

全球产业链与能源供应链重构背景下我国煤炭行业发展策略研究

康红普¹, 谢和平², 任世华^{3*}, 陈佩佩¹, 焦小淼³, 郑德志³, 张亚宁³, 陈茜⁴, 秦容军⁵

(1. 中国煤炭科工集团有限公司, 北京 100013; 2. 深圳大学深地科学与绿色能源研究院, 广东深圳 518060;
3. 煤炭科学研究总院有限公司, 北京 100013; 4. 煤炭工业设计研究院有限公司, 北京 100011;
5. 中国煤炭经济研究会, 北京 102300)

摘要: 面对全球产业链与能源供应链 (“双链”) 加速重构、我国能源供应安全变数明显增长的新形势, 充分发挥煤炭的兜底保障作用成为必然选择。本文在系统分析 “双链” 加速重构呈现特征的基础上, 研判了对我国能源领域四方面的影响: 能源需求结构波动加大, 局部生产能力受限, 进口风险提升、低碳转型压力增大。构建了煤炭需求波动预测模型, 测算了煤炭为化石能源进口兜底、为可再生能源出力波动兜底、为能源消费超预期增长兜底等保障要求下煤炭产量需求的波动幅度, 即 2025 年煤炭产量需求波动为 $\pm 14.1\%$ 、2030 年为 $\pm 16.5\%$ 、2035 年为 $\pm 18.2\%$ 。针对性提出了产业链和供应链 “强链、补链、延链”, 构建煤炭技术创新链的发展路径, 以及煤矿智能化建设、煤炭绿色开发与节能减排、煤炭清洁转化、煤矿区碳封存和碳利用技术研发、煤炭与新能源协同发展等重点任务。加大煤炭资源精细勘查力度, 强化煤炭储备和应急调运能力建设, 提高煤炭柔性供给水平, 增强煤制油气兜底保障能力, 完善煤炭产业发展政策, 以此推动煤炭行业中长期高质量发展。

关键词: 煤炭行业; 全球产业链; 能源供应链; 能源安全; 能源供需

中图分类号: F426.21 文献标识码: A

Development Strategy of China's Coal Industry under the Reconstruction of Global Industrial Chain and Energy Supply Chain

Kang Hongpu¹, Xie Heping², Ren Shihua^{3*}, Chen Peipei¹, Jiao Xiaomiao³, Zheng Dezhi³, Zhang Yaning³, Chen Qian⁴, Qin Rongjun⁵

(1. China Coal Technology and Engineering Group, Beijing 100013, China; 2. Institute of Deep Earth Sciences and Green Energy, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong, China; 3. China Coal Research Institute Co., Ltd., Beijing 100013, China; 4. CCTEG Coal Industry Planning Institute, Beijing 100011, China;
5. China Coal Economic Research Association, Beijing 102300, China)

Abstract: As the reconstruction of global industrial chain and energy supply chain accelerates and variables in China's energy supply

收稿日期: 2022-06-28; 修回日期: 2022-08-16

通讯作者: *任世华, 煤炭科学研究总院有限公司研究员, 研究方向为煤炭相关技术经济评价、能源战略; E-mail: ren@cct.org.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目 “煤炭工业数字化发展战略研究” (2022-XZ-28), “全球产业链和能源供应链重构对我国煤炭行业影响及对策研究” (2021-XY-25)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

security increase, it becomes inevitable for China to maximize the guarantee function of coal. Considering the characteristics of the accelerated reconstruction of the two chains, this study analyzes the impacts of the reconstruction on China's energy sector: large fluctuation of energy demand structure, restricted local production capacity, increased import risks, and increased pressure on low-carbon transition. A fluctuation prediction model is established to predict the fluctuation range of coal demand considering these scenarios: fluctuation of fossil energy imports, output fluctuation of renewable energies, and consistent growth of energy consumption. The results indicate that coal demand will fluctuate by $\pm 14.1\%$ in 2025, $\pm 16.5\%$ in 2030, and $\pm 18.2\%$ in 2035, respectively. Therefore, we propose that a coal technology innovation chain should be constructed by extending and improving the coal industrial and supply chains. Moreover, future key tasks should include intelligent construction of coal mines, green development and clean transformation of coal, research and development of carbon sequestration and utilization technology in coal mine areas, and collaborative development of coal and new energies. To promote the long-term high-quality development of the coal industry in China, it is necessary to encourage the fine exploration of coal resources, strengthen the construction of coal reserves and emergency transportation capacities, improve the flexible supply of coal, enhance the support capacity for coal-to-oil and coal-to-gas production, and formulate support policies for coal industry development.

Keywords: coal industry; global industrial chain; energy supply chain; energy security; energy supply and demand

一、前言

近年来,全球产业链与能源供应链(“双链”)在组织架构、地理布局等方面存在重构压力,区域化趋势凸显;叠加新型冠状病毒肺炎(COVID-19)疫情的持续影响,“双链”的断链风险加大。“双链”加速重构成为重要议题[1~4]。面对百年未有之大变局、COVID-19疫情反复,全球产业链朝着更加多元、更具韧性的方向发展,呈现区域化、分散化、本土化的特征[5,6]。在国际能源市场博弈加剧、俄乌冲突持续的背景下,全球能源供应链重构风险、油气贸易安全风险有所上升[7]。我国油气资源有限且对外依存度居高不下,可再生能源尚处于形成稳定供应能力的成长期,能源安全问题较为严峻[8,9]。

在全球产业链加速重构的态势下,研究我国制造业的面临影响[10]及比较优势[11]、提出我国产业链应对举措[12~14]也显迫切。面对全球能源供应格局(供应链)的加速重构,基于我国能源安全稳定供应呈现的新形势、新特征、新问题、新任务[15],提出了增强能源安全水平、加强国际能源合作、完善国内能源储备、提升能源安全韧性等发展策略[16~18]。同时,在“双链”加速重构的背景下,把握我国能源需求和生产结构的新变化,探讨煤炭行业应对新形势、新要求的对策措施,进而推动煤炭绿色低碳转型、提高煤炭供应韧性、全面提升产业链和供应链的稳定性,有助于国家能源安全和高质量发展。

依据我国所处的经济社会发展阶段、能源资源禀赋特征,煤炭依然是我国的主体能源,发挥着推

动经济社会发展、保障能源安全的“压舱石”“稳定器”作用[19]。值得指出的是,“双链”加速重构对我国煤炭产业链、供应链的影响研究,尚未获得行业管理、学术研究层面的足够重视[20];我国煤炭行业应对全球产业链加速重构[21]、COVID-19疫情[22]、突发事件应急供给[23]等研究较为深入,而“双链”加速重构对我国煤炭行业的影响分析以及进一步的应对策略研究有待开展。针对于此,本文在梳理“双链”加速重构呈现的特征及对能源行业影响的基础上,构建“三重”兜底煤炭需求波动测算模型,分析煤炭产量需求的波动幅度;提出“双链”加速重构背景下煤炭行业的总体要求和路径,以期对煤炭行业应对“双链”加速重构提供技术和管理方面的基础参考。

二、“双链”重构对我国能源供需的影响

(一) 全球产业链加速重构的影响

我国是全球产业链上的重要一环。目前,劳动力等要素成本增加、本土企业国际竞争力增强、中美贸易摩擦等,成为我国产业链部分外迁、全球产业链加速重构的重要原因[24],主要呈现以下特征:纺织业、服装业等低附加值产业由我国部分外迁东南亚地区[25],电子产业、零部件产品制造业由我国部分向东盟转移[26],美国、欧洲、日本、韩国等发达国家和地区的制造业、医药产业等部分回归本土[27]。然而,COVID-19疫情和世界碳中和潮流叠加,受此影响的全球产业链重构进程,不确定性有所增加[28]。我国尽管市场规模大、劳动力供给具有优势、产业体系完备、基础设施条件良

