

碳中和背景下矿业可持续发展路径选择

■ 强海洋/高兵/郭冬艳/王心一

(中国自然资源经济研究院, 北京 101149)

摘要：矿业可持续发展是矿业高质量发展的本质要求。全球碳减排进程加速，气候变化的适应与应对，已成为全球各政治体和经济体共识。在新发展阶段，国家“碳中和”目标的提出，将成为矿业绿色、低碳、循环发展的内生动力。优化能源资源供给侧结构性改革，构建多维协同发展路径，发挥矿业在碳减排中的“助推器”作用；积极推进矿业绿色发展，实施矿业迹地生态修复重大工程，提升矿区生态系统固碳能力，有助于重塑矿业社会形象和矿业产业结构转型升级。

关键词：碳中和；矿业；可持续发展；低碳绿色循环

中图分类号：F407.1；F062.1 文献标识码：A 文章编号：1672-6995 (2021) 04-0004-08

DOI：10.19676/j.cnki.1672-6995.000603

Options for Sustainable Development of Mining Industry under the Background of Carbon Neutrality

QIANG Haiyang, GAO Bing, GUO Dongyan, WANG Xinyi

(Chinese Academy of Natural Resources Economics, Beijing 101149)

Abstract: Sustainable development of the mining industry is the essential requirement for high-quality development of the mining industry. The global carbon emission reduction process is accelerating, and climate change adaptation and response have become the consensus of international political bodies and economies. In the new development stage, the proposed national goal of "carbon neutrality", will become the endogenous impetus for the green, low-carbon, and circular development of the mining industry. The paper suggests to optimize the structural reform on the supply side of energy resources, construct a multi-dimensional synergistic development path, and play the role of "booster" of the mining industry in carbon emission reduction; actively promote the green development of mining industry, implement the major project of ecological restoration of mining sites, and improve the carbon sequestration capacity of mining ecosystem, in order to help with reshaping the social image of the mining industry and the transformation and upgrading of mining industry structure.

Key words: carbon neutrality; mining; sustainable development; low-carbon green cycle

0 引言

我国是世界上最大的能源生产国和消费国，也是全球最大的碳排放国。2020年9月，我国向国际社会作出“碳达峰、碳中和”郑重承诺，在气候雄心峰会上提出了更加具体的目标。2021年3月召开的中央财经第九次会议指出，要把碳达峰、碳中和纳入生态文明建设整体布局；推动绿色低碳技术

实现重大突破，抓紧部署低碳前沿技术研究，加快推广应用减污降碳技术。在此背景下，充分发挥矿业在国家能源资源结构调整中的重要作用，通过政策引领和科技创新，加快矿业绿色发展转型升级，协同推进矿业经济高质量发展和生态环境高水平保护，稳步实现“十四五”期间单位国内生产总值能耗和二氧化碳排放分别降低13.5%和18%，非化石

收稿日期：2021-03-21；修回日期：2021-04-03

▲ 基金项目：自然资源部绿色矿山综合奖励与组织实施（12110200000160012）

▲ 作者简介：强海洋（1983—），男，河北省易县人，中国自然资源经济研究院副研究员，矿业绿色发展研究所副所长，理学硕士，主要从事自然资源规划战略和政策管理研究。

▲ 通讯作者：高兵（1980—），男，安徽省庐江县人，中国自然资源经济研究院研究员，工学博士，主要从事自然资源经济研究。
E-mail：472646316@qq.com。

能源到2030年在一次能源消费中比重达到25%左右的目标。

1 主要国家和矿业企业的碳中和行动计划

1.1 “碳中和”已经成为全球共识，全球碳减排进程加速推进

21世纪以来，全球温度加速攀升，由此造成自然灾害日益频繁和环境恶化。2015年12月，《联合国气候变化公约》近200个缔约方在巴黎气候变化大会上达成的《巴黎协定》，成为继《京都议定书》之后第二份有法律约束力的全球气候协议，其核心目标就是要推动全球尽早实现碳中和^[1]。为了应对全球气候变化，尽早实现“碳中和”、控制温升成为全球少有的共识性议题，在各国应对气候变化政策催化下，碳减排进程将进一步提速。

