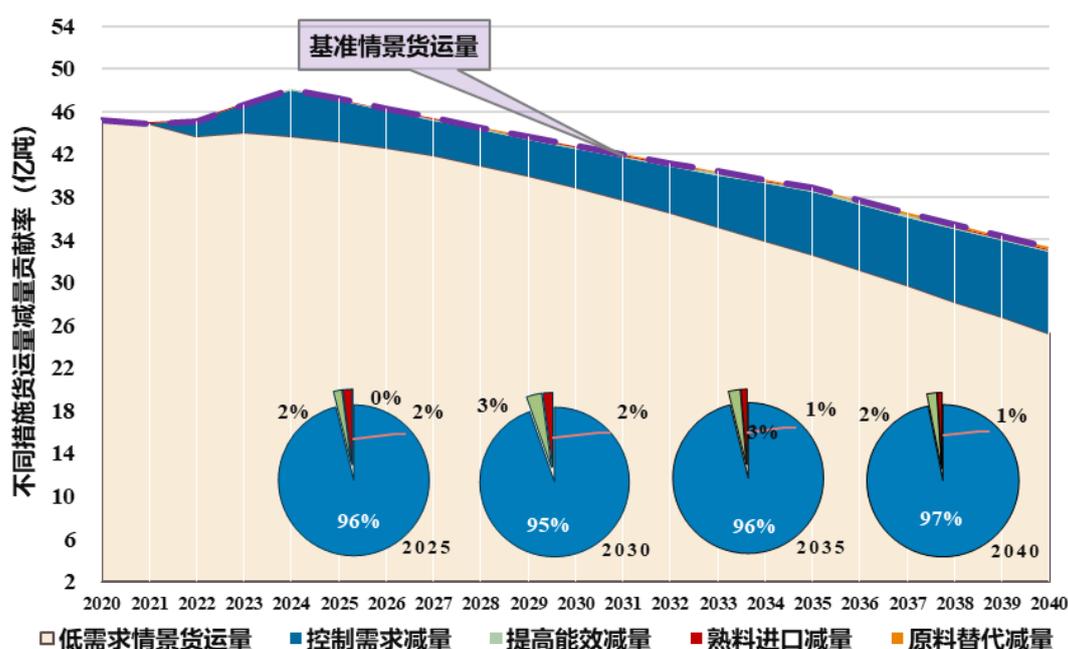


图 76 水泥行业不同措施对于货运量削减贡献率

5.2.4 铝冶炼行业

5.2.4.1 需求预测

(1) 铝材消费量

中国国内铝消费强度已经在 2017 年达到峰值，基于人口增长趋势与人均铝

材消费量变化预测未来铝材消费量。2020年中国人均铝材消费量为409吨/万人，历史变化趋势显示人均铝材消费量已进入增长趋缓区间，预计将于2024年前后达到峰值平台，峰值区间为491~552吨/万人，发达国家的发展历程表明，铝材消费量的峰值平台期往往持续数十年的时间。如图77所示，“十四五”时期铝材消费量仍将持续增长，高需求情景下铝材消费量将于2027年达到7872吨的峰值，低需求情景下将于2025年达到6996万吨峰值。

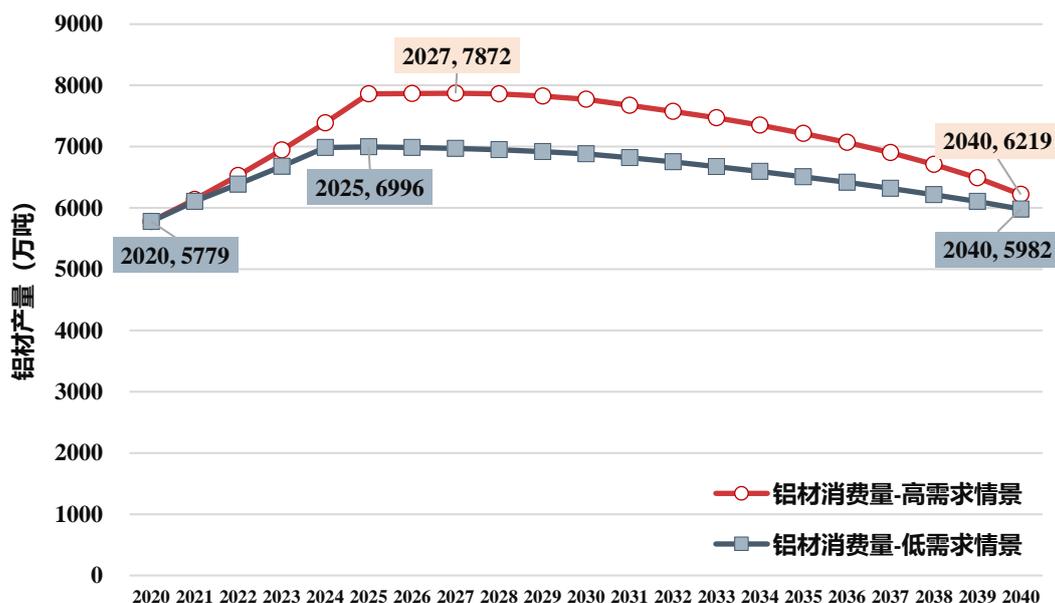


图 77 高、低需求情景下中国铝材消费量预测

(2) 再生铝产量

再生铝原料由国内旧废铝、国内新废铝、进口废铝等几个方面组成。鉴于铝消费领域十分分散，回收周期不一，国内旧废铝以15~25年之前国内消费量的移动平均乘以75%进行测算，新废铝由当年铝消费量乘以5%进行测算，进口废铝则主要根据进口政策进行预测，再生铝资源转化率按照92%计算^[85]。同时，参考《“十四五”循环经济发展规划》提出的到2025年再生铝产量达到1150万吨的目标^[134]，预计到2025、2030、2035和2040年，再生铝产量分别达到1150、1600、2050和2500万吨。

(3) 电解铝产量

基于铝材需求量、铝材进口量、再生铝产量、原铝进口量等预测结果，结合对历史变化趋势、进出口政策、电解铝产能总量控制政策、国际贸易局势的综合分析，预测未来电解铝产量。如图78所示，高需求情景下预计中国电解铝产量

在“十四五”期间小幅上升，并于2025年达到4781万吨的峰值，较2020年增加1073万吨，上升29%，之后逐年下降。2035和2040年电解铝产量将分别降低至3306、2063万吨，较2020年分别下降402和1645万吨，同比下降11%和44%。低需求情景下预计中国电解铝产量于2024年达到4234万吨的峰值，较2020年增加526万吨，上升14%。2030、2035和2040年电解铝产量将分别降低至3500、2748和1876万吨，较2020年分别下降208、960和1832万吨，同比下降6%、26%和49%。

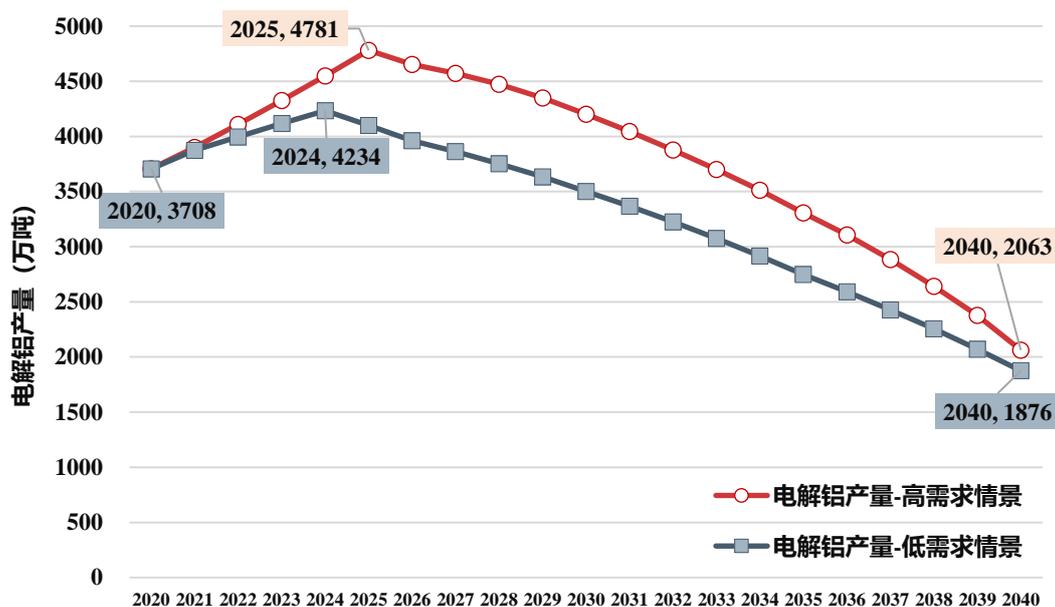


图 78 高、低需求情景下中国电解铝产量预测

(4) 氧化铝产量

中国氧化铝消费量的95%以上用于生产电解铝，氧化铝市场不追求完全自给自足，从降低能耗减少排放的角度，未来将鼓励适量氧化铝进口，2020年中国氧化铝进口量为381万吨，出口15万吨，预计2025、2030、2035和2040年氧化铝进口量将分别达到430、480、542和615万吨，出口量维持30万吨。基于电解铝产量预测结果，结合生产每吨电解铝大约需要消耗1.967吨氧化铝的平均水平以及未来氧化铝进口趋势，得到2022~2040年全国氧化铝消费量。如图79所示，高需求情景下预计氧化铝产量于2025年达到9005万吨的峰值，较2020年增加1692万吨，上升约23%，随后逐渐下降。低需求情景下预计氧化铝产量于2024年达到7939万吨的峰值，较2020年增加351万吨，上升约5%，随后逐渐下降。2030、2035和2040年氧化铝产量将分别降低至6435、4893和3105万