好 [29], 但也不可避免地受到全球产业链加速重构的影响。例如, 跨国公司采取“中国+1”发展布局、制造业国际竞争加剧、发达国家先进制造业回流、区域化联盟加速构建等因素, 都使得我国的外部需求不再稳定可靠, “以外促内”的发展方式将难以为继 [10]。面对趋于复杂的国际国内发展环境、不断增加的风险挑战, 我国提出了“加快形成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”的应对策略 [30]。

全球产业链加速重构, 必然影响我国在全球产业链中的地位 and 作用, 进而波及我国制造业的转型升级, 导致电力、钢铁、建材、化工等高耗能行业的产品需求及发展规模的不确定性增大, 也将加剧能源需求的不确定性; 能源装备制造制造业高端技术、关键矿产资源等的进口受限, 也将进一步影响我国的能源安全稳定供应 (见图 1)。

(二) 全球能源供应链加速重构的影响

全球能源供应格局受资源禀赋、科技革命、国家竞争、地缘政治、碳中和、COVID-19 疫情等因素的影响 [31], 正在从资源禀赋型转向技术驱动型。新能源技术快速发展, 对传统化石能源的替代比例逐步提高 [32], 如页岩油气开采技术加速了油气储量和产量的增长, 甚至改变了全球能源供应格局 [33]。俄乌冲突对全球能源供需市场的冲击和影响, 随着一些国家加大对俄罗斯的经济制裁而增强 [34], 短期内推动了能源价格上涨, 特别是油气价格将呈现高位震荡态势; 在中期将拖累全

球经济复苏, 影响能源供需结构, 增加国际能源合作及贸易的不确定性, 延缓全球能源转型的发展进程 [35]; 在远期将推动全球能源格局加快趋势性重构 [36]。世界范围内 COVID-19 疫情的存在、碳中和愿景、地缘政治冲突等, 将加速全球能源结构调整, 推动全球能源供应格局向天然气和新能源为主体的低碳能源演进 [37,38]。

近年来, 全球油气供应格局趋向西移, 石油供应呈现多个中心, 天然气供应格局加速重塑; 油气勘探开发投资下降, 供需矛盾有所加剧, 供应价格波动或呈常态 [39,40]。在我国能源供应进口依赖性强的基本态势下, 全球能源供应链加速重构更是增加了我国能源供应链的不稳定性, 导致能源安全稳定供应的风险加剧 [41]。俄乌冲突短期内有利于稳定我国能源供应及价格, 但中长期不利于能源进口多样化; 俄罗斯能源贸易受外部制裁趋严, 中俄能源贸易可能面临一定的风险。此外, 全产业链低碳转型加速、新能源装机快速发展, 增大了我国能源安全稳定供应的压力 [42] (见图 2)。

(三) “双链”加速重构的影响

1. 能源需求波动加大

我国 COVID-19 疫情防控成效显著, 相对早地恢复了生产, 在一定程度上改变了产业链转移的方向和重构的速度 [43]。对外贸易快速增长, 货物进出口规模达到新高, 对原材料、能源的需求持续增长, 带来了电力、钢铁、建材、化工等行业的能源需求波动。例如, 2021 年我国出口总额同比增长

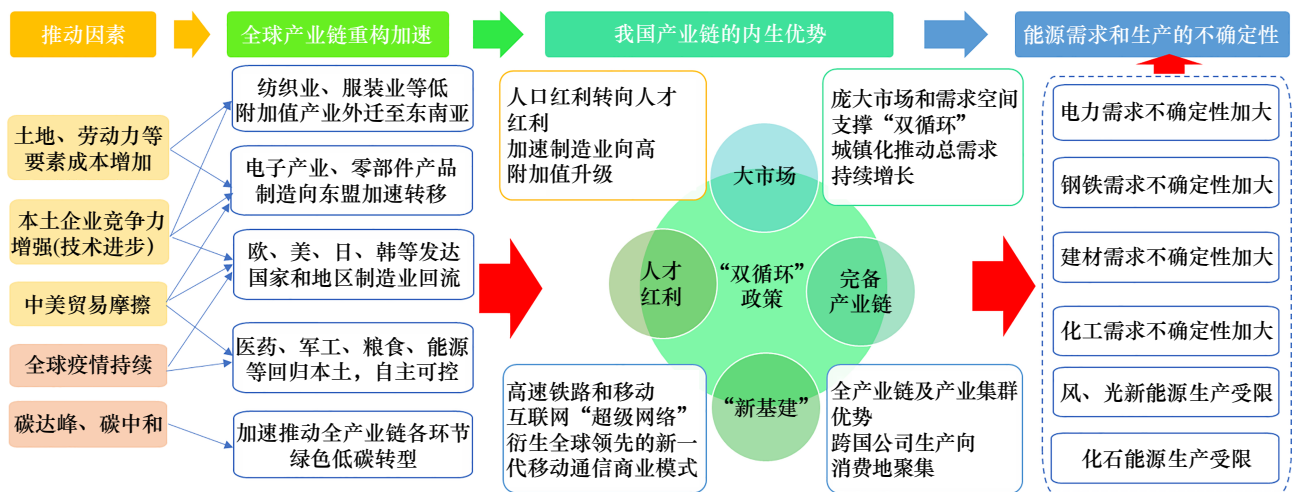


图 1 全球产业链加快重构影响我国能源需求和生产的逻辑框架

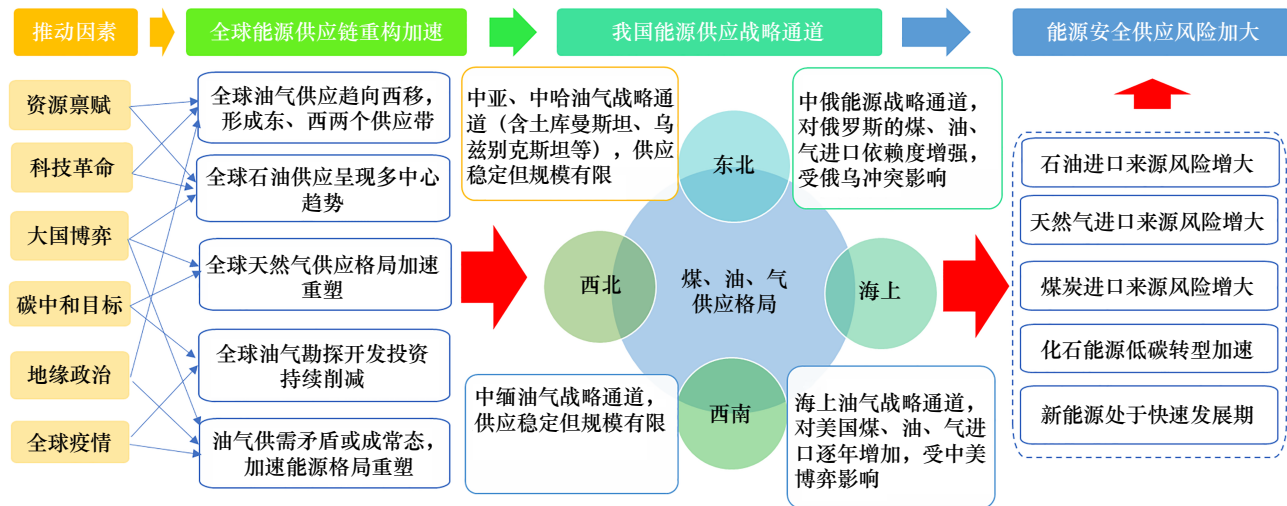


图2 全球能源供应链重构影响我国能源供应的逻辑框架

21.2%，由此带动全国工业用电量同比增加9.1%。一些跨国企业的生产制造依然朝着产业链完整区域集聚，倾向于生产地向消费地转移，由此缩短产业链和供应链。例如，特斯拉汽车公司依托我国成熟高效的零部件供应链体系，实现了大量零部件在国内生产、组装及供应，也就带动了零部件生产规模及用能需求的增长。