1.2 部分发达国家碳排放已经达峰，部分煤电大国作出“碳中和”承诺

目前全球已经有54个国家的碳排放达到峰值，占全球碳排放总量的40%。1990年、2000年、2010年和2020年碳排放达峰的国家数量分别为18个、31个、50个和54个，其中大部分属于发达国家。根据ECIU数据，全球有125个国家或地区提出碳中和愿景，其中6个已实现立法，5个处于立法议案阶段，13个已有相关政策文件，99个处于政策文件制定讨论中。全球十大煤电国家中，中国、日本、韩国、南非、德国均已作出相应承诺，这五国煤电发电量在全球的占比超过60%（表1）^[2]。我国所做出的碳排放力争2030年达到峰值、2060年实现碳中和的庄严承诺，受到全世界的普遍关注，也进一步加快了全球碳减排步伐^[3]。

1.3 国内外矿业企业积极行动，加快实施碳减排计划措施

随着2015年《巴黎协定》设定21世纪后半叶实现净零排放的目标，国际上众多能源资源矿业巨头企业，如力拓、必和必拓、嘉能可、淡水河谷、巴里克、纽蒙特等公司都提出减少碳排放的目标，并针对控制碳排放制定了雄心勃勃的行动计划。国内矿业企业也在切实推进碳减排、碳中和工作，积极

表1 全球10大煤电国家的碳中和承诺情况

国家	占全球煤电总量	碳中和承诺	达峰年	目标年
中国	50.20%	是	2030	2060
印度	11.00%	—	—	—
美国	10.60%	—	2007	—
日本	3.10%	是	2013	2050
韩国	2.50%	是	2013	2050
南非	2.20%	是	—	2050
德国	1.90%	是	1990	2050
俄罗斯	1.80%	—	1990	—
印度尼西亚	1.80%	—	2015	—
澳大利亚	1.60%	—	2006	—

资料来源：根据《2020年全球电力评论》、参考文献[2]及网络资料整理。

履行历史使命与行业责任，促进矿业绿色转型、低碳发展。（参见表2）

尽管全球矿业公司碳减排行动计划呈现出不同形式，内容也各有侧重，但总的来说，还是可以从中发现一些共同特点和规律。一是明确时间表和路线图。围绕既定的碳减排目标，能源矿业公司明确了资金比例、投资数量、投资条件和程序等方面要求。为便于行动计划的实施，通常附有配套的政策。二是内容全面、与时俱进。整体上看碳减排行动的内涵越来越丰富，逐渐从节能低碳环保新技术、新工艺、新设备、新材料的应用与研发，推进能源结构清洁化、低碳化等到减少运营链与产业链的碳足迹，以及能源数字经济平台的打造发展，包含科技创新、设备更新、数字平台、权益保护等多个环节。三是重视长效机制的建立。部分矿业公司甚至将高管薪酬与气候变化目标进展相挂钩，这些都在一定程度上彰显出应对碳减排策略方案的多元化。