吨，较 2020 年分别下降 878、2420 和 4208 万吨，同比下降 12%、33%和 58%。

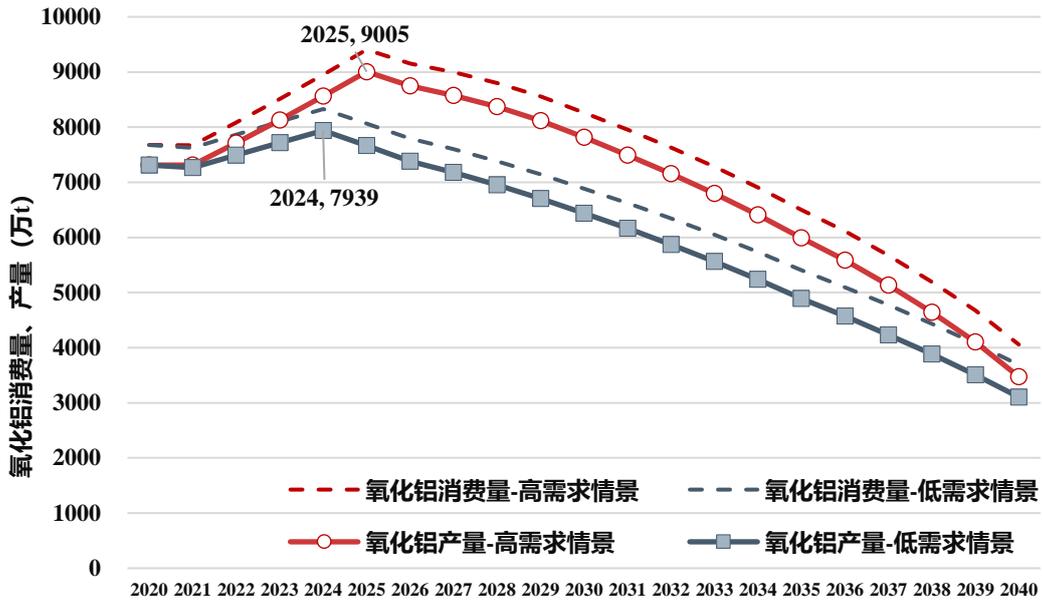


图 79 高、低需求情景下中国氧化铝产量预测

5.2.4.2 货运量预测

如图 80 所示，2020 年铝冶炼行业煤炭、铝土矿、铝材三类大宗商品货运量约 2.8 亿吨，“十四五”期间铝冶炼行业货运量持续增长，2025 年货运量达到 3.0~3.5 亿吨，较 2020 年上升 8%~25%。2030 年后铝冶炼行业货运需求下降明显，2035 和 2040 年货运量将分别下降至 2.1~2.5 亿吨和 1.6~1.7 亿吨，分别较 2020 年下降 9%~23%和 39%~44%。

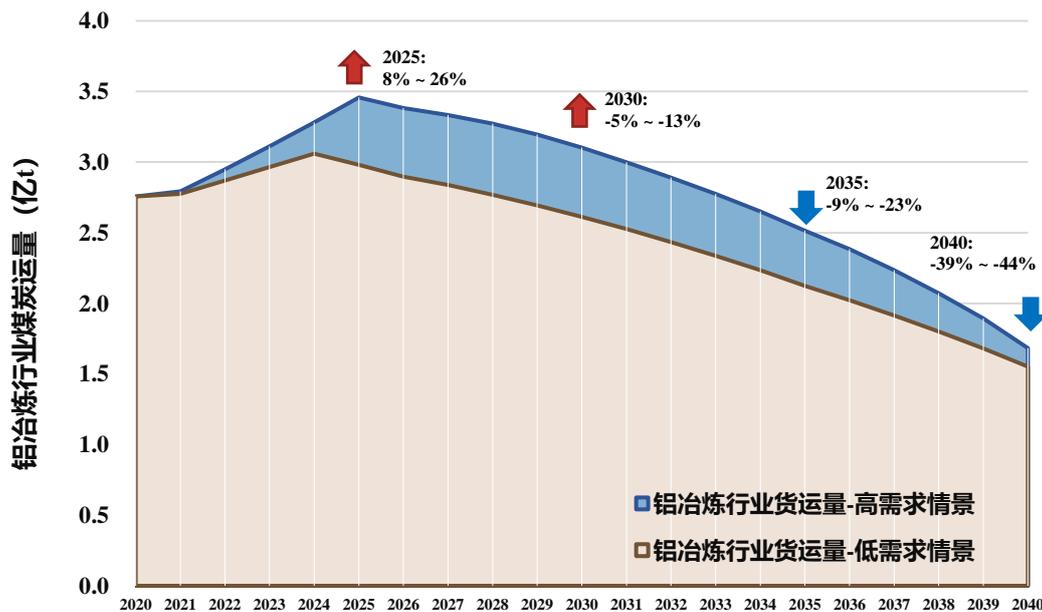


图 80 铝冶炼行业货运量预测

5.2.4.3 措施影响分析

基于高需求情景下铝材产量，同时假设铝冶炼行业铝材/原铝折算比例、再生铝资源利用率、氧化铝进口量、能源结构、生产方式、能效水平与 2020 年保持一致，设置不采取任何削减措施的基准情景，评估不同措施对于货运量的削减贡献，低需求情景货运量即叠加各类措施后的货运量。在不采取任何控制措施的情况下（图 81 所示基准情景货运量），铝冶炼行业货运量将在 2025 年前持续增长，2025 年达到 3.6 亿吨左右，较 2020 年增长 0.8 亿吨。随后货运量逐渐下降，2035 和 2040 年分别下降至 2.7 和 1.9 亿吨。需求控制是降低铝冶炼行业货运量的首要措施。依靠降低铝材消费需求，降低原铝、氧化铝产量一项措施，在 2025、2030、2035 和 2040 年可分别削减铝冶炼行业货运量约 0.5、0.5、0.4 和 0.2 亿吨，对于货运量削减量的贡献率分别为 82%、80%、74%和 70%，随着时间推移需求控制对于货运量的削减作用逐步减弱。依靠资源循环利用，提高废铝资源利用率，提升再生铝在原铝生产时的投入比例，可每年削减铝冶炼行业上下游货运量约 0.1~0.2 亿吨，对于货运量削减量的贡献率约 14%~23%，是降低铝冶炼行业铝土矿、煤炭资源使用，降低货运需求的有效措施。提高氧化铝进口量，对于削减铝冶炼行业货运量的贡献率约 4~7%，是降低货运需求的另一项有效措施。

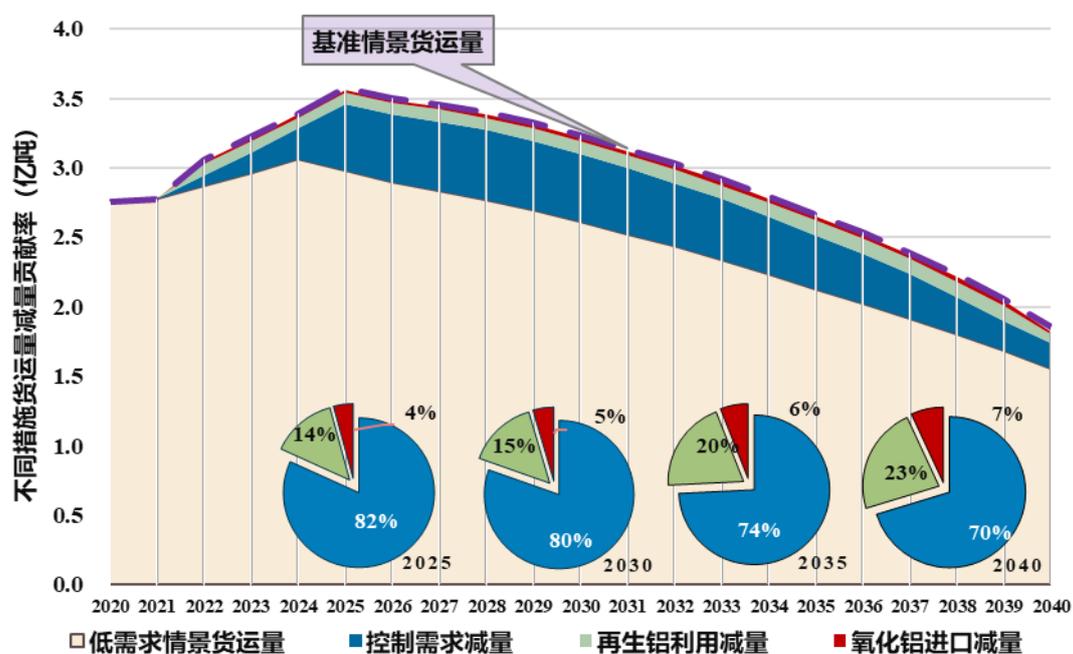


图 81 铝冶炼行业不同措施对于货运量削减贡献率

5.2.5 炼焦行业

5.2.4.1 需求预测

焦炭需求量与钢铁行业生铁产量紧密相关，基于生铁产量预测结果并假设吨铁平均综合焦比保持 0.46 吨不变，预测未来钢铁行业焦炭消费量。其他行业每年焦炭消费量约 0.7 亿吨，考虑化学原料及化学制品制造业仍处于持续发展态势，假设未来各年份其他行业焦炭消费量与 2020 年持平。结合 2016 年后我国焦炭净出口量以年均 13% 的速度持续下降，近年来稳定在 500~600 万吨，预计到 2025 和 2030 年焦炭净出口量将下降至 200 万吨和 0，2030 年后焦炭由净出口转变为进口，2035 和 2040 年焦炭进口量分别达到 500 与 1000 万吨。如图 82 所示，高需求情景下随着生铁产量的小幅提高，焦炭产量仍将有所上升，预计全国焦炭产量于 2025 年达到 4.8 亿吨峰值，较 2020 年增长 2%，2030 年前均维持在高位平台期。2030、2035 和 2040 年全国焦炭产量分别降低至 4.6、3.9 和 2.6 亿吨，较 2020 年分别下降 0.1、0.8 和 2.1 亿吨，下降 2%、17% 和 45%。低需求情景下全国焦炭产量已于 2020 年达峰，之后逐年下降。2025、2030、2035 和 2040 年全国焦炭产量分别降低至 4.1、3.7、3.1 和 2.1 亿吨，分别较 2020 年下降 0.1、1.0、1.7 和 2.6 亿吨，下降 2%、21%、35% 和 55%。

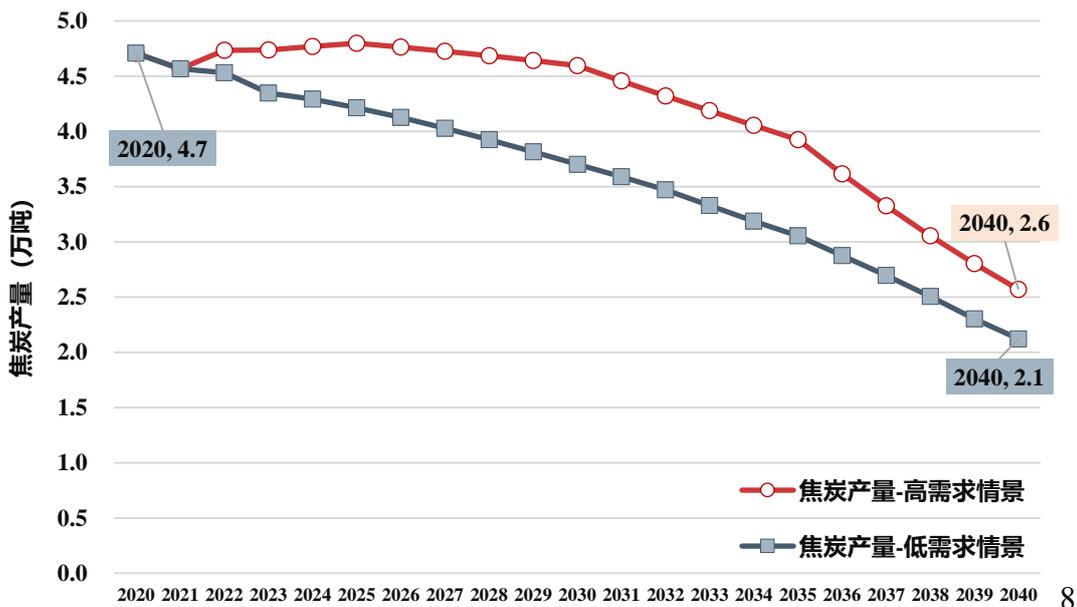


图 82 高、低需求情景下中国焦炭产量预测

5.2.4.2 货运量预测

炼焦行业与钢铁行业发展具有极强的相关性。如图 83 所示，高、低两种情景下未来炼焦行业货运量（煤炭、焦炭）整体呈现下降趋势，2020 年炼焦行业煤炭、焦炭两类大宗商品货运量约 11.3 亿吨，“十四五”期间炼焦行业货运量维持在高位平台期，2025 年货运量在 10.1~11.5 亿吨，2030 年下降至 8.9~11.0 亿吨，2040 年下降至 5.1~6.2 亿吨，较 2020 年下降约 5.1~6.2 亿吨，下降 45%~55%。