2. 能源局部生产能力受限

能源装备制造业的技术进步是能源产业发展的基础保障。在“双链”重构背景下，我国能源装备制造的部分“卡脖子”技术、一些关键矿产资源进口受限，直接制约了能源的生产和供应能力。2021年，我国工业机器人产量增长45%、芯片产能增长33%，但芯片国产化程度依然不高，高端技术“卡脖子”显现未能缓解。工业软件也是制造业的重要基础，我国部分制造业生产活动所需工业软件的进口依赖度超过80%，制约了能源装备制造业的高端智能化转型升级，影响了传统化石能源的智能高效生产。2021年，我国风电、光伏发电新增装机容量约为 1.01×10^8 kW，而锂、钴、镍、铅等关键矿产资源相对贫乏，成为新能源设备制造规模受限的重要因素[44]。

3. 能源进口风险增大

我国能源进口面临的国际形势出现了新的重大变化，不确定性和风险点呈增加态势[45]。近年来，我国通过中俄（东北）油气通道、海上油气通道，增加了自俄罗斯、美国的石油及天然气进口。2021年，我国从俄罗斯进口的石油、煤炭、天然气占

各自总进口量的比例分别为17%、17%、15% [46]，俄罗斯已成为我国第二大石油供应国、第三大天然气供应国。然而，俄乌冲突仍在持续，不排除国际能源博弈、地缘政治冲突再次升温的可能性，对我国能源进口的潜在影响可能加大。2019年我国将从美国进口液化天然气的关税从25%降至10%，相应进口量呈现快速增长趋势，2021年美国成为我国第二大液化天然气来源国。然而，中美关系因竞争加剧而淡化了战略合作，相应的能源贸易面临压力，可能导致我国油气进口风险增大。

我国煤炭进口主要来源于印度尼西亚、澳大利亚、俄罗斯。2020年起，来自澳大利亚的煤炭进口减少，相应增加了来自美国、加拿大的煤炭进口。2022年1月，印度尼西亚颁布了煤炭出口禁令，影响我国当月煤炭进口量的60%、化石能源进口量的14.5%。整体来看，我国煤炭进口的不确定性有所增加。

4. 能源领域低碳转型压力加大

碳中和愿景已成为全球共识，许多国家出台了法规和政策，积极开展碳中和行动；新能源领域继续成为发展热点，科技研发投入不断增长。全球能源正在加速转向低碳化、无碳化，能源绿色低碳转型明显加速，2035年全球可再生能源发电占比将达40% [47]。各国根据自身可再生能源资源禀赋特点，推动风电、光伏发电、水电、生物质能等低碳能源的发展。我国以煤为主的能源供应结构，面临前所未有的低碳转型压力。

三、能源供需波动对我国煤炭兜底保障的要求

(一) 需求波动模型

在“双链”加速重构背景下，为了合理评估能源供需波动对我国煤炭兜底保障的要求，需要采用相应的分析模型。本研究构建了包括能源消费及结构预测模块、能源波动模块、煤炭波动模块在内的煤炭需求波动模型（见图3）。① 能源消费及结构预测模块。以2020年为基准年，考虑碳中和目标下非化石能源消费结构的政策要求 [48]，采用能源消费弹性系数法、分能源增量贡献值法情景分析法，对国内生产总值（GDP）、能源结构进行分阶段预测（2025—2060年） [49,50]。② 能源波动模块。采用情景分析法设计不同情景，综合考虑以下因素对我国能源需求波动的影响：我国能源消费进入平台期，能源需求波动频率及幅度加大，国际化石能源供应格局与地缘政治不稳，化石能源进口风险加大，新能源不稳定性导致非化石能源供应的不确定性增大。③ 煤炭兜底模块。国内煤炭供应保持“三重”兜底能力：为能源消费超预期增长兜底（经济超预期增长带来的能源需求超预期增长），为化石能源进口波动兜底，为可再生能源出力波动兜底。针对“双链”重构背景，考虑我国能源消费结构变

化、储能技术进展，设计煤炭和储能承担“三重”兜底保障的多类情景。

(二) 模型参数设置

合理设置模型参数，基于模型分析数据来推导结论，将更为科学地指导生产实际。能源消费（需求）总量及结构预测采用的参数（见表1）条件为：立足我国能源资源禀赋，针对碳中和目标，假设煤炭进口量与需求量的比例保持2020年7.8%的水平；油气生产能力与2020年相当，即石油生产量约为 2.8×10^8 tce/a，天然气生产量约为 2.4×10^8 tce/a。

以历史能源消费变化为依据，研判能源需求波动的变化。能源波动的假设条件为：参考美国能源消费平台期的能源消费总量波动比例（-4.2%~5.8%） [51]，对未来我国能源需求波动比例按 $\pm 5\%$ 取值；依据近5年来我国化石能源进口波动幅度变化的历史数据，对我国化石能源（煤炭、石油、天然气）进口量波动按 $\pm 10\%$ 取值；对照2021年欧盟、巴西等国家和地区可再生能源受气候变化影响的出力波动同比超过20%的实际情况 [52]，对我国非化石能源出力波动按 $\pm 20\%$ 取值。