2 矿业实现“碳中和”甚至“负碳”的多路径方案

2.1 降低资源开发过程的能源消耗强度，减少矿业活动的直接碳排放

历史上，矿业作为传统高能耗产业，消耗大量能源并排出温室气体。按1998—2013年的平均能源

表2 国内外矿业企业的碳排放重点计划

名称	计划与内容
力拓	计划未来5年加大碳减排项目投入，生产低碳未来所需的材料，减少运营业务的碳足迹。同时携手合作伙伴减少整个产业链的碳足迹，加强应对气候物理风险的应变能力。
必和必拓	积极承担监督管理角色，通过设定公共目标致力于通过投资新兴技术，处理购买公司煤炭、铁矿石等产品的客户在矿区外使用矿产资源时所造成的排放，协助运货商和其他合作商共同进行减排。
嘉能可	考虑将高管薪酬与气候变化目标的进展联系起来，并审查其贸易集团成员是否达标。进一步致力于向低碳经济过渡，限制煤炭产量。计划到2035年将其温室气体间接排放量减少约30%。
淡水河谷	优化生产流程、产品和服务，增加碳封存，识别、分析和推荐有助于制定与气候变化有关的监管框架的提案，携手供应链各环节减少温室气体的排放。同时传播与气候变化有关的知识，鼓励员工采用保护环境的最佳生产方法，联合政府及各民间团体共同实施各自的适应性行动。
自由港	预防极端天气事件、水资源压力和其他气候变化影响，增强公司业务、主办社区和当地利益相关者对气候变化风险的恢复力。进行能源转型。力争到2030年将美洲每吨阴极铜的温室气体排放量比2018年的基准降低15%。
巴里克	更新其排放基准，显示碳足迹以减少能源使用量和相关成本。基于科学使用不同的减排技术计算预期的排放量从而确定新的排放基准。目标在2030年之前至少实现10%的减排量，并将定期审查和更新其减排。
英美资源	对有关碳排放的产品分析其风险及机遇，建立内部灵活性，确保应对气候变化的韧性。同时在整个业务中减少能源使用和碳排放。承诺将每单位产品的温室气体排放量比2004年基准减少10%。
沙特阿美	加入世界银行的“2030年常规火炬零排放行动计划”。将在2023年前投资500万美元实现10GW可再生能源装机容量。
智利铜业	创建“100%清洁能源矩阵”。通过更换所有地下生产设备以及参与寻找新的清洁能源如绿色氢气，实现减少公司约3/4的碳排放量。目标到2030年，减少碳排放量70%、减少内陆水消耗量60%和回收65%工业废料。
中国石化	加快推进氢能等先进能源和CCUS（二氧化碳捕集封存与利用）等深度脱碳技术创新及产业化发展，制定低碳化行业规则和技术标准，推动行业低碳转型，打造能源化工行业绿色低碳竞争力。
中国海油	实施62项节能改造项目，加大清洁能源供给。同时建立碳排放数据管理信息平台，制定严于国家及行业的检测指针，强化公司节能低碳监督监测内控机制的职责。
中国铝业	实施天然气替代煤气/燃煤低碳技改和工艺优化节能技改，形成集“铝土矿—氧化铝—电解铝—铝合金”为一体的绿色低碳全产业链企业。同时积极探索综合智慧能源、储能等能源一体化的解决方案。
江西铜业	持续推进高能耗落后机电设备淘汰计划，通过加快智能工厂建设，定期自查核算温室气体排放量，推进能源结构优化。同时依托一批先进节能生产工艺及装备的科研成果转化应用，提升碳排放的管控水平。

资料来源：根据网络资料整理。

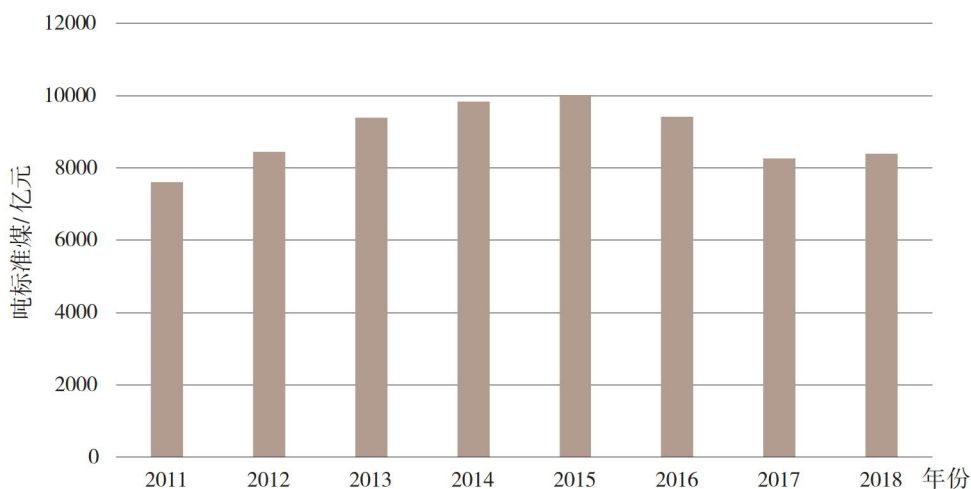
消耗强度分类，非金属矿采选业、黑色金属矿采选业、煤炭开采和洗选业、有色金属矿采选业、石油和天然气开采业均属于高耗能产业，在38个工业分行业中分别排名第2位、第3位、第7位、第11位和第12位^[4]。受益于能源利用效率提升、产业结构改善、清洁能源利用开发加大等因素，2015年我国采掘业能源消费强度达到顶峰后稳步下降。（参见图1）

据2014年的相关研究数据，我国矿业碳排放的行业分布以煤炭开采和洗选业、石油和天然气开采业为主，前者占比在40%~55%之间波动，后者在2001年、2002年达到峰值后占比在逐步减小。黑色金属矿采选业碳排放比重逐步提高，但幅度较小。