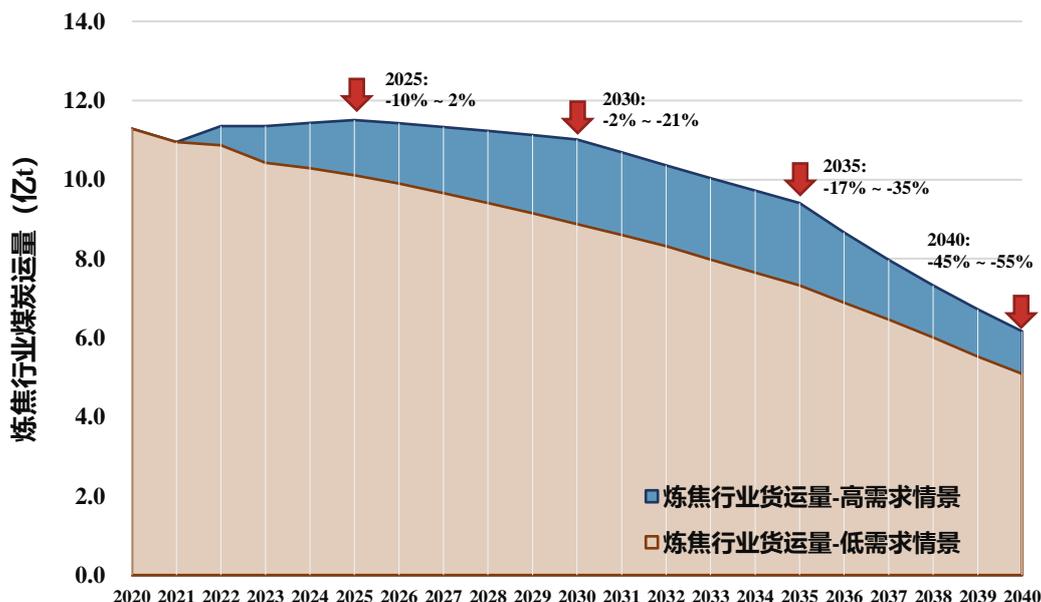


图 83 炼焦行业货运量预测

5.2.6 建筑行业

5.2.6.1 建筑规模预测

根据城镇居住建筑、城镇公共建筑、农村建筑特点，结合人口、城镇化率变化趋势，分类预测未来不同类型建筑人均面积和建筑规模。

(1) 城镇居住建筑

长期来看，城镇居住建筑规模由城镇人口和房地产投资规模决定。2013 年左右中国城镇住房套户比已大于 1，城镇居住建筑发展跨过绝对短缺阶段，开始进入质量提升阶段，城镇居住建筑建设速度进一步放缓。从历史变化趋势来看，“十三五”时期，城镇人均居住建筑面积年均增加 0.8 平方米，远低于“十二五”时期 1.3 平方米的年均增量。结合“房住不炒”、“实施城市更新行动，推动城镇

老旧小区改造”等政策导向，综合判断我国城市房地产快速建设期已基本结束，未来城镇人均居住建筑面积将逐步达到峰值。住房需求和经济发展阶段、城市化水平有密切关系，国际经验表明发达国家人均住房建筑面积基本在 35~70 平方米。2020 年，中国城镇人均居住建筑面积为 33.2 平方米，与韩国（34.2 平方米）基本相当，与法国（40 平方米）、德国（46 平方米）、日本（39 平方米）尚有一定差距，“十二五”“十三五”期间住房投资占 GDP 比例高于发达国家，使得我国住房发展水平相比经济发展水平有所超前，人均住房面积高于这些国家相同经济发展阶段，未来十五年，我国城镇人均居住建筑面积与上述参照国家差距进一步缩小。类比发达国家不同阶段城镇人均居住建筑面积水平，结合我国居住模式和建筑面积增速，预计 2035 年我国城镇人均居住建筑面积峰值在 38~40 平方米左右。

（2）城镇公共建筑

公共建筑主要服务于公共活动，从类型上分为办公、商场、酒店、医院、学校、交通枢纽、体育场馆等。2020 年，中国人均公共建筑面积约为 10 平方米/人，低于大多数发达国家。公共建筑主要集中在城镇，按城镇居民人口计算，城镇人均公共建筑面积为 14.7 平方米/人。既有公共建筑中，人均办公建筑面积已经较为合理，但人均商场、医院、学校的面积还相对较低。随着电子商务发展，商场规模增长空间有限，医院、学校、交通枢纽、文体建筑以及社区活动场所等建筑规模还有增长空间。到 2040 年，我国城镇人均公共建筑面积仍有一定增长，与发达国家的差距将不断缩小，预计人均公共建筑面积将达到 16~18 平方米/人左右。

（3）农村建筑

2020 年中国人均农村建筑面积为 50.6 平方米/人，随着城镇化进程进一步推进，大量农村人口转移到城市，部分农村住宅被弃置，预计 2035 年到农村建筑总面积将控制在 240 亿平方米左右，农村人均建筑面积在 55~60 平方米/人左右。

综上所述，如图 84 和图 85 所示，未来我国建筑规模仍将有上升趋势，建筑面积的增加主要来自城镇公共建筑与城镇居住建筑，农村建筑已达到平台期并将下降。高需求情景下预计 2032 年前中国建筑规模呈上升趋势，2032 年达到 750

亿平方米的峰值，随后基本保持稳定，2040 年降低至 722 亿平方米。考虑到中国土地资源短缺、能源和环境承载能力限制，在严格控制建筑面积的低需求情景下，预计 2030 年前中国建筑规模呈持续上升趋势，2030 年达到 722 亿平方米峰值，2040 年降低至 667 亿平方米。

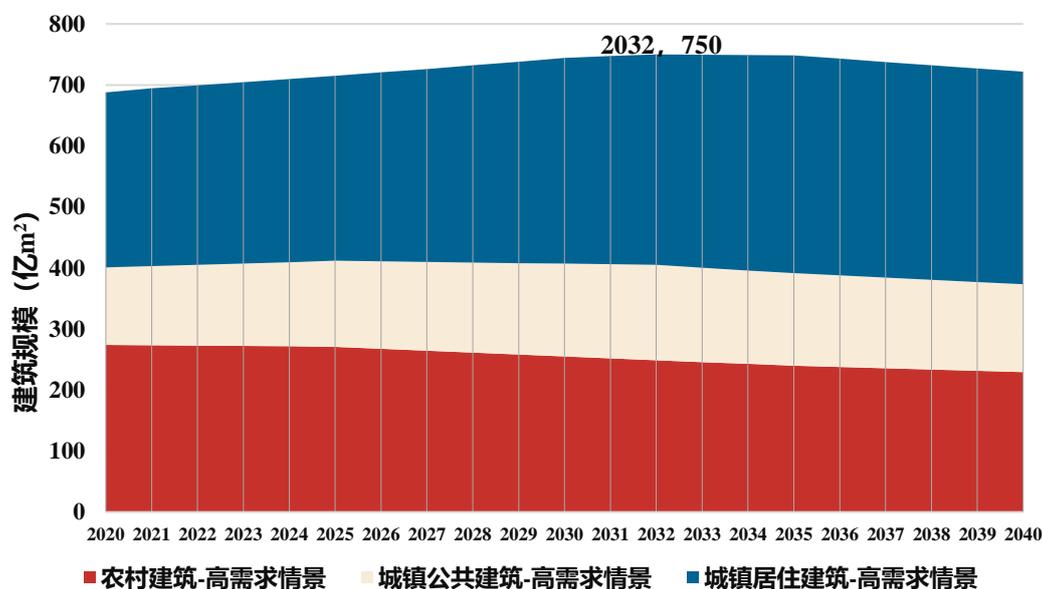


图 84 高需求情景下建筑规模预测

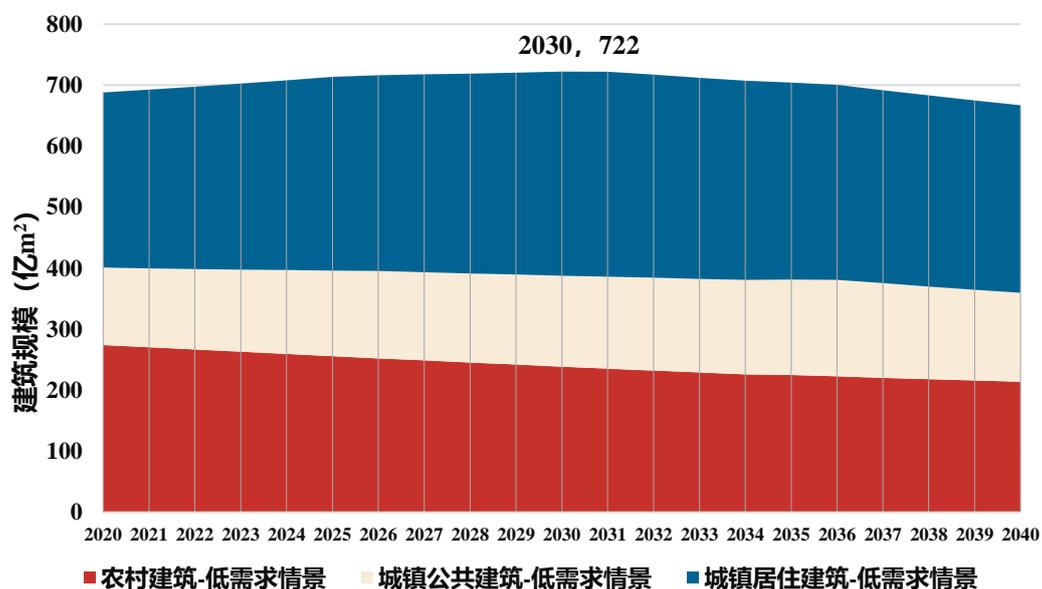


图 85 低需求情景下建筑规模预测

5.2.6.2 货运量预测

基础设施、房地产建设和军事工程等其他领域是砂石骨料的主要消费领域。根据高、低需求情景下建筑规模预测结果类比分析未来建筑砂石骨料消费量。预

计建筑沙石骨料消费量在 2030 年前持续增长，较 2020 年增长 5%~8%，2030 年后缓慢下降。自 2015 年以来，中国砂石骨料需求量围绕 170 亿吨上下，期间还曾出现过负增长，综合判断我国砂石骨料需求端已由增量市场进入存量市场，未来基础设施建设及其他领域对砂石的总体需求或逐渐收缩，本研究预测除建筑领域外，其他领域对于砂石骨料的消费量在 2025 年前以年均 1%的变化率上升，2026~2030 年、2031~2035 年、2036~2040 年间分别以年均 2%、2.5%和 4%的降幅持续下降。