煤炭兜底假设条件为：考虑煤炭在我国能源消费结构中占比持续降低、可再生能源和储能技术快速发展的趋势，对于煤炭“三重”兜底的比例系

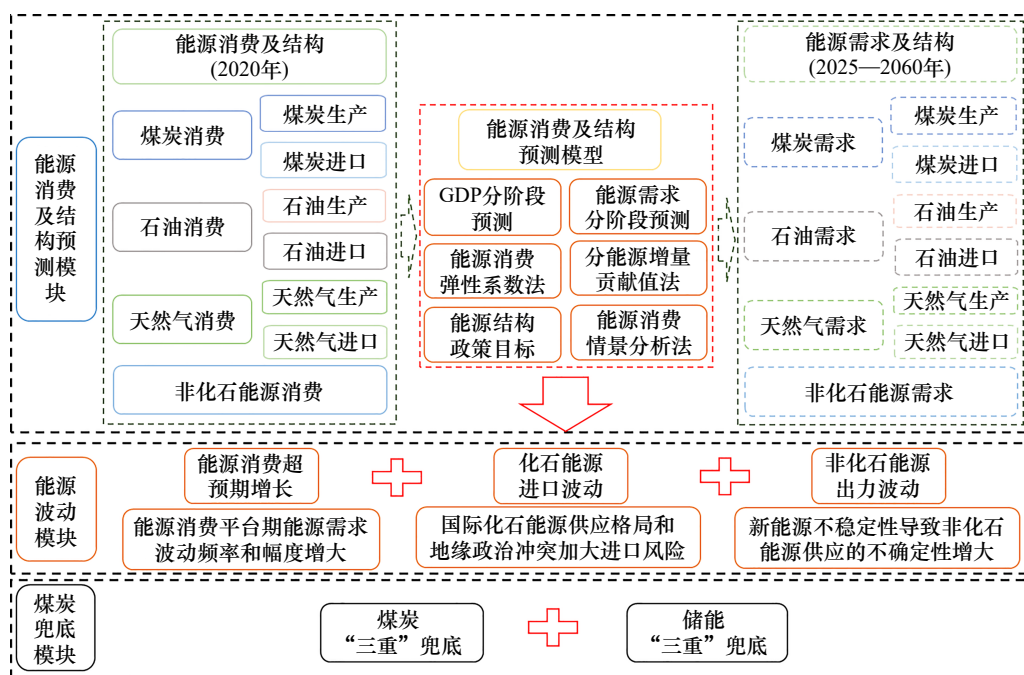


图3 煤炭需求波动模型示意图

表1 碳中和目标下我国能源消费及结构预测

时间/年	能源需求总量/ $\times 10^8$ tce	煤炭			石油			天然气			非化石能源	
		消费结构占比/%	需求量/ $\times 10^8$ tce	进口量/ $\times 10^8$ tce	消费结构占比/%	需求量/ $\times 10^8$ tce	进口量/ $\times 10^8$ tce	消费结构占比/%	需求量/ $\times 10^8$ tce	进口量/ $\times 10^8$ tce	消费结构占比/%	需求量/ $\times 10^8$ tce
2020	49.8	56.8	28.3	2.2	19.1	9.5	6.7	8.4	4.2	1.8	15.7	7.8
2025	55.0	52.0	28.6	2.2	18.9	10.4	7.6	9.1	5.0	2.6	20.0	11.0
2030	58.5	45.0	26.3	2.0	16.1	9.4	6.6	13.8	8.1	5.7	25.0	14.6
2035	60.0	40.0	24.0	1.8	15.0	9.0	6.2	15.0	9.0	6.6	30.0	18.0
2050	63.3	22.0	13.9	1.1	8.1	5.1	2.3	9.8	6.2	3.8	60.0	38.0
2060	63.0	10.0	6.3	0.5	4.0	2.5	0	6.0	3.8	1.4	80.0	50.4

数，假设2025年、2030年、2035年、2050年、2060年分别为60%、55%、50%、40%、30%，据此测算煤炭产量需求波动。

（三）需求波动结果

“双链”加速重构加大了能源需求总量、化石能源进口量、可再生能源出力等的波动[18,53]。2021年，我国能源消费总量为 5.24×10^9 tce（同比增长5.2%），增速超过预期，其中原煤产量为 4.13×10^9 t（同比增长5.7%），原煤进口量为 3.2×10^8 t（同比增长6.6%）。

煤炭在未来能源结构中的兜底保障、对新能源发展的支撑作用趋于增强[51]，引发煤炭产量需求波动逐渐加大。依据煤炭需求波动模型获得的煤炭“三

重”兜底的产量需求波动幅度如图4所示：2025年幅度为 $\pm 14.1\%$ （ $\pm 3.7 \times 10^8$ tce）；2030年为 $\pm 16.5\%$ （ $\pm 4 \times 10^8$ tce）；2035年为 $\pm 18.2\%$ （ $\pm 4 \times 10^8$ tce）；2050年为 $\pm 35.7\%$ （ $\pm 4.6 \times 10^8$ tce）；2060年为 $\pm 69.2\%$ （ $\pm 4 \times 10^8$ tce）。

四、“双链”重构背景下我国煤炭行业发展路径与重点任务

在“双链”重构背景下，我国能源需求和供应的不确定性增大，能源需求的微小波动往往导致煤炭产量需求出现较大波动。就我国煤炭行业自身发展而言，煤炭供给弹性不足，难以应对快速变化的需求；煤炭资源保障能力不强，难以支撑长期稳定

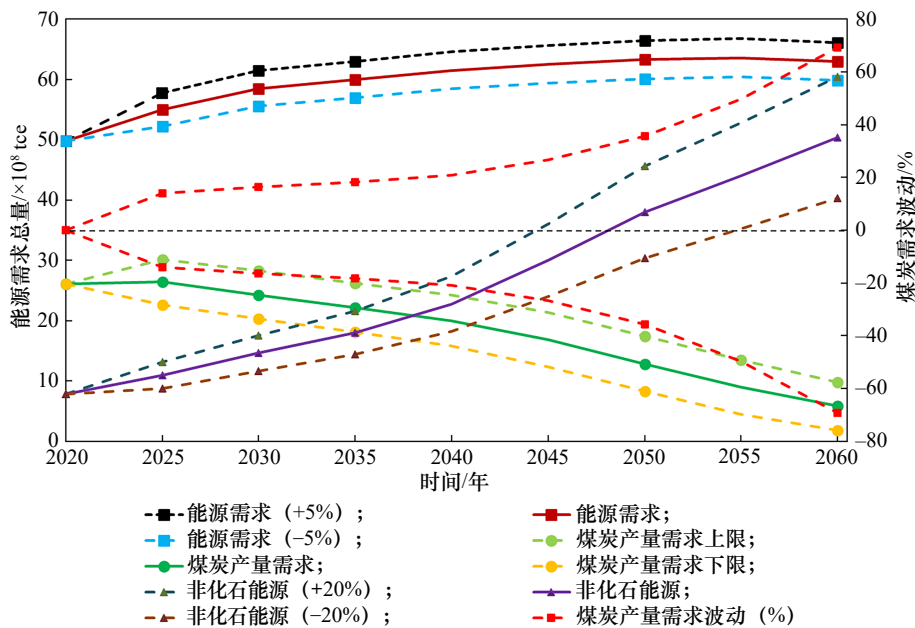


图4 “双链”重构背景下我国煤炭产量需求波动

供应的需求；煤炭供需监测与跟踪不及时，储备投放与调运能力不足。为了充分发挥煤炭作为主体能源的兜底保障作用，应立足于“双链”重构的战略高度，构建安全稳定、通畅高效、全供应链绿色化及低碳化的煤炭供应链体系，促进煤炭在平衡国内国际两个市场、优化能源结构方面发挥应有作用。

（一）总体要求

1. 煤炭产业链供应链与创新链协同发展

在把握煤炭产业链、供应链的现状基础上，坚持问题导向，找准链条培育“薄弱点”，打通链条间的“连接点”，及时采取补链、强链、延链等措施。建立煤炭技术创新链，为保障煤炭产业链、供应链重构提供坚实的科技支撑。提升煤炭产业链、供应链、创新链协同的精准度与实效性，推进更高水平的协同发展。注重关键环节的安全稳定，增强产业综合竞争力，推动煤炭工业融入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。

2. 煤炭资源开发布局与重点地区保供有效衔接

考虑煤炭资源禀赋、市场区位、环境容量等因素，系统优化煤矿建设布局。统筹国家矿区布局规划、基础设施建设、关联产业发展布局，衔接东北、西南等重点地区的保供需求，开展安全高效的煤矿建设，实现煤炭开发布局的科学规划。落实生态保护红线、黄河流域生态保护和高质量发展规划，实现煤炭资源的有序开发，确保与重点保供区的有效衔接。