有色金属矿采选业和非金属矿采选业碳排放比重较为稳定^[4]。我国矿业碳排放的能源种类主要为电力和煤炭类能源，在矿业能源消费产生的碳排放总量中，前者占比超过40%，近年来呈现逐步增加的趋势，后者占比略低于40%。石油类能源消费产生的碳排放占比近年来不断缩小，天然气和热力消费产生的碳排放占比较小且稳定。矿业整体碳排放强度下降趋势明显，尤其是黑色金属采选业、煤炭开采和洗选业、有色金属和非金属矿采选业均有较大幅度的下降，年均下降在6%以上。

2.2 不断提高矿产资源综合利用水平，推进矿业绿色低碳发展

实现“碳中和”目标不仅要优化能源结构、降



(数据来源：中国统计年鉴2020)

图1 2011—2018年我国采掘业能源消费强度情况

低能源消耗强度，也要提高资源利用效率。从资源开发环节看，就是要在采选环节提高“三率”（开采回收率、选矿回收率、综合利用率）水平。原国土资源部自2012年开始陆续制定并颁布了46种重要矿产的“三率”标准。2016年，《关于推进矿产资源全面节约和高效利用的意见》《矿产资源开发利用水平调查评估制度工作方案》等文件印发，对矿产资源节约管理的基本原则、管理内涵、管理思路，以及开发利用水平调查评价等问题做了详尽部署。此外，系列批次的《矿产资源节约与综合利用先进适用技术推广目录》，也在倡导使用先进技术提高资源利用水平。

“十三五”期间，自然资源部发布有色、冶金、化工等9项行业绿色矿山建设规范，公告首批18个绿色勘查示范项目，遴选1251家矿山企业进入全国绿色矿山名录，确立50家绿色矿业发展示范区^[5]。与“十二五”时期相比，我国原煤平均入选率达71.2%，提高了11.6个百分点；地下开采铁矿平均开采回收率为86.4%，提高了4个百分点；露

天开采铜矿、铅矿、锌矿、钨矿等主要有色金属矿及金矿开采回收率超90%、选矿回收率超85%；磷矿开采回收率超过85%；绿色矿山企业“三率”水平高于行业平均水平的10%~30%；大宗工业固体废物综合利用量快速增长（表3），整体综合利用率快速提高。研究显示，矿产品生产的碳足迹只有化石燃料技

术产生的温室气体排放量的6%^[6]。综合来看，矿产资源综合利用程度的不断加强，有力促进了“碳中和”行动。

2.3 推进矿业迹地生态修复，能有效提升矿区生态系统固碳能力

历史上，长期采矿导致矿区出现植被损毁、土地破坏和生物多样性减少等严重生态问题，使原生态系统的碳汇功能的急剧退化甚至完全丧失。据估算，1987—2020年，我国煤矿开采破坏的土地面积达 $1.80 \times 10^6 \text{hm}^2$ 。此外，采煤产生大量废弃物，如煤矸石目前堆存量多达50多亿t，是我国积存量和占用土地最多的工业废弃物。由于它们残存的碳量可发生氧化或自燃，是巨大的碳排放源。所以，如何保护和稳定矿区土壤碳库，减少区域碳排放，是一个迫在眉睫但又长期忽略的生态问题。通过对矿山损毁土地和废弃地进行生态修复和重建，恢复生态系统的碳汇功能，可实现区域碳源向碳汇的根本性转变^[7]。

表3 2019年全国矿业相关的固体废物产生利用情况

类别	尾矿	赤泥	冶金渣	石材行业固废	煤矸石	粉煤灰	工业副产石膏	电解锰渣	煤气化渣	电石渣	合计
产生量/亿t	12.72	1.05	6.64	0.50	6.76	6.37	2.26	0.12	0.25	0.32	36.98
占比/%	34.39	2.84	17.85	1.35	17.31	17.31	6.11	0.33	0.68	0.87	100
利用量/亿t	4.13	0.08	5.14	0.35	4.91	4.91	1.15	0.01	0.02	0.29	20.78
利用率/%	32.47	8.09	77.91	70.00	76.72	76.72	50.88	8.12	8.12	89.40	56.19

资料来源：根据工业固废网统计。

“十三五”期间，国家开展了长江流域、京津冀和汾渭平原等重点区域历史遗留矿山生态修复，治理修复矿点近9000个，面积约2.5万hm²^[8]。矿业迹地生态修复影响土地利用或土地覆被变化，对于生态系统固碳能力的提升有极大促进作用，进而影响碳排放强度。相关研究成果表明，不同用地类型碳排放强度差异性极大。一定意义上，林地、湿地和水面以及未利用地呈碳负排放状态。总的来看，积极推进矿业迹地生态修复，可以提高约20%左右生态系统固碳能力^[9]，这对于促进实现碳中和目标是较好的助力。