六、排放影响分析

6.1 全社会货运量预测

《国家综合立体交通网规划纲要》预测，2021 至 2035 年中国全社会货运量将以年均 2%左右的增速持续增长^[19]，按照 2020 年 473 亿吨货运量测算，2035 年全社会货运量将增长至约 627 亿吨。参考《国家综合立体交通网规划纲要》的预测结果，并假设 2036~2040 年货运量仍以年均 0.5%左右的增速继续增长，设置如图 86 所示的基准情景。基准情景下 2035 年全社会货运量将增长至 627 亿吨，2040 年达到 643 亿吨，较 2020 年增长约 170 亿吨，上升 26%。

基于前述九类大宗商品货运量预测结果，设置高、低货运需求情景分析未来全社会货运量变化趋势。高需求情景下九类大宗商品货运量均来自各行业高需求情景，2020 年九类大宗商品合计货运量约 310 亿吨，占全社会货运量的 66%左右，九类大宗商品之外的其他货类（包括邮政快递、机械设备、电子设备、轻工医药产品、粮食等）保持年均 4.5%的增长率持续上升；需求情景下九类大宗商品货运量均来自各行业低需求情景，九类大宗商品之外的其他货类同样保持年均 4.5%的增长率持续上升。

如图 86 所示，本研究基于行业发展的预测结果显示，高需求情景下全社会货运量将以年均 1.5%的增速持续增长，2035 年达到 598 亿吨，2040 年达 633 亿吨，较 2020 年增长约 160 亿吨，上升 25%。2025 年前九类大宗商品货运量将保持增长态势，年均增速为 0.6%，2025 年达到 319 亿吨的峰值，较 2020 年增长 9 亿吨。各类大宗商品均有不同程度增长，其中，砂石骨料、煤炭、水泥和石灰石

2025 年货运量较 2020 年分别增长 3.2、2.4、1.0 和 0.7 亿吨，增量明显。2025 年后九类大宗商品货运量逐年下降，2025~2030 年、2031~2035 年和 2036~2040 年年均降幅分别为 0.8%、1.6%和 3.2%。2040 年降低至 241 亿吨，较 2020 下降 22%。九类大宗商品在全社会货运量中的占比持续下降，2025、2030、2035 和 2040 年分别降至 61%、55%、47%和 38%，2033 年后大宗商品不再是中国货运需求的主体。

低需求情景下全社会货运量以年均 1.3%的增速持续增长，2035 年达到 575 亿吨，2040 年达 612 亿吨，较 2020 年增长约 139 亿吨，上升 22%。九类大宗商品货运量在 2025 年前维持在 309~312 亿吨的高位平台期，煤炭、砂石骨料、铝材、铝土矿货运量合计增长约 3.9 亿吨，焦炭、钢材、铁矿石、石灰石、水泥货运量合计减少 5.6 亿吨。2025 年后九类大宗商品货运量逐年下降，2025~2030 年、2031~2035 年和 2036~2040 年年均降幅分别为 1.3%、2.1%和 3.3%。2040 年降低至 241 亿吨，较 2020 下降 22%。2040 年降低至 220 亿吨，较 2020 年减少 90 亿吨，下降 29%。2025、2030、2035 和 2040 年九类大宗商品在全社会货运量中的占比分别降至 60%、53%、45%和 36%，2032 年后大宗商品不再是中国货运需求的主体。

综上分析发现，“十四五”期间中国大宗商品货运需求处于高位平台期，货运量在 310~320 亿吨之间波动。“双碳”战略目标下大宗商品货运量预计于 2025 年左右达峰，在全社会货运量中的占比持续下降，2032 年后占比低于 50%。未来货物运输需求仍将保持增长，增量主要来自邮政快递、机械设备、电子设备、轻工医药产品、粮食等其他货类，高价值、小批量、时效强的需求快速攀升。若满足《国家综合立体交通网规划纲要》中货运量年均 2%左右的增长预期，其他货类货运量需以年均 4.5%左右的增长率保持高速增长。2040 年其他货类货运量将较 2020 年上升 141%。

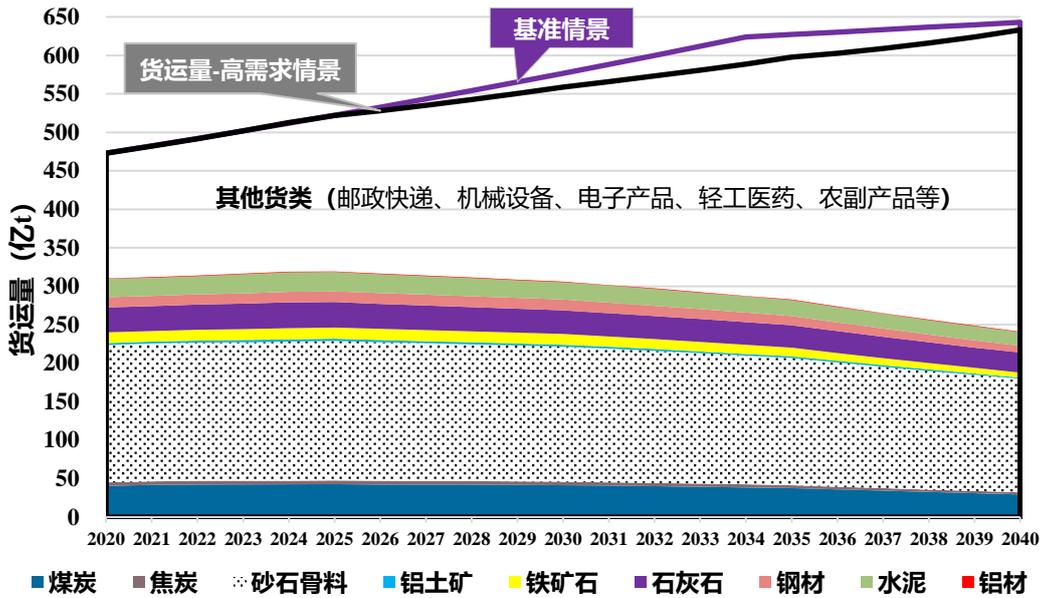


图 86 高需求情景下未来全社会货运量预测

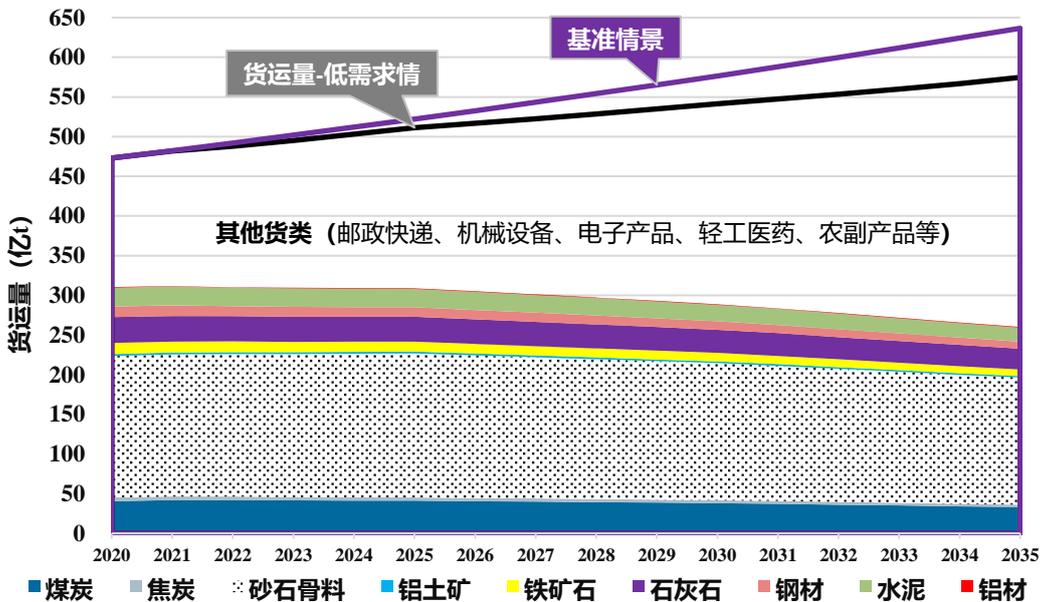


图 87 低需求情景下未来全社会货运量预测

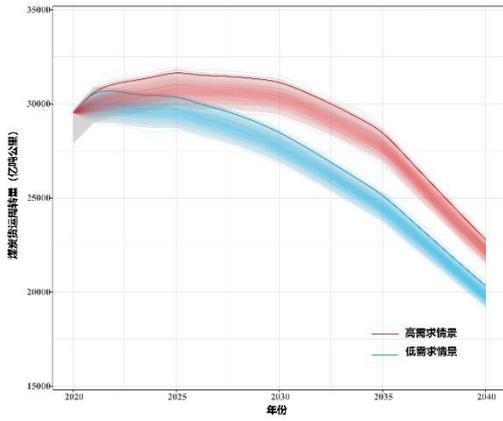
6.2 货运周转量预测

基于周转量法计算各货类公、铁、水不同运输方式 CO₂ 排放与大气污染物排放。货运周转量受运输结构、运输距离、产业布局等多种因素变化的影响，具有较高不确定性。本研究在不同货类运输结构、运输距离调研结果的基础上，参考货运结构调整、产业布局优化等未来发展规划，结合行业专家判断给出未来各货类公、铁、水货运比例与运输距离变化范围，如表 8 所示。基于各货类高、低需求情景下货运量变化趋势，结合公铁水运输结构占比、运输距离的变化范围，进

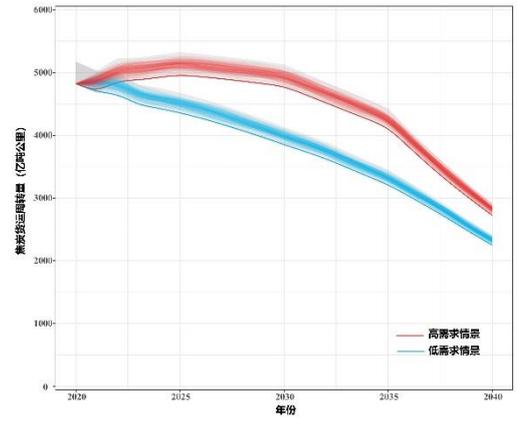
行数千次大量模拟，得到如图 88 所示的各货类货运周转量模拟结果，并最终选取货运周转量高、低需求情景用以计算排放量。