3. 煤炭消费总量控制与安全兜底保障并行联动

在风、光等可再生能源发电并网比例逐步提高的背景下，因可再生能源自身的不稳定性导致电力调峰需求增加，进一步加大了煤炭需求波动。研判能源需求的结构变化，预测电力需求总量与结构、区域性需求等变化，科学测算煤炭供应需求，完善煤炭产品及产能储备体系。支持构建以清洁能源为主体的能源体系，发挥煤炭在平衡能源供给中的兜底保障作用。

4. 煤炭和新能源深度融合发展

突破煤炭与可再生能源深度耦合发电、制氢、化工转化技术，积极利用煤炭发电的稳定性，为平抑可再生能源出力波动提供支撑，提高整个电力系统电力供应的稳定性。利用可再生能源为煤炭利用提供碳减排途径，减轻单纯燃煤的碳减排压力。重

点推进煤矿区以煤电为核心，与太阳能发电、风电、水电协调发展，实现多种电力能源的协同开发利用。

（二）发展路径

围绕煤炭产业链和供应链上重点环节的薄弱链点、缺失链点，以煤炭技术创新链为支撑，提出煤炭产业链和供应链的强链、补链、延链发展路径。

1. 产业链“强链、补链、延链”路径

围绕煤炭产业链现有薄弱链点，如煤炭资源勘查精度不高，矿井智能化开发/绿色开采、煤炭清洁利用水平较低等问题，加强综合精细勘查、推进煤矿智能化与绿色矿山建设、提高煤炭清洁转化水平，由此增强现有链点的链接力。围绕煤炭产业链“应建未建”链点，如煤与共伴生资源综合开发、煤炭低碳开发力度不足等问题，采取集中攻关等措施，尽快补齐缺失链点。围绕碳封存与利用、煤炭与新能源协调发展等新要求，探索应用煤矿区井下碳封存与利用、煤与新能源协同发展等技术，由此延长煤炭的产业链（见图5）。

2. 供应链“强链、补链、延链”路径

围绕煤炭供应链的薄弱链点，如产能结构待优化、供给弹性不足等问题，采取合理提高大型矿井产能占比、建立柔性矿井等措施，增强现有链点的链接力。围绕煤炭供应链“应建未建”链点，如智能物流体系不健全、煤炭供需监测手段不足等问题，完善储运设施条件，开展煤炭智能化“集疏运”，由此补充“应建未建”链点缺失力。围绕煤与共伴生资源综合开发、煤炭产销共建储备等新要求，探索煤与共伴生矿产资源开发、煤与伴生油气开发、煤炭企业与煤炭用户共建储备等措施，延长供应链（见图6）。

3. 构建煤炭技术创新链路径

围绕制约煤炭产业链、供应链高效稳定运转的瓶颈环节，构建煤炭技术创新链。组建专业技术创新平台，在煤矿智能开采、绿色开采、重大灾害治理、事故应急救援等方向组建创新联合体。完善基于平台的运行机制，以创新平台合作研发为用户提供系统解决方案。加快形成适应新发展形势的煤炭技术创新体系，深度融合信息技术，发展精准地质探测、智能开采、废弃煤矿地下空间碳封存、CO₂矿化发电、煤电与可再生能源多能互补等技术。打通链条间的“连接点”，增强链条间的“连接力”，

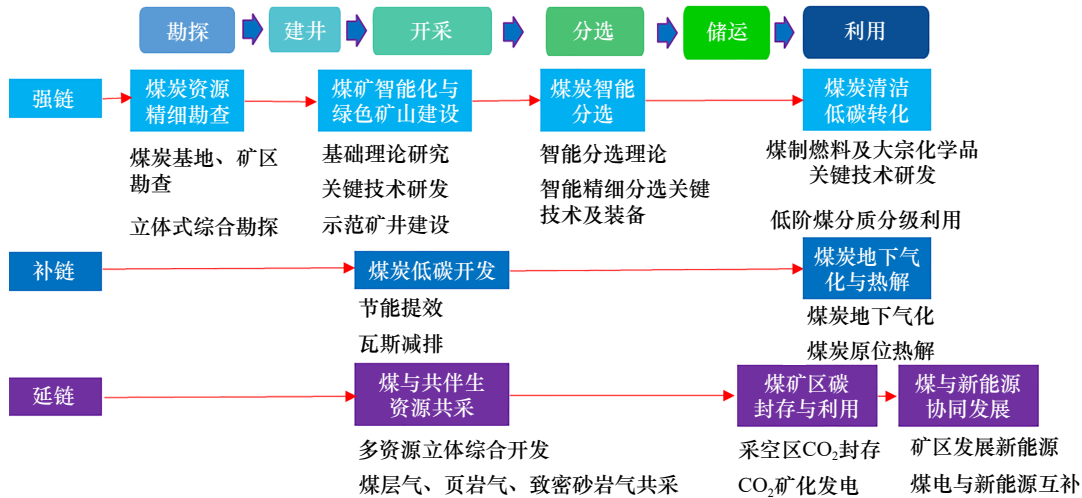


图5 煤炭产业链“强链、补链、延链”示意图

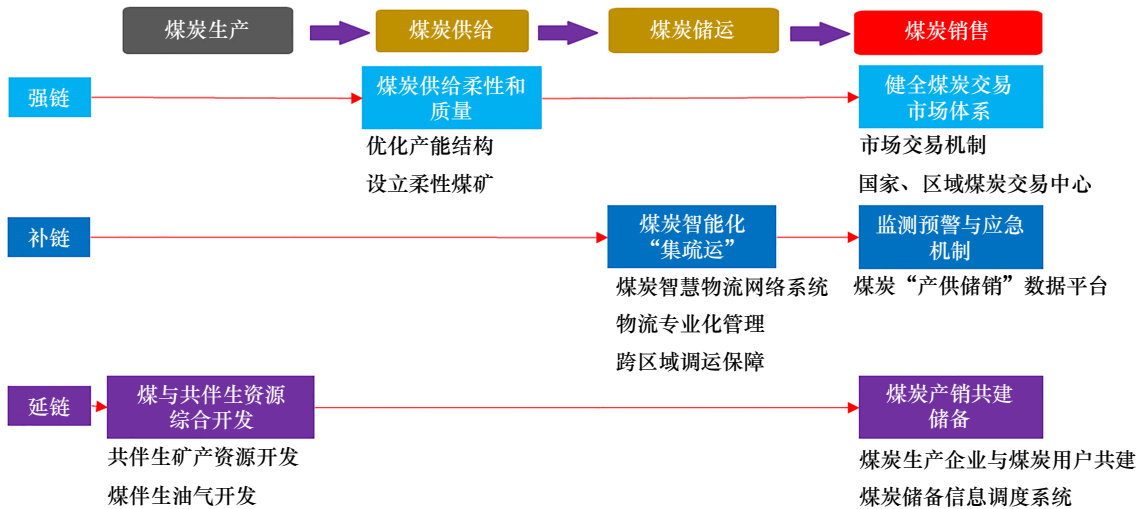


图6 煤炭供应链“强链、补链、延链”示意图

以产业链、供应链的合理延伸来保障链上关键环节的稳定性。

(三) 重点任务

1. 加快实施煤矿智能化建设

实施智能化科技创新，加强煤矿智能化基础理论研究及关键共性技术攻关，建设国家级重点实验室等技术创新研发平台。提升煤机装备智能制造和高端煤机制造水平，发展智能制造系统并开展工艺革新，建设智能制造车间、智能工厂并实现工艺技术数字化，满足智能制造发展要求；建设智能制造信息化系统和基础网络，推动工业云计算、大数据服务平台建设，为煤机智能制造提供网络基础能