2.4 发挥碳捕获与封存（CCS）技术作用，让采掘过程中产生的二氧化碳重回地圈

由于碳捕获与封存项目在物理上杜绝了排放，通常被视为最有效的固碳手段，其效率远远高于转型新能源。碳捕获和封存或者碳捕获利用和封存技术是二氧化碳“净零”排放的必要手段^[10]。中国以化石能源为主的资源禀赋特点要求必须加大二氧化碳的埋藏及封存应用与推广，发挥其在碳中和进程中的作用。总的来说，考虑到碳捕获系统拥有极高的效率，以及相关技术的逐渐进步，在能源安全和减排目标之下是最为理想的一个方向。未来可加大地上地下空间的开发利用，利用地质作用形成的天然地下空间以及开采油气后的枯竭油田、气田和地下“水田”，形成埋藏及封存二氧化碳的“人工二氧化碳气田”。目前，碳捕获系统面临的最大问题是经济上的挑战，固碳成本根据具体方式、可利用的地质环境以及运输成本等要素变动较大，欧洲碳捕获和封存项目的完全成本是50~90欧元/tCO₂，美国是60~90美元/tCO₂。今后若要大范围推广应用，仍需要通过科技创新降低成本以及国家相关政策支持。

3 矿业助力实现碳减排

3.1 大力推动煤炭供给侧结构性改革，推动煤炭高效清洁利用

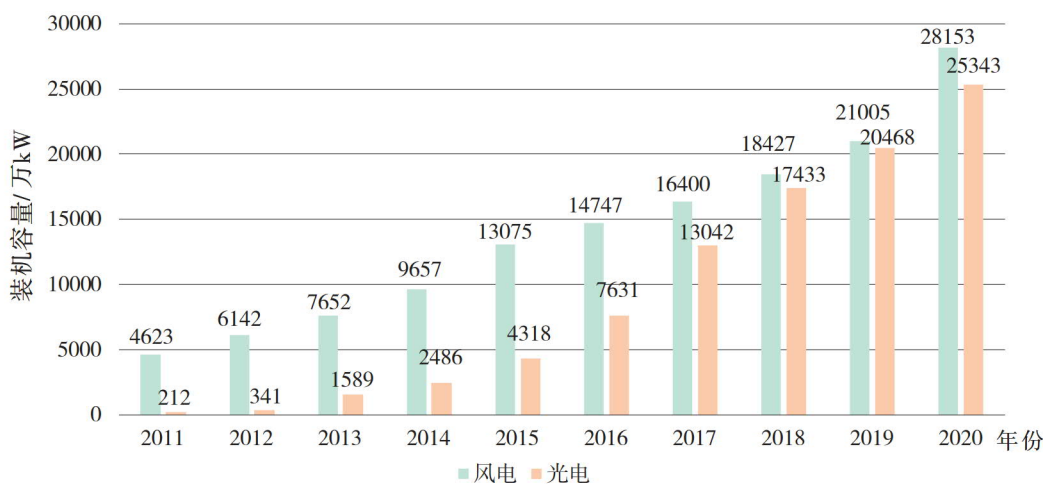
2010—2019年，我国以煤炭消费年均增长1.7%左右支撑了国民经济年均7%的增长，万元国内生产总值煤炭消费量由2010年的0.85t下降到0.45t。从

国家能源消费需求与能源结构优化调整方向看，“十四五”时期，我国煤炭消费总量将在40亿t~42亿t的峰值区间波动。应当说，通过节能降低煤耗和控制煤炭消费总量，既具有较大潜力，也是碳减排最重要的途径之一。“十三五”期间，国家实施系列措施推进煤炭供给侧结构性改革，从2016年到2018年底，煤炭行业累计化解过剩产能8.1亿t，提前完成去过剩产能目标任务。2019年煤炭由“总量性去产能”全面转入“结构性去产能、系统性优产能”的新阶段^[11]。