表 8 九类大宗商品运输结构与运距变化范围

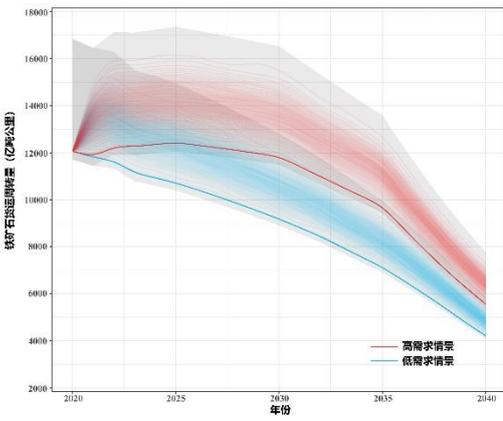
货类	货运结构 (%)	运输距离 (km)	2020 年	2030 年	2035 年	2040 年
煤炭	公路	409~435	13%	2%~12%	1%~9%	1%~7%
	铁路	619~670	73%	74%~82%	76%~83%	78%~83%
	水路	1312~1419	14%	14%~16%	15%~16%	15%~16%
焦炭	公路	838~901	44%	39%~33%	34%~28%	31%~25%
	铁路	990~1064	31%	36%~40%	40%~44%	42%~46%
	水路	1387~1491	25%	25%~27%	26%~28%	27%~29%
铝土矿	公路	171~235	28%	15%~23%	11%~19%	6%~12%
	铁路	485~669	34%	37%~41%	39%~43%	42%~46%
	水路	1347~1856	38%	40%~44%	42%~46%	44%~48%
铝材	公路	1164~1674	46%	32%~38%	27%~32%	23%~31%
	铁路	782~1124	26%	31%~34%	34%~38%	38%~42%
	水路	1348~1939	28%	31%~34%	32%~35%	31%~35%
水泥	公路	315~485	93%	88%~90%	86%~88%	84%~86%
	铁路	339~521	2%	4%~5%	5%~6%	7%~8%
	水路	1312~2017	5%	6%~7%	7%~8%	7%~8%
钢材	公路	538~774	44%	25%~33%	22%~30%	18%~26%
	铁路	782~1124	36%	45%~49%	48%~53%	51%~57%
	水路	1348~1939	20%	22%~24%	22%~25%	23%~25%
石灰石	公路	242~338	89%	85%~87%	84%~86%	82%~83%
	铁路	507~708	6%	7%~8%	8%~9%	9%~10%
	水路	1319~18443	5%	6%~7%	6%~7%	7%~8%
铁矿石	公路	687~947	30%	24%~31%	22%~29%	21%~29%
	铁路	485~669	38%	37%~41%	38%~42%	38%~42%
	水路	1347~1856	32%	32%~35%	33%~36%	33%~37%
砂石骨料	公路	135~189	90%	86%~88%	85%~87%	85%~87%
	铁路	285~399	2%	3%~4%	3%~4%	4%~5%
	水路	1211~1696	8%	9%~10%	10~11%	11%~12%



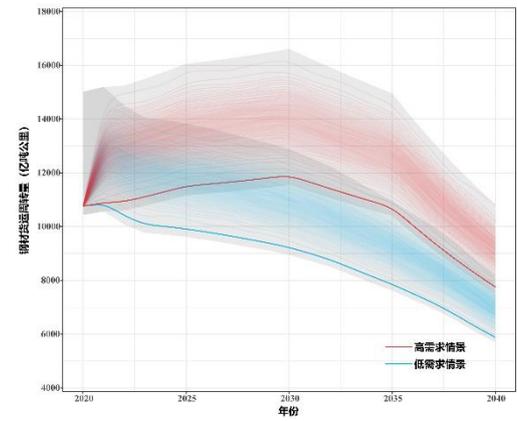
a) 煤炭



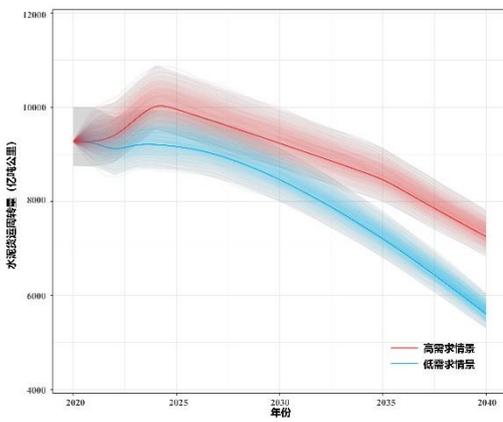
b) 焦炭



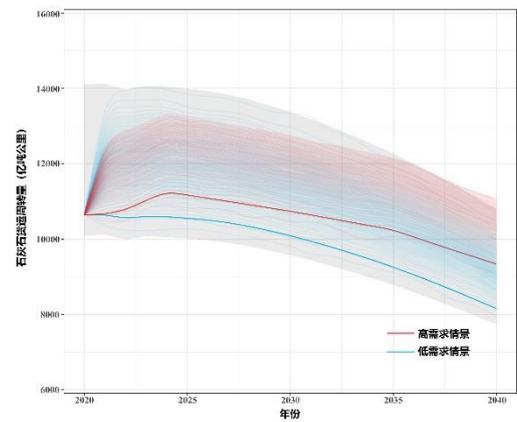
c) 铁矿石



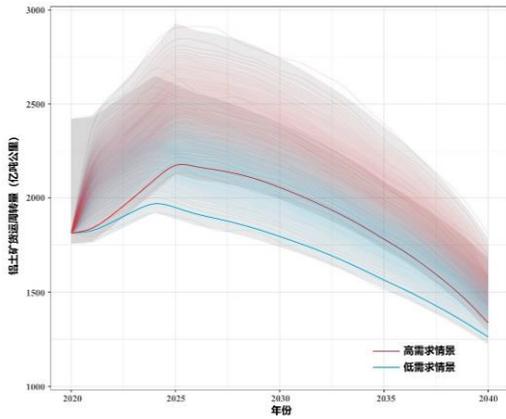
d) 钢材



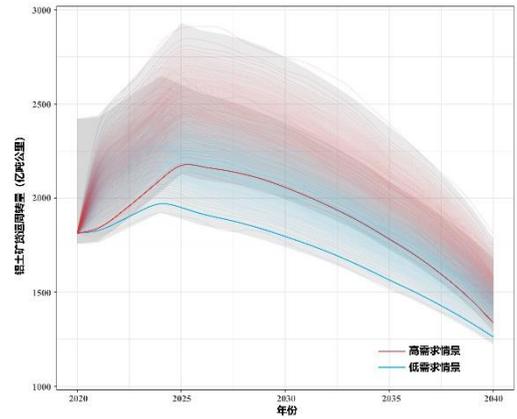
e) 水泥



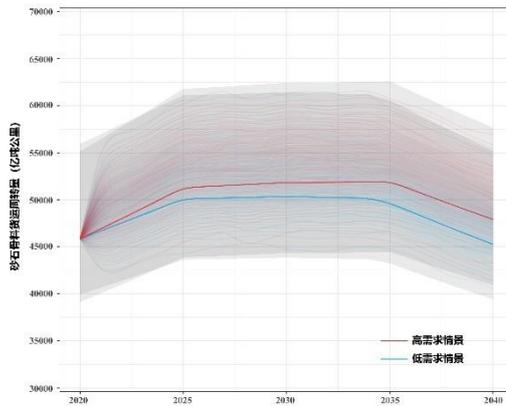
f) 石灰石



g) 铝材



h) 铝土矿



i) 砂石骨料

图 88 九类大宗商品货运周转量变化模拟

6.3 排放影响分析

货运是 CO₂ 与大气污染物的重点排放源，是协同推进减污降碳的重点领域。未来大宗商品货运需求变化以及运输结构调整将会对货运排放产生重要影响。根据不同货类周转量预测结果结合排放因子变化情况核算九类大宗商品 CO₂ 与 NO_x 变化趋势。

图 89 (a) 为公、铁、水单位货运周转量排放因子不变的情况下，高、低需求情景下九类大宗商品货运 CO₂ 排放变化。未来新能源车船替代、能效水平提升均会导致单位货运周转量排放因子下降，图 89 (b) 为结合公、铁、水单位货运周转量排放因子变化后九类大宗商品货运 CO₂ 排放变化。在 CO₂ 排放因子不变的情况下，仅考虑货运需求变化对排放量的影响，九类大宗商品货运 CO₂ 排放量在“十四五”期间小幅上升，2025 年以年均 2.3%~2.5% 的降幅持续降低，2040 年

下降至 2.0~2.2 亿吨,较 2020 年下降 28%~33%;结合 CO₂ 排放因子变化的影响,九类大宗商品货运 CO₂ 排放量在“十四五”期间保持在 2.9~3.0 亿吨,2025 年后以年均 3.9%~4.2%的降幅快速下降,2040 年下降至 1.5~1.7 亿吨,较 2020 年下降 45%~49%。公路货运对 CO₂ 排放的贡献率高于 70%,水运次之,铁路贡献率最低,降低运输需求是减少货运 CO₂ 排放量的首要措施。

在 NO_x 排放因子不变的情况下,仅考虑货运需求变化对排放量的影响,九类大宗商品货运 NO_x 排放量在 2025 年后以年均 2.2%~2.6%的降幅持续降低,2040 年下降至 194~217 万吨,较 2020 年下降 26%~34%;结合排放因子变化的影响,NO_x 排放量在 2025 年后以年均 5.9%~6.3%的降幅快速下降,2040 年下降至 86~97 万吨,较 2020 年下降 67%~71%。如图 90 (a) 所示,在不采取运输工具减排措施的情况下,保持车船 NO_x 排放因子不变,公路货车对于 NO_x 的排放贡献率在 60%~70%,实施运输工具 NO_x 减排措施,如图 90 (b) 所示,公路货车对于 NO_x 的排放贡献率将由 2020 年 70%逐渐下降至 2040 年 30%左右,货车 NO_x 减排效果明显,船舶 NO_x 减排难度较大。