力。发挥标准的引领作用，提升煤矿智能化基础能力；加快基础性、关键技术标准及规范的制定（修订），实施煤矿智能化标准体系建设专项。

2. 推进煤炭绿色开发与节能减排

开发矿井水资源保护、充填开采与地表生态修复、煤矿废弃物资源化利用等绿色开采技术，积极开展应用示范和推广；优化煤炭开发工艺、技术及管理，提高煤炭资源开发效率。在煤炭开采各环节采用高效开采技术与设备，开展余热、余压、节水、节材等综合利用节能；通过智能变频永磁驱动等节能技术降低矿用设备能耗，实现煤炭开发节能提效与减排。推进煤矿瓦斯抽采利用，开展煤矿区地面预抽、采动区井上/井下联合抽采、关闭矿井

残存瓦斯抽采，建设低浓度、超低浓度瓦斯高效利用技术攻关和示范工程。对标国际先进水平，完善节能减排标准体系，制定（修订）一批技术设备节能标准，实现煤炭行业节能标准全覆盖。

3. 提高煤炭清洁转化水平

开展煤炭/合成气直接转化制燃料与化学品的反应及催化基础研究，煤制清洁燃气、煤制液体燃料及大宗化学品等关键技术研究。推进煤化工项目园区化建设，引导产业向煤炭基地集中、项目向园区集中。科学利用不同资源之间的元素互补效应，实现能源及资源的梯级利用，减少废弃物排放强度。针对低阶煤化学活性强的特性，实施低阶煤分质分级利用，充分获取油气资源，提高煤炭清洁高效利用水平。

4. 加快煤矿区碳封存和碳利用技术研发

加快煤矿区碳处置与封存技术研发，开展煤矿采空区/废弃矿井封存CO₂、CO₂驱煤层气等技术攻关。重点研究采空区CO₂封存原理与控制技术、煤炭开采与采空区CO₂充填协同方法，推动开展关闭煤矿地下空间CO₂地质封存实践。着力突破CO₂矿化发电新理论与技术、先进煤基炭素材料制备技术、深部原位CO₂与CH₄制氢技术，在煤矿区率先实现CO₂资源化再利用。

5. 推动煤炭与新能源协同发展

利用采煤沉陷区、工业场地、排土场、巷道等地上/地下空间资源，发展风电、太阳能发电、抽水蓄能、压缩空气储能、氢能等新能源类型，探索建设油气等大宗物资储备基地，发挥退出矿区在新能源发展过程中的积极作用。研究化学转化、电力、热力等多种转换形式，实现煤炭与多类新能源的深度耦合发展。风能、水能、太阳能等可再生能源通过发电制氢，将不稳定能量转化为稳定能量，进而提供煤转化过程中的用氢需求，以替代原有煤制氢路线、显著降低碳排放强度、形成转化利用耦合；太阳能与燃煤形成耦合发电，提升能源互补性；生物质与燃煤形成耦合发电路径，与煤共转化（如共热解、共气化、共液化）以提升综合利用效率。

五、对策建议

（一）加大煤炭资源精细勘查力度

合理提高煤炭资源勘查投入，开展区域煤炭资

源调查与潜力调查评价，稳步增加煤炭资源查明储量。以陕西、内蒙古、新疆等煤炭资源丰富地区为重点，开展大型整装煤田的地质勘探与评价，提高资源勘探精度、增加可采储量。提高大型煤炭基地勘探资源的比重，积极增加优质煤炭资源，为建设大型现代化矿井提供资源基础。

（二）强化煤炭储备和应急调运能力建设

研究建立全国煤炭“产供储销”大数据平台，提供供需形势动态监测及预测预警能力。建立应急响应机制，涵盖供需波动风险、区域性突发风险、系统性冲击风险等预警级别。尽快建成煤炭智慧物流网络系统，实现全国煤炭“产供需”与主要产煤省份、主要中转地、大型企业的紧密衔接，精准缩短应急调运时间。

（三）提高煤炭柔性供给水平

基于煤炭“三重”兜底保障要求，适时调节煤炭产量（月度产量可放宽到120%或更高），建设一批高效、智能、少人的“柔性煤矿”，实现煤炭订单式生产，兼顾低成本、安全高效、产能调节等目标。适量建设“应急储备煤矿”，由政府主导投资、大型煤炭企业代管，在出现重大突发事件时实现快速启动生产。

（四）增强煤制油气兜底保障能力

制定煤制油气基地规划，有序推进煤制油气产能建设，扩大油气战略储备能力。鼓励能源类企业建设煤制油气项目，在资源配置、基础设施方面给予配套支持。建议持续性减免煤制油的消费税，给予煤制气与页岩气、煤层气相当力度的财政补贴，合理弥补企业油气储备的刚性成本。

（五）完善煤炭产业发展政策

适时调整煤炭产业发展政策，增加煤炭战略储备相关内容，在产能储备煤矿安全改造、智能柔性无人矿井示范等方向予以配套支持。以保障能源安全、经济发展为底线，研究制定煤炭产业链、供应链安全稳定的政策文件。保持煤炭产业政策的连续性、稳定性、系统性、全局性，推动煤炭行业中长期高质量发展。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: June 28, 2022; **Revised date:** August 16, 2022

Corresponding author: Ren Shihua is a research fellow from China Coal Research Institute Co., Ltd. His major research fields include coal-related techno-economic appraisal and energy strategies. E-mail: ren@cct.org.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering projects “Strategic Research on the Digital Development of Coal Industry” (2022-XZ-28) and “Research on the Influences of Global Industrial Chain and Energy Supply Chain Reconstruction on China’s Coal Industry and Countermeasures” (2022-XZ-33)