“十四五”期间，强化煤炭减量替代是国家统筹应对能源安全保障、生态环境保护和温室气体减排的关键举措。煤炭领域供给侧结构性改革的重点和政策着力点集中在两个方面：一是根据科学产能要求优化煤炭产能规模和生产布局。完善煤炭“科学产能”评价方法，有效指导区域煤炭开发规模与布局，不断提升科学产能的比例。继续关闭淘汰落后小煤矿，以及与保护区等生态保护红线冲突、安全事故多发的煤矿。以提高质量和效益为核心，发展工艺先进、生产效率高、资源利用效率高、安全保障能力强、环境保护水平高的科学产能，保障煤炭长期稳定供应。二是推动煤炭绿色开发和智能化生产，持续推动绿色矿山建设。严格以绿色化无害生产和煤矿区生态修复治理为标准，大力推进煤炭行业的绿色化生产水平，高标准建设绿色矿山。建立煤矿清洁生产评价体系，因地制宜推广充填开采、保水开采、煤与瓦斯共采等绿色开采技术。加强煤矿生产的智能化改造，建设智能矿山体系。做好传统煤炭产业与新产业的转换衔接，推进采煤沉陷区治理利用，利用采煤沉陷区、关闭退出煤矿工业场地发展现代农业、现代服务业等产业。

3.2 保障清洁能源产业发展所需关键资源，稳步推进能源结构转型

可再生能源将会是实现“碳中和”目标第一大贡献力量，中国对可再生能源的投资已经连续五年超过1000亿美元，稳居全球第一。在较高强度的投入下，“十三五”时期，我国可再生能源发电装机容量年均增长约12%，其中风电年均新增约3000万kW，光伏年均新增约5000万kW（图2）。



(数据来源：中国统计年鉴2020)

图2 2011—2020年中国风电光伏累计装机容量

在各种可再生能源利用技术中，对11种矿产品的需求量总体上有所增加，其中铁和铝的绝对增加值最高，其次是铜和锌。随着未来气候政策和技术应用变化，上述矿产品的需求量将相对增加。据世界银行《矿产品促气候行动：清洁能源转型的矿产消费强度》报告，为满足对清洁能源技术不断提高的需求，到2050年与清洁能源产业密切相关的矿产品（如石墨、锂和钴等）产量可能增加近500%。若为实现将全球升温控制在2℃以内的目标部署所需要的风能、太阳能等，将需要超过30亿t的矿产品和金属产品（表4）。虽然清洁能源技术需要更多矿产品，但矿产品生产的碳足迹（从开采到最终使用）只有化石燃料技术产生的温室气体排放量的6%^[6]。从这个方面看来，矿产资源的开发利用在一定程度上有助于能源结构转型进而有利于碳中和目标的实现。

3.3 通过能量存储与转化，提高可再生能源转化能力

能量存储与转化大概有三种形式：一是化学电池储能，可分为移动式 and 固定式。移动式储能主要为汽车提供动力，目前所用电池多为铅酸电池和锂离子电池。固定式储能电池目前以锂离子电池为主导，氧化还原液流电池是固定式储能领域的新兴技术。电池的阴阳极及电解液需要多种矿产，包括锂、钴、铝、铅、锰及石墨等。二是燃料电池储能。燃料电池分各种子技术，包括使用铂或钌

制成催化剂的子技术，电池的阳极、阴极和电解质中使用钌、钴、镧和钕等矿产。三是空间储能。利用废弃矿井进行压缩空气储能可以削峰填谷、消纳弃光弃风，为电网的稳定和风光发电的健康发展提供关键支撑。据估计，截至2019

年，若能利用全国已退役的30%废弃矿井的地下空间建设压缩空气储能机组，每对矿井可利用地下5万m³容积计算，储能总装机容量可达22500MW，相当于三峡电站的总装机容量。

“碳达峰、碳中和”必将加快推动风电、太阳能发电等新能源的跨越式发展。同时，高比例可再

表4 2018年矿产品产量和预计到2050年能源技术对矿产的年需求量

矿产	2018年产量 ^a /千t	预计2050年能源技术对矿产的年需求量/千t	预计2050年能源技术的年需求占2018年产量的百分比/%
铝	60000	5583	9
铬	36000	366	1
钴	140	644	460
铜	21000	1378	7
石墨	930	4590	494
铟	0.75	1.73	231
铁	1200000	7584	1
铅	4400	781	18
锂	85	415	488
锰	18000	694	4
钨	300	33	11
钼	23 ^b	8.4	37
镍	2300	2268	99
银	27	15	56
钛	6100	3.44	0
钒	73	138	189