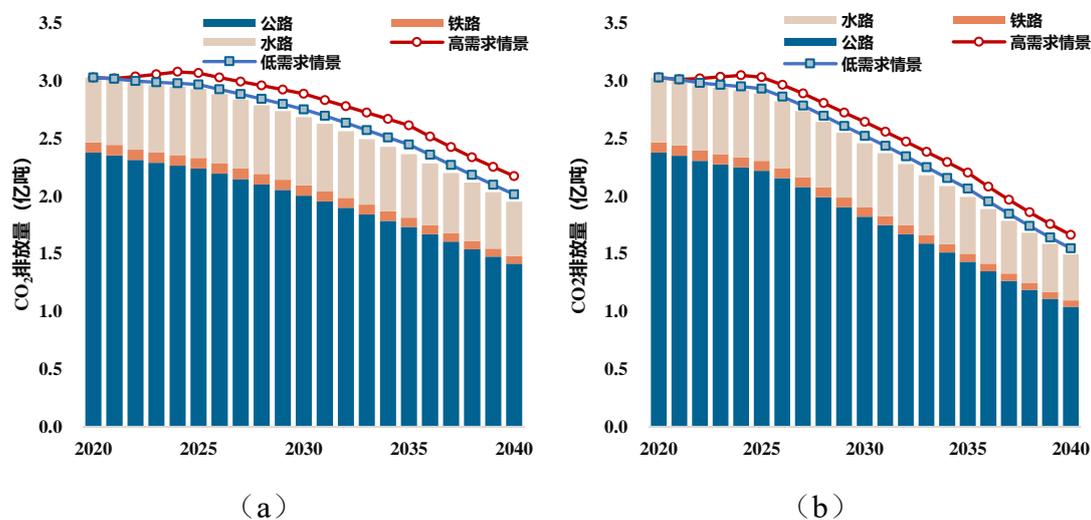


图 89 九类大宗商品货运 CO₂ 排放变化分析

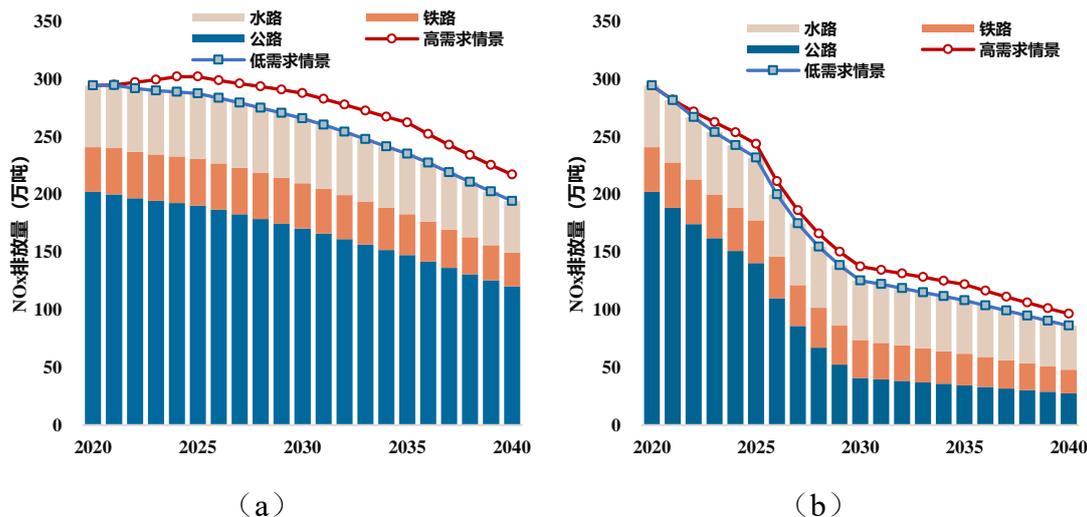


图 90 九类大宗商品货运 NO_x 排放变化分析

七、政策建议

(1) **重视重点行业与货运的关联性，从需求端降低货运排放。** 交通运输作为重要的服务性行业与上游重点行业发展关联密切。火电、钢铁、水泥、炼焦、铝冶炼等行业不仅化石燃料消耗量大，温室气体与大气污染物排放量高，也是货类需求繁多、货运需求量大、货运成本投入较高的重点行业。建议推进重点行业梯次有序达峰，减少降低对于大宗原材料、燃料运输需求，钢铁、水泥、炼焦行业应在“十四五”前期率先达峰，电解铝行业在“十四五”期间达峰，火电行业在“十五五”前期达峰，从需求端减少货运需求，降低货运排放。同时，继续落实完善工业企业环保分级管理政策，强化工业企业运输监管，进一步区分国六排放标准和新能源货车差异分级，规范重点行业 A、B 级企业车辆、门禁系统、电子台账管理。

(2) **大力发展循环经济，促进废钢废铝资源回收利用。** 促进废钢、废铝等再生资源循环利用不仅是降低行业原材料、燃料消耗，优化生产工艺流程，降低碳排放的有效措施，也是减少上下游货运需求与货运排放的有效途经。研究表明，全国废钢短流程炼钢比例提高 1%，直接降低铁矿石货运量 0.17~0.24 亿吨。当前中国再生资源回收企业普遍存在规模小、设备简陋、技术落后、分类分级体系不健全等问题，钢铁行业废钢资源短缺，铝冶炼行业废铝资源降级利用问题明显。建议健全资源循环利用体系，支持资源高效利用，实施废钢铁、废有色金属、废

塑料等再生资源回收利用行业规范管理。针对钢铁行业，加快建立完善废钢铁加工配送体系，构建有效促进废钢资源回收利用的政策引导机制，加大废钢资源回收利用力度。针对铝冶炼行业，加快废铝资源分类回收体系建设，提高现有废铝资源回收利用企业规范化水平，科学布局、因地制宜推动建设一批区域废铝资源回收预处理配送中心，在提升废铝回收率的同时，提高废铝保级利用水平，鼓励再生铝企业上下游联动布局，形成自身的再生铝回收生产全流程。

(3) 促进外贸转型升级，降低高能耗低附加值产品出口。 粗钢、水泥等大宗商品均为高能耗、高排放、高运输需求、低附加值的产品，盈利较低的同时造成严重的能源消耗与环境污染问题。建议进一步优化贸易结构，严格控制高耗能、低附加值产品出口，钢铁、水泥、焦炭、铝材等产品逐步以满足国内需求为主，不以出口为导向。研究限制钢坯（锭）、板材、棒材、线材等中低端钢材产品出口，出台鼓励再生钢铁料、钢坯（锭）、铁合金等钢铁初级产品进口等政策。逐步提高水泥、熟料进口量，降低水泥及熟料出口量。铝工业生产模式逐步由“资源输入型”向“产品输出型”转变，加大初级铝资源的进口和高级率资源的出口，氧化铝不追求自给自足，鼓励适量高品质氧化铝进口，提高科学技术转化为经济效益的能力。

(4) 优化交通货运结构，推进大宗货运公转铁公转水。 公路货运是当前中国首要货运方式，占比在 70%以上。前述分析可知，公路货车单位货运周转量的二氧化碳排放量大约是铁路内燃机列车的 6~7 倍、水运的 3~4 倍。中国铁路货运能力的不足尤其是煤炭等大宗商品货运能力的不足客观促使许多运输需求转移至公路运输，在增加能耗与排放的同时，引发了拥堵、超载、运输效率低、运输成本高、规模效应差等多方面问题。建议在“十三五”货物运输结构调整基础上，持续优化运输结构，推进大宗货物“公转铁”“公转水”，推进铁路专用线建设，2025 年沿海主要港口、大宗货物年运量 150 万吨以上的大型工矿企业、新建物流园区铁路专用线力争接入比例均达到 85%，具有铁路专用线的，大宗货物原则上由铁路运输。2025 年底火电、钢铁、石化等行业大宗货物通过铁路、新能源等清洁方式运输比例达到 70%以上，山西、陕西、内蒙古 90%以上的煤炭和焦炭外运由铁路和管道完成。到“十五五”末形成大宗货物中长途运输使用铁路、水路，

中短途货物运输使用管道或新能源车辆，城市货物运输主要采用新能源轻型物流车的局面。同时，完善与铁路货运相关的受理、仓储、装卸、配送等配套设施建设，及时调节铁路货运供给与物流市场需求变化的冲突，使铁路货运过程中的各点、线、面衔接更为紧密，合作更加融洽，以提高整体货运效率。

(5) 加强物流信息交互，推进建立智慧货运体系。加强信息互联共享，推进各种运输方式间以及交通运输与市场监管等部门间信息资源互联、共享。货运领域利用 RFID、定位追踪、无线传感、大数据、云计算、物联网等智慧物流技术，建立统一的物流信息与综合服务平台，实现运输信息共享，优化交通流的时空分布，打破区域间和运输方式间管理分割，加大信息整合力度，降低公路货运空驶概率，提升货车实载率，降低货车闲置时间，降低货运事故率，有效推进货物运输行业绿色化、智慧化发展，进而促进绿色交通运输体系的发展。与此同时，加强货运物流智慧监管和执法，综合利用遥感监测、远程排放管理终端等手段对货物运输车辆排放情况进行监管，有效、快速地识别超标排放行为，建立维修复检的闭环管理制度，督促超标车辆及时维修整改，加强日常维护和保养，确保在实际使用阶段达标排放，切实降低污染排放。构建便捷顺畅、经济高效、绿色集约、智能先进、安全可靠的现代化高质量国家综合立体交通网，加强现代物流体系建设，提升设施网络化、运输服务一体化和智能化水平，提升综合交通运输整体效率，从源头减少不合理运输。

参考文献

- [1] 中华人民共和国统计局. 中国统计年鉴 2021[M]. 中国统计出版社, 2021.
- [2] 中国民用航空局. 2020 年民航行业发展统计公报[R]. 2021.
- [3] 中华人民共和国生态环境部. 中国移动源环境管理年报(2021) [R].2021.
- [4] 生态环境部, 国家发展和改革委员会, 工业和信息化部, 住房和城乡建设部, 交通运输部, 农业农村部, 国家能源局. 减污降碳协同增效实施方案. 2022.
https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk03/202206/t20220617_985879.html
- [5] 严季. 经济结构变化对公路货物运输周转量变化的影响[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2001(04):429-433.
- [6] 刘小娟. 以经济结构性转型促高质量发展——经济结构性转型的国际经验及启示分析[J]. 西南金融, 2022(07):18-29.
- [7] 张宁. 基于经济结构变化对公路货物运输周转量变化的影响探索[J]. 中国物流与采购, 2022(03):116.
- [8] 周依帆. 国内成本增高后中国制造业“外迁”与“回流”的两难如何破解——兼评《发达国家制造业“外迁”与“回流”的动态及其对我国的启示》一书[J]. 现代工业经济和信息化, 2022,12(04):10-12.
- [9] 孟祺. 美国再工业化对中国的启示[J]. 现代经济探讨, 2012(09):79-83.
- [10] U.S. Department of Transportation. National Freight Strategic Plan. 2020.
<https://www.transportation.gov/freight/NFSP/fullreport>
- [11] 刘昭然. 美国《国家货运战略规划》解读分析[J]. 中国经贸导刊, 2020(20):21-23.
- [12] International Energy Agency (IEA). Greenhouse Gas Emissions from Energy. 2022.
<https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/co2-emissions-from-fuel-combustion>
- [13] Erica Bickford, Tracey Holloway, Alexandra Karambelas, Matt Johnston, Teresa Adams, Mark Janssen, Claus Moberg. Emissions and Air Quality Impacts of Truck-to-Rail Freight Modal Shifts in the Midwestern United States[J]. Environmental Science & Technology, 2014(48):446-454.
- [14] A.Kopin, S.Musselman, 闫红梅, 方红. 重型载货车运输整车标准:优化货运效率优势以满足美国温室气体排放标准[J]. 国外内燃机, 2017,49(05):16-22.
- [15] 潘晓滨. 美国交通与气候倡议项目(TCI-P)进展综述[J]. 资源节约与环保, 2022(01):143-145.
- [16] 燕艳. 美国交通减排的研究现状和发展趋势[J]. 环境与发展, 2018,30(02):3-4+7.
- [17] 秦兵. 日本的产业发展及对中国的启示[J]. 东北亚经济研究, 2022,6(05):59-74.
- [18] 孟国连. 发达国家综合运输发展经验探析[J]. 商业经济, 2013,(03):40-42+47.
- [19] 中共中央国务院. 国家综合立体交通网规划纲要[Z]. 2021.
http://www.gov.cn/gongbao/content/2021/content_5593440.htm
- [20] 向爱兵. 运输需求预测方法和模型比较研究[J]. 综合运输, 2010(01):15-19.
- [21] Ana Alises, José Manuel Vassallo. The Impact of the Structure of the Economy on the Evolution of Road Freight Transport: A Macro Analysis from an Input-output Approach, Transportation Research Procedia[J]. 2016(14),2870-2879.
- [22] 李名良. 铁路货运需求影响因素研究——以美国为例[J]. 综合运输, 2017,39(02):83-86.