参考文献

- [1] 于宏源. 全球能源形势重大变化与中国的国际能源合作 [J]. 人民论坛·学术前沿, 2017 (7): 82–90.
Yu H Y. Major changes in global energy situation and China’s international energy cooperation [J]. *Frontiers*, 2017 (7): 82–90.
- [2] 胡德宝, 赵静. 新冠疫情和贸易摩擦双重不确定性下中国供应链重构的策略研究 [J]. 学习与实践, 2021 (1): 21–28.
Hu D B, Zhao J. Research on the strategy of China’s supply chain reconstruction under the dual uncertainty of the new crown epidemic and trade friction [J]. *Study and Practice*, 2021 (1): 21–28.
- [3] 叶敏华. 新冠肺炎疫情影响下的全球产业链重构与中国应对之策 [J]. 上海市经济管理干部学院学报, 2021, 19(1): 10–16.
Ye M H. The global industrial chain reconstruction under the influence of the epidemic and China’s countermeasures [J]. *Journal of Shanghai Economic Management College*, 2021, 19(1): 10–16.
- [4] 石建勋, 卢丹宁, 徐玲. 第四次全球产业链重构与中国产业链升级研究 [J]. 财经问题研究, 2022 (4): 36–46.
Shi J X, Lu D N, Xu L. The fourth global industrial chain reconstruction and research on China’s industrial chain upgrade [J]. *Research on Financial and Economic Issues*, 2022 (4): 36–46.
- [5] 魏伟, 陈骁. 全球产业链及疫情后的重构展望 [J]. 金融市场研究, 2020 (8): 2–12.
Wei W, Chen X. Global industrial chain and the prospects for post-pandemic reconstruction [J]. *Financial Market Research*, 2020 (8): 2–12.
- [6] 马盈盈, 崔晓敏. 全球产业链的发展与重构: 大趋势与新变化 [J]. 全球化, 2021 (2): 102–113.
Ma Y Y, Cui X M. The development and reconstruction of the global industrial chain: General trends and new changes [J]. *Globalization*, 2021 (2): 102–113.
- [7] 李晓依, 许英明, 肖新艳. 俄乌冲突背景下国际石油贸易格局演变趋势及中国应对 [J]. 国际经济合作, 2022 (3): 10–18.
Li X Y, Xu Y M, Xiao X Y. Evolution trend of global oil trade pattern under Russia-Ukraine conflict and China’s countermeasures [J]. *Journal of International Economic Cooperation*, 2022 (3): 10–18.
- [8] 王宜林. 构建油气发展新格局切实保障国家能源安全 [N]. 人民政协报, 2021-02-23(06).
Wang Y L. Building a new pattern of oil and gas development and ensuring national energy security [N]. *CPPCC Daily*, 2021-02-23(06).
- [9] 黄维和, 韩景宽, 王玉生, 等. 我国能源安全战略与对策探讨 [J]. 中国工程科学, 2021, 23(1): 112–117.
Huang W H, Han J K, Wang Y S, et al. Strategies and countermeasures for ensuring energy security in China [J]. *Strategic Study of CAE*, 2021, 23(1): 112–117.
- [10] 唐艳, 张庆. 全球产业链重构对我国制造业的影响 [J]. 企业管理, 2021 (5): 11–15.
Tang Y, Zhang Q. The impact of global industrial chain reconstruction on China’s manufacturing industry [J]. *Enterprise Management*, 2021 (5): 11–15.
- [11] 易宇, 周观平. 全球产业链重构背景下中国制造业竞争优势分析 [J]. 宏观经济研究, 2021 (6): 34–49.
Yi Y, Zhou G P. Analysis of competitive advantage in manufacturing industry in China under the background of global industrial chain restructuring [J]. *Macroeconomic*, 2021 (6): 34–49.
- [12] 郑健雄, 方兴起. 新冠疫情影响下全球产业链重构与中国应对 [J]. 华南师范大学学报(社会科学版), 2020 (5): 37–47.
Zheng J X, Fang X Q. Global industrial chain restructuring under the impact of COVID-19 and China’s response [J]. *Journal of South China Normal University(Social Science Edition)*, 2020 (5): 37–47.
- [13] 林善浪. 中国应对全球产业链重构的破局之策 [J]. 人民论坛·学术前沿, 2022 (7): 41–53.
Lin S L. The reconstruction of global industrial chain and China’s measures [J]. *Frontiers*, 2022 (7): 41–53.
- [14] 郭宏, 伦蕊. 新冠肺炎疫情下全球产业链重构趋势及中国应对 [J]. 中州学刊, 2021 (1): 31–38.
Guo H, Lun R. Global industrial chain reconstruction trend under COVID-19 and China’s response [J]. *Academic Journal of Zhongzhou*, 2021 (1): 31–38.
- [15] 刘建国, 朱跃中. 近中期中国能源安全面临的新形势新挑战及建议 [J]. 国际石油经济, 2021, 29(2): 16–22.
Liu J G, Zhu Y Z. The new situation, challenges and suggestions for China’s energy security [J]. *International Petroleum Economics*, 2021, 29(2): 16–22.
- [16] 朱跃中. 全球能源格局新变化对我国能源安全的影响及应对 [J]. 经济导刊, 2019 (10): 38–40.
Zhu Y Z. The impact of new changes in global energy pattern on China’s energy security and countermeasures [J]. *Economic Herald*, 2019 (10): 38–40.
- [17] 薛钦源, 张祝恺. 后疫情时代中国能源发展形势与应对措施 [J]. 中国经贸导刊, 2021 (5): 85–87.
Xue Q Y, Zhang Z K. China’s energy development situation and countermeasures in the post-epidemic era [J]. *China Economic & Trade Herald*, 2021 (5): 85–87.
- [18] 康金红. 全球能源贸易格局变化下我国能源贸易的前景、挑战及对策 [J]. 价格理论与实践, 2021 (7): 87–90.
Kang J H. Prospects, challenges and countermeasures of China’s energy trade under the change of global energy trade pattern [J]. *Price: Theory & Practice*, 2021 (7): 87–90.
- [19] 康红普, 王国法, 王双明, 等. 煤炭行业高质量发展研究 [J]. 中国工程科学, 2021, 23(5): 130–138.
Kang H P, Wang G F, Wang S M, et al. High-quality development of China’s coal industry [J]. *Strategic Study of CAE*, 2021, 23(5): 130–138.