- [23] 樊桦. 我国铁路货运需求影响因素及发展趋势[J]. 综合运输, 2018,40(02):12-17+22.
- [24] Xun Xu, Nicholas Chase, Tianduo Peng. Economic structural change and freight transport demand in China[J]. Energy Policy, 2021(158):112567.
- [25] Jillian Anable, Christian Brand, Martino Tran, Nick Eyre. Modelling transport energy demand: A socio-technical approach[J]. Energy Policy, 2012(41):125-138.
- [26] Winggun Wong, Huimin Niu, Luis Ferreira. A fuzzy method for predicting the demand for rail freight transportation[J]. Journal of Advanced Transportation, 2003,37(2).
- [27] 叶斌, 代晓琴, 陈朝海. 基于时间序列分析的货运周转量预测[J]. 四川理工学院学报(自然科学版), 2011,24(03):299-301.
- [28] Godfrey, GregoryA, Powell, WarrenB. Adaptive estimation of daily demands with complex calendar effects for freight transportation[J]. Transportation Research PartB: Methodological, 2000,(34):451-469.
- [29] 徐莹. 基于投入产出模型的重庆大宗商品货运量预测研究[D]. 重庆交通大学, 2015.
- [30] 钟山, 刘源张, 汪寿阳. 交通货运业瓶颈问题的投入产出分析[J]. 交通运输系统工程与信息, 2004(02):2-8+24.
- [31] 颜建新, 马洪生, 肖崇紫, 杨健荣. 基于投入产出法的道路货运需求预测研究[J]. 交通运输工程与信息学报, 2016,14(01):25-32.
- [32] 刘敬青. 基于投入产出法的货物运输需求预测方法研究[J]. 中国储运, 2008(09):120-122.
- [33] 闫莉, 张浩, 刘泽军, 康家瑋. 货运量与工业经济关联机制研究[J]. 物流技术, 2015,34(24):94-97+108.
- [34] 杨兆升, 黎春兰. 分行业货运需求预测方法[J]. 吉林工业大学学报, 1997(01):40-43.
- [35] 孟建军, 陈鹏芳, 李德仓, 胥如迅. 铁路货运量预测研究综述[J]. 铁道标准设计, 2022, 66(10): 18-26.
- [36] 江黎明, 吴瑞麟. 用灰色模型分行业对新建城镇进行货运需求预测[J]. 华中科技大学学报(城市科学版), 2003(01):65-67.
- [37] 于若冰. 基于灰色系统理论的新疆物流需求预测[J]. 物流工程与管理, 2011,33(005):37-38.
- [38] 张诚, 周湘峰. 基于灰色预测-马尔可夫链-定性分析的铁路货运量预测[J]. 铁道学报, 2007(05):15-21.
- [39] 赵闯, 刘凯, 李电生. 基于广义回归神经网络的货运量预测[J]. 铁道学报, 2004(01):12-15.
- [40] 胡波, 刘建民. 基于组合预测的 RBF 神经网络货运量预测方法研究[J]. 交通与计算机, 2006(04):34-36+40.
- [41] 顾秀来, 王春林, 付诗禄. 基于小波神经网络的货运量预测[J]. 后勤工程学院学报, 2013,29(06):85-90.
- [42] 王治. 基于遗传算法-支持向量机的铁路货运量预测[J]. 计算机仿真, 2010,27(12):320-322+348.
- [43] 张蕾, 孙德山, 张文政, 王玥. 基于灰色关联分析的支持向量机的铁路货运量预测研究[J]. 经济数学, 2018,35(02):58-61.
- [44] 交通运输部. 2019 年道路货物运输量专项调查公报 [R]. 2019. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202006/t20200630_3321334.html
- [45] 卿仔轩. 我国铝土矿生产、消费现状及产业发展趋势分析[J]. 中国金属通报,

- 2012(07):36-37.
- [46] 吴荣庆. 铝土矿现状和发展战略[J]. 中国金属通报, 2013(39):28-33.
- [47] 刘莹. 实施“公转铁”结构转型: 北京探索 3 种砂石骨料绿色运输模式[J]. 商用汽车, 2020(04):84-86.
- [48] 严刚, 郑逸璇, 王雪松, 李冰, 何捷, 邵朱强, 李永亮, 吴立新, 丁焰, 徐伟, 李新, 蔡博峰, 陈潇君, 宋晓晖, 王倩, 雷宇, 王金南. 基于重点行业/领域的我国碳排放达峰路径研究[J]. 环境科学研究, 2022,35(02):309-319.
- [49] 国务院. 2030 年前碳达峰行动方案[Z]. 2021.
http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content_5644984.htm.
- [50] 工业和信息化部 国家发展改革委 生态环境部. 工业领域碳达峰实施方案[Z]. 2022.
<http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-08/01/5703910/files/f7edf770241a404c9bc608c051f13b45.pdf>
- [51] 李晓易, 吴睿. 交通运输温室气体核算边界和测算方法研究[J/OL]. 气候变化研究进展: 2022: 1-10.
- [52] 刘然, 刘哲, 赵洁玉, 崔丹丹, 蒋浩. 国内外物流行业碳排放核算方法研究[J]. 交通节能与环保, 2022:1-12.
- [53] Haikun Wang, Lixin Fu, Jun Bi. CO₂ and pollutant emissions from passenger cars in China[J]. Energy Policy, 2011 (5):3005-3011.
- [54] Xiaowei Song, Yongpei Hao, Chen Zhang, Jiaoting Peng, Xiaodong Zhu. Vehicular emission trends in the Pan-Yangtze River Delta in China between 1999 and 2013[J]. Journal of Cleaner Production, 2016,137:1045-1054.
- [55] 黄志辉, 纪亮, 尹洁, 吕晨, 王军方, 尹航, 丁焰, 蔡博峰, 严刚. 中国道路交通二氧化碳排放达峰路径研究[J]. 环境科学研究, 2022,35(02):385-393.
- [56] 周叶, 黄荣欢, 唐恩斌. 基于 GPS+GIS+GSM 的城市道路交通碳排放量动态计算方法[J]. 南昌航空大学学报(社会科学版), 2016,18(03):35-41.
- [57] N. Kholod, M. Evans, E. Gusev, S. Yu, V. Malyshev, S. Tretyakova, A. Barinov. A methodology for calculating transport emissions in cities with limited traffic data: Case study of diesel particulates and black carbon emissions in Murmansk[J]. Science of the Total Environment, 2016,547:305-313.
- [58] YanxiaLi, ChenLv, NanYang, HaoLiu, ZhongliangLiu. Study of high temporal-spatial resolution green house gas emissions inventory for on-road vehicles based on traffic speed-flow model: A case of Beijing[J]. Journal of Cleaner Production, 2020,277,122419.
- [59] Hong Huo, Qiang Zhang, Kebin. He, Qidong Wang, ZhiLiang Yao, David G Streets. High-resolution vehicular emission inventory using a link-based method: a case study of light-duty vehicles in Beijing[J]. Environmental Science and Technology, 2009,43(7):2394-2399.
- [60] YongHong Liu, JinLing Ma, LiLi, XiaoFang Lin, WeiJia Xu, Hui Ding. A high temporal-spatial vehicle emission inventory based on detailed hourly traffic data in a medium-sized city of China[J]. Environmental Pollution, 2018,236:324-333.
- [61] 李利军, 姚国君. 京津冀公铁货运碳排放测算研究[J]. 铁道运输与经济, 2021,43(11):126-132.
- [62] 王勇, 李红昌, 郭雪萌, 于克美. 我国铁路运营二氧化碳排放影响因素研究[J]. 铁道学报, 2021,43(06):189-195.