- 130-138.
- [20] 何丽婷,姚瑶,裴向前,等.煤炭供应链管理研究的文献计量分析[J].煤炭经济研究,2020,40(1):47-53.
He L T, Yao Y, Pei X Q, et al. Bibliometric analysis of coal supply chain management [J]. Coal Economic Research, 2020, 40(1): 47-53.
- [21] 袁惊柱.“十四五”时期加快推动我国煤炭工业高质量发展[J].中国发展观察,2021(23):64-67.
Yuan J Z. The 14th Five-Year Plan period will accelerate the promotion of high-quality development of China's coal industry [J]. China Development Observation, 2021 (23): 64-67.
- [22] 杜平.新冠疫情后我国煤炭产业高质量发展的思考[J].中国煤炭,2020,46(5):16-18.
Du P. Thinking of high-quality development of China's coal industry after COVID-19 epidemic [J]. China Coal, 2020, 46(5): 16-18.
- [23] 朱朦,贺斌,李德波,等.我国煤炭应急供给存在的问题及对策建议[J].中国煤炭,2022,48(4):17-21.
Zhu M, He B, Li D B, et al. Problems and countermeasures of coal emergency supply in China [J]. China Coal, 2022, 48(4): 17-21.
- [24] 黎海华.疫情不改我国在全球产业链中的地位[J].红旗文稿,2020(10):27-29.
Li H H. The epidemic does not change China's position in the global industrial chain [J]. Red Flag Manuscript, 2020 (10): 27-29.
- [25] 尹曼潼,张静.从“遏制接触”到“遏制竞争”:中美贸易摩擦的本质与中国应对[J].天津师范大学学报(社会科学版),2022(3):68-74.
Yin M T, Zhang J. From “containing contact” to “containing competition”: The nature of Sino-US trade friction and China's response [J]. Journal of Tianjin Normal University(Social Sciences), 2022 (3): 68-74.
- [26] 尤露,王雅丽.全球价值链重构对我国出口贸易高质量发展的影响[J].商业经济研究,2022(5):143-146.
You L, Wang Y L. The impact of global value chain reconstruction on the high-quality development of my country's export trade [J]. Journal of Commercial Economics, 2022 (5): 143-146.
- [27] 黄群慧,杨涛涛.中国制造业比重“内外差”现象及其“去工业化”涵义[J].中国工业经济,2022(3):20-37.
Huang Q H, Yang H T. Chinese “domestic-international differentials” in manufacturing value added and its meaning of “de-industrialization” [J]. China Industrial Economics, 2022 (3): 20-37.
- [28] 王坤岩.碳中和目标下构建绿色低碳循环产业体系的思考[J].中国国情国力,2021(11):8-11.
Wang K Y. Thinking on the construction of green low-carbon recycling industry system under the goal of carbon neutrality [J]. China National Conditions and Strength, 2021 (11): 8-11.
- [29] 张志明,耿景珠,杨攻研,等.国际疫情蔓延、全球产业链传导与中国产业链稳定[J].国际经贸探索,2022,38(2):51-65.
Zhang Z M, Geng J Z, Yang G Y, et al. International epidemic spread, global industrial chain transmission and China's industrial chain stability [J]. International Economics and Trade Research, 2022, 38(2): 51-65.
- [30] 朱孟晓,田洪刚.双循环视角下国内价值链体系演进与升级战略选择[J].东岳论丛,2022,43(5):153-158.
Zhu M X, Tian H G. The evolution and upgrading strategy of domestic value chain system from the perspective of double circulation [J]. Dongyue Tribune, 2022, 43(5): 153-158.
- [31] 杨宇,于宏源,鲁刚,等.世界能源百年变局与国家能源安全[J].自然资源学报,2020,35(11):2803-2820.
Yang Y, Yu H Y, Lu G, et al. Interview on the unprecedented changes of energy geopolitics and national energy security [J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(11): 2803-2820.
- [32] 周健奇.从基于资源禀赋的能源战略向技术驱动型能源战略转变[J].发展研究,2019(11):8-12.
Zhou J Q. Shift from resource-based energy strategy to technology-driven energy strategy [J]. Development Research, 2019 (11): 8-12.
- [33] 邹才能,潘松圻,荆振华,等.页岩油气革命及影响[J].石油学报,2020,41(1):1-12.
Zou C N, Pan S Q, Jing Z H, et al. Shale oil and gas revolution and its impact [J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(1): 1-12.
- [34] 晗昂.俄乌冲突对能源市场的冲击与影响[J].能源,2022(3):51-55.
Han C. Impact and influence of Russia-Ukraine conflict on energy market [J]. Energy, 2022 (3): 51-55.
- [35] 刘满平.俄乌局势对能源市场的影响及对策建议[J].当代石油石化,2022,30(4):1-4.
Liu M P. The influence of Russia-Ukraine situation on energy market and countermeasures suggestions [J]. Petroleum & Petrochemical Today, 2022, 30(4): 1-4.
- [36] 聂新伟,卢伟.俄乌冲突对全球能源格局影响及我国的应对建议[J].能源,2022(5):63-65.
Nie X W, Lu W. Impact of Russia-Ukraine conflict on global energy pattern and countermeasures of China [J]. Energy, 2022 (5): 63-65.
- [37] 邹才能,何东博,贾成业,等.世界能源转型内涵、路径及其对碳中和的意义[J].石油学报,2021,42(2):233-247.
Zou C N, He D B, Jia C Y, et al. Connotation and path of world energy transition and its significance to carbon neutrality [J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(2): 233-247.
- [38] 董秀成,董康银,窦悦.后疫情时代全球能源格局演进和重塑路径研究[J].中外能源,2021,26(3):1-6.
Dong X C, Dong K Y, Dou Y. Evolution and reshaping of global energy pattern in the post-epidemic era [J]. Sino-Global Energy, 2021, 26(3): 1-6.
- [39] 崔宏伟.俄乌冲突下欧盟深陷能源供应危机[J].当代世界,2022(4):73-74.
Cui H W. EU in deep energy supply crisis amid Russia-Ukraine conflict [J]. Contemporary World, 2022 (4): 73-74.
- [40] 杨宇.中国与全球能源网络的互动逻辑与格局转变[J].地理学报,2022,77(2):295-314.
Yang Y. Energy globalization of China: Interaction logic and spatial transition [J]. Acta Geographica Sinica, 2022, 77(2): 295-314.
- [41] 吕江.后疫情时代全球能源治理重构:挑战、反思与“一带一路”选择[J].中国软科学,2022(2):1-10.
Lv J. Reshaping post-COVID-19's global energy governance: Challenges, reflection and the Belt and Road initiative's options [J]. China Soft Science, 2022 (2): 1-10.

- [42] 杨晶. 实现碳达峰碳中和亟待重塑能源产业链供应链 [J]. 中国能源, 2021, 43(9): 14–19.
Yang J. Achieve carbon peak carbon neutrality urgently needs to reshape the energy industry chain and supply chain [J]. Energy of China, 2021, 43(9): 14–19.
- [43] 李雪, 刘传江. 新冠疫情下中国产业链的风险、重构及现代化 [J]. 经济评论, 2020 (4): 55–61.
Li X, Liu C J. Risk, reconstruction and modernization of China's industrial chain under the COVID-19 [J]. Economic Review, 2020, (4): 55–61.
- [44] 王东方, 王婉君, 陈伟强. 中国战略性金属矿产供应安全程度评价 [J]. 资源与产业, 2019, 21(3): 22–30.
Wang D F, Wang W J, Chen W Q. Supply security of strategic metal ores in China [J]. Resources & Industries, 2019, 21(3): 22–30.
- [45] 王楠. 我国石油行业海外投资风险变化及应对 [J]. 宏观经济管理, 2020 (7): 72–77.
Wang N. Changes and countermeasures of overseas investment risks in China's petroleum industry [J]. Macroeconomic Management, 2020 (7): 72–77.
- [46] Oxford Institute for Energy Studies. The Russian invasion of Ukraine and China's energy markets [R]. Oxford: Oxford Institute for Energy Studies, 2022.
- [47] 国际能源署. 2020 年可再生能源报告: 分析和预测至 2025 年 [R]. 巴黎: 国际能源署, 2020.
International Energy Agency. Renewable energy report 2020: Analysis and projections to 2025 [R]. Paris: International Energy Agency, 2020.
- [48] 中共中央 国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见 [EB/OL]. (2021-09-22)[2021-10-24]. http://www.gov.cn/zhengce/2021-10/24/content_5644613.htm.
- Working guidance of The Central Committee of the Communist Party of China and The State Council of China for carbon dioxide peaking and carbon neutrality in full and faithful implementation of the new development philosophy [EB/OL]. (2021-09-22)[2021-10-24]. http://www.gov.cn/zhengce/2021-10/24/content_5644613.htm.
- [49] 谢和平, 吴立新, 郑德志. 2025 年中国能源消费及煤炭需求预测 [J]. 煤炭学报, 2019, 44(7): 1949–1960.
Xie H P, Wu L X, Zheng D Z. Prediction on the energy consumption and coal demand of China in 2025 [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(7): 1949–1960.
- [50] 煤炭科学研究总院有限公司. 我国煤炭科学产能支撑能力和可持续发展战略研究 [R]. 北京: 煤炭科学研究总院有限公司, 2020.
China Coal Research Institute Co., Ltd. Research on coal scientific supporting capacity and sustainable development strategy in China [R]. Beijing: China Coal Research Institute Co., Ltd., 2020.
- [51] 谢和平, 任世华, 谢亚辰, 等. 碳中和目标下煤炭行业发展机遇 [J]. 煤炭学报, 2021, 46(7): 2197–2211.
Xie H P, Ren S H, Xie Y C, et al. Development opportunities of the coal industry towards the goal of carbon neutrality [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(7): 2197–2211.
- [52] 单葆国. 2021 年全球能源电力短缺原因分析及其对我国的启示 [N]. 中国能源报, 2022-02-12(02).
Shan B G. Analysis on the causes of global energy and power shortage in 2021 and its enlightenment to China [N]. China Energy News, 2022-02-12(02).
- [53] 吕江. “一带一路”与后疫情时代国际能源秩序重塑: 全球挑战、治理反思与中国选择 [J]. 社会主义研究, 2021 (4): 164–172.
Lv J. The Belt and Road initiative and reshaping post-COVID-19's international energy order: The global challenges, governance reflection and China's options [J]. Socialism Studies, 2021 (4): 164–172.