- [63] 中国民用航空局. 2021 年民航行业发展统计公报 [R]. 2022. <http://att.caacnews.com.cn/sjfw/minhangju2/202205/W020220519407828823495.pdf>.
- [64] 吕晨, 刘浩, 徐少东, 杨楠, 杜梦冰, 蔡博峰. 基于飞行阶段的精细化航空二氧化碳排放因子研究[J]. 气候变化研究进展, 2022,18(02):196-204.
- [65] 吕晨, 张哲, 陈徐梅, 马冬, 蔡博峰. 中国分省道路交通二氧化碳排放因子[J]. 中国环境科学, 2021,41(07):3122-3130.
- [66] IPCC. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventory[R]. 2019.
- [67] Jing Cheng, Dan Tong, Qiang Zhang, Yang Liu, Yu Lei, Gang Yan, Liu Yan, Sha Yu, Ryna, Yiyun Cui, Leon Clarke, Guannan Geng, Bo Zheng, Xiaoye Zhang, Steven J Davis, Kebin He. Pathways of China's PM2.5 airquality 2015–2060 in the context of carbon neutrality[J]. National Science Review, 2021,(8)12.
- [68] 中国电力企业联合会. 中国电力统计年鉴 2021[J]. 中国统计出版社, 2021.
- [69] 国家发展改革委国家能源局. 电力发展“十三五”规划(2016-2020 年) [R]. 2016.
- [70] 中电联电力统计与数据中心. 2020-2021 年度全国电力供需形势分析预测报告[R]. 2021.
- [71] 张成龙, 谭显东, 翁玉艳, 单葆国. “十三五”以来电力消费增长原因分析及中长期展望[J]. 中国电力, 2019,52(08):149-156.
- [72] 邢奕, 崔永康, 田京雷, 苏伟, 王伟丽, 张熙, 刘义, 赵秀娟. 钢铁行业低碳技术应用现状与展望[J]. 工程科学学报, 2022,44(04):801-811.
- [73] 程威. 中国电炉市场与长材连铸连轧[J]. 冶金经济与管理, 2020(01):22-24.
- [74] 刘全义, 张贵杰, 王凯, 夏亮亮. 以废钢为原料的电炉短流程炼钢工艺的研究进展 [C]. 互联网+与钢铁工业智能制造高峰论坛论文集, 2016:188-191.
- [75] 汪旭颖, 李冰, 吕晨, 管志杰, 蔡博峰, 雷宇, 严刚. 中国钢铁行业二氧化碳排放达峰路径研究[J]. 环境科学研究, 2022,35(02):339-346.
- [76] 田欣, 罗子凡, 王化璇, 高寒, 熊翌灵. 中国钢铁足迹的脱钩趋势与演变特征研究 [J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2021,57(05):725-732.
- [77] 李新鹏. 我国进口铁矿石运输物流系统研究[J]. 科技经济市场, 2017(05):23-24+35.
- [78] 生态环境部, 国家发展和改革委员会, 工业和信息化部, 财政部. 交通运输部关于推进实施钢铁行业超低排放的意见. 2019.
- [79] 贺晋瑜, 何捷, 王郁涛, 范永斌, 石红卫, 蔡博峰, 严刚. 中国水泥行业二氧化碳排放达峰路径研究[J]. 环境科学研究, 2022,35(02):347-355.
- [80] 李淑珍, 闫浩春, 刘韬, 李程. 水泥行业碳达峰形势分析和建议[J]. 中国建材科技, 2022,31(01):79-82.
- [81] 王新频, 宋教利, 李光鑫. 我国水泥工业碳达峰与碳中和前景展望[J]. 水泥, 2021(08):1-9.
- [82] 刘作毅. 中国熟料产能分析[J]. 中国建材, 2021(05):117-127.
- [83] Tianming Gao, Lei Shen, Jianan Zhao, Limao Wang, Litao Liu, Tao Dai. Regional disparity in clinker emission factor and their potential reduction in China.[J].Environmental science and pollution research international, 2021,28(45):64220-64233.
- [84] Shiming Liao, Dong Wang, Changyou Xia, JieTang. China's provincial process CO2 emissions from cement production during 1993–2019[J]. scientific data, 2022,9:165.
- [85] 张超. 中国铝物质流综合分析[D]. 东北大学, 2017.

- [86] 李相白, 李建春. 碳足迹下云南绿色铝产业发展研究[J]. 云南科技管理, 2022,35(02):10-12.
- [87] 聂凤娜. 氧化铝低碳生产评价指标体系研究[D]. 北方工业大学, 2013.
- [88] 周飞霓. 浅谈我国再生铝产业现状及发展对策[J]. 河北企业, 2022(05):48-50.
- [89] 朱则刚. 细论车用铝材发展未来[J]. 资源再生, 2012(05):44-46.
- [90] 陈迪, 李成栋, 赵晓冬. 铝合金在电力传输领域的研究及应用[J]. 材料导报, 2013,27(15):145-148.
- [91] 裴雯. 我国金属铝材的应用市场及消费预测[J]. 世界有色金属, 2019(12):269+271.
- [92] 杨一兵, 莫欣达. 铝材消费结构变化推动产品结构调整[J]. 中国金属通报, 2013(32):36-37.
- [93] 王丽娟, 邵朱强, 熊慧, 李丹, 杨富强, 严刚. 中国铝冶炼行业二氧化碳排放达峰路径研究[J]. 环境科学研究, 2022,35(02):377-384.
- [94] 王东方, 陈伟强. 中国铝土矿贸易与供应安全研究[J]. 资源科学, 2018,40(03):498-506.
- [95] 李晓伟. 冶金级氧化铝市场分析展望[J]. 现代商贸工业, 2020,41(33):11-12.
- [96] 袁闪闪, 陈潇君, 杜艳春, 曲世琳, 胡楚梅, 金玲, 徐伟, 严刚. 中国建筑领域 CO₂ 排放达峰路径研究[J]. 环境科学研究, 2022,35(02):394-404.
- [97] 国家发展改革委国家能源局. 煤炭工业发展“十三五”规划[R]. 2016.
- [98] 国务院. 推进运输结构调整三年行动计划(2018—2020年)[Z]. 2018. http://www.gov.cn/zhengce/content/2018-10/09/content_5328817.htm
- [99] 中国铁路总公司. 2018-2020年货运增量行动方案[Z]. 2018.
- [100] 向思桐. 基于汽运经济半径分析的铁路煤炭运输路径选择研究[D]. 中国铁道科学研究院, 2018.
- [101] 西南交通大学交通运输与物流学院. 货运行业初步研究报告[R]. 2020.
- [102] 高金. 钢铁行业低碳物流的发展方向浅析[J]. 冶金经济与管理, 2021(05):23-25.
- [103] 金星. 建筑砂石骨料应用现状与矿砂废渣利用[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2018,38(09):96-97.
- [104] 徐匡迪, 洪新. 电炉短流程回顾和发展中的若干问题[J]. 中国冶金, 2005(07):1-8.
- [105] 陈超, 胡聃, 文秋霞, 张大康. 中国水泥生产的物质消耗和环境排放分析[J]. 安徽农业科学, 2007(28):8986-8989.
- [106] 李海涛. 新型干法水泥生产技术与设备[M]. 北京:化学工业出版社, 2013.
- [107] 李鹏鹏, 任强强, 吕清刚, 陈锐. 面向双碳的低碳水泥原料/燃料替代技术综述[J]. 洁净煤技术, 2022,28(08):35-42.
- [108] 吴建业, 李昊. 我国铝工业进出口贸易研究[J]. 中国矿业, 2011,20(S1):32-36.
- [109] 杨纪倩. 我国铝土矿与氧化铝生产的现状与探讨[J]. 世界有色金属, 2006(11):17-19.
- [110] 钟明然, 左清富. 我国建筑砂石骨料供求现状分析及管理对策研究[J]. 桂林航天工业学院学报, 2021,26(04):504-509.
- [111] 胡幼奕. 砂石骨料工业的昨天、今天和明天[J]. 混凝土世界, 2016(02):56-61.
- [112] B.W. Ang. The LMDI approach to decomposition analysis: a practical guide[J]. Energy Policy. 2005,33,867-871.
- [113] 沈满洪, 池熊伟. 中国交通部门碳排放增长的驱动因素分析[J]. 江淮论坛, 2012(01):31-38+195.

- [114] 卢升荣, 蒋惠园, 刘瑶. 交通运输业 CO₂ 排放区域差异及影响因素[J]. 交通运输系统工程与信息, 2017,17(01):32-39.
- [115] 龚奂彰, 黄秀玉. 钢铁行业碳减排技术应用与展望[J]. 中国冶金, 2021,31(09):53-58.
- [116] 周天时. 我国电炉短流程炼钢发展趋势浅析[J]. 中国钢铁业, 2020(08):55-58.
- [117] 邢奕, 崔永康, 田京雷, 苏伟, 王伟丽, 张熙, 刘义, 赵秀娟. 钢铁行业碳中和低碳技术路径探索[J]. 工程科学学报, 2021:1-12.
- [118] M.Abdul Quader, Shamsuddin Ahmed, Raja Ariffin Raja Ghazilla, Shameem Ahmed, Mahidzal Dahari. A comprehensive review on energy efficient CO₂ breakthrough technologies for sustainable green iron and steel manufacturing[J].Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2015(50):594-614.
- [119] 王笑兵. 浅议如何提高外购铁精矿质量[J]. 包钢科技, 2001(S1):127-129+132.
- [120] 国务院. 国务院关于化解产能严重过剩矛盾的指导意见[Z]. 2013. http://www.gov.cn/zwggk/2013-10/15/content_2507143.htm
- [121] 高智. 水泥行业产能过剩原因分析及对策[J]. 中国市场, 2014(07):87-90.
- [122] 孔祥忠. 孔祥忠: 灾后高标号水泥市场看好[J]. 中国水泥, 2008(06):20-21.
- [123] 刘淑娟, 赵慧林. 我国水泥/熟料进口趋势预测及相关影响分析[J]. 水泥, 2021(05):1-3.
- [124] Kumar G S, Deoliya R. Recycled cement and recycled fine aggregates as alternative resources of raw materials for sustainable cellular light weight flowable material[J]. Construction and Building Materials, 2022,326:126878.
- [125] 陶从喜, 王明, 沈序辉, 梁乾, 何明海, 蒋文伟, 李维. 水泥工业原料替代技术减少 CO₂ 排放实践[J]. 中国水泥, 2022(02):69-72.
- [126] Thomas, Blessen Skariah, Yang Jian, Mo, Kim Hung, Abdalla Jamal A, Hawileh Rami A, Ariyachandra, Erandi. Biomass ashes from agricultural wastes as supplementary cementitious materials or aggregate replacement in cement/geopolymer concrete: A comprehensive review [J]. Journal of Building Engineering, 2021,40.
- [127] 中国再生铝行业发展概况、市场供求情况、市场容量及影响行业发展的主要因素分析[J]. 资源再生, 2020,(10):43-47.
- [128] 国家发展改革委. “十四五”现代能源体系规划[Z]. 2022. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-03/23/content_5680759.htm.
- [129] 工业和信息化部, 国家发展和改革委员会, 生态环境部. 关于促进钢铁工业高质量发展的指导意见[Z]. 2022. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-02/08/content_5672513.htm.
- [130] 中华人民共和国中央人民政府. 加快推进天然气利用的意见[Z]. 2017. http://www.gov.cn/xinwen/2017-07/04/content_5207958.htm
- [131] 财政部税务总局. 关于取消部分钢铁产品出口退税的公告[EB/OL]. 2021. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-04/28/content_5603588.htm
- [132] 国务院关税税则委员会. 国务院关税税则委员会关于进一步调整钢铁产品出口关税的公告[EB/OL]. 2021. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-07/29/content_5628265.htm
- [133] 中国建筑材料联合会. 2021 年中国建材行业经济运行报告[R]. 2021. <http://lwzb.stats.gov.cn/pub/lwzb/tzgg/202205/W020220511403031322900.pdf>
- [134] 国家发展改革委. “十四五”循环经济发展规划[EB/OL]. 2021.

<http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-07/07/5623077/files/34f0a690e98643119774252f4f671720.pdf>

- [135] Intergovernmental Panel on Climate Change. Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories[EB/OL]. 2022. <https://www.ipcc.ch/publication/good-practice-guidance-and-uncertainty-management-in-national-greenhouse-gas-inventories/>
- [136] 赵国锋, 高玉龙, 王仲. 基于决策树与蒙特卡洛仿真的交通碳排放分析方法[J]. 公路, 2015,60(08):191-195.