注：a. 2018年产量数据均引自美国地质调查局。b. 数据来源于Deetman等（2018年）的研究成果。

生能源对电力系统灵活调节能力将提出更高要求，给储能技术发展带来新机遇。由于我国资源禀赋和用能负荷不均衡，加之新能源的时空不匹配，风电、光电大规模接入电网，其波动性和间歇性给电网带来的影响也被日趋放大。储能技术在发电时储存电能，然后根据需要进行调度，可为电力系统的安全稳定和高效运行提供支撑，同时移动储能可为电动汽车提供动力。根据IEA预测，2050年对储能的相对需求，特别是运输部门储能的相对需求将大幅上升。例如，在将全球升温控制在2℃以内情景下，储能需求将从2025年的4108GWh上升到2050年的22270GWh。

3.4 推广“地热能+”利用模式，多能互补助力能源结构调整

地热资源集水、矿、热于一身,是一种绿色低碳、可循环利用的可再生资源，具有储量大、分布广、清洁环保、稳定可靠等特点，是一种现实可行且具有竞争力的清洁能源^[2]。地热能开发利用对于促进能源革命、减少温室气体排放、改善生态环境具有重要意义，是未来能源转型的新方向。浅层地热能的开发在我国绝大部分地区普遍适宜，尤其适宜在北方夏热冬冷地区规模化开发利用，浅层和水热型地热能供暖（制冷）技术也已基本成熟。

我国地热能开发利用已走在世界前列，地热年利用率、直接利用量、浅层地热能供暖面积等指标连续多年位居全球第一。据调查，我国336个地级以上城市规划区浅层地热能资源年可开采量折合标准煤7亿t，可实

现建筑物供暖制冷面积320亿m²，水热型地热资源年可开采量折合标准煤19亿t。

4 碳中和导向下矿业转型与政策行动方向

4.1 构建应对气候变化的统一理念，引领全球矿业“碳中和”行动

应对气候变化正在从一个科学议题向一种价值观演变^[13]。在这一进程中，国际机构、非政府组织、学术团体以及商业咨询公司借助话语权优势，成为低碳发展水平的“裁判员”，并开始对国家、跨国企业以及重要行业的投资融资、生产经营形成实质影响。在能源矿产领域，欧洲企业事实上主导了行业特别是油气低碳发展方向的议题设置，其他国家和地区的企业总体处于跟随状态。中国矿业领域应在对国际低碳发展趋势深入分析的基础上，形成关于矿业应对气候变化认识的统一理念，在世界银行“气候智慧型矿业倡议”下，打造中国特色的气候智慧型矿业监管框架，同时建立易于大众接受的传播和表述方式，讲好应对气候变化的“中国矿业故事”，宣传中国矿业低碳发展的优良实践，为发展中国家矿业转型提供借鉴，为解决人类应对气候变化问题贡献中国的独特智慧和方案。(参见图3)

4.2 分类制定清洁能源转型所需关键矿产战



图3 气候智慧型采矿模块

略，确保应对气候变化行动所需资源安全

矿产特别是关键矿产将成为能源转型的重要基础之一。根据世界银行测算，尽管清洁能源技术各不相同，但其共同点是：与化石燃料发电相比，原材料耗用强度更大。要实现将全球变暖控制在2℃或以下，无论基于哪种技术缓解情景，可再生能源的快速和大规模部署都将导致矿产需求显著增加。对于能源转型所需关键矿产战略应分类开展研究，分别制定战略措施。开展关键矿产国际合作战略的相关研究，依托国际平台和国家战略进行学术合作，探讨国际矿产资源合作机制，防止突发事件导致资源短缺。依托上海期货交易所，研究中国关键矿产资源期货定价和现货定价机制。对关键矿产资源开发利用过程中造成的生态环境影响进行评估，并同步评估配套产业和环保政策。

4.3 加大绿色矿业开发科技创新，拓展低碳技术路径

依托国家工程技术研究中心、重点实验室及各级科技创新平台，支持和鼓励矿山企业、科研院所、高校等产学研有机融合，大力研发先进技术以适应碳中和目标的需要。在煤炭资源绿色开发、天然气水合物探采、油气与非常规油气资源开发、金属资源清洁开发等方面，突破并掌握一批核心关键技术。建立矿产资源节约和高效利用先进适用技术推广平台，畅通矿山企业获取先进技术信息渠道，引导研发单位指导矿山企业应用先进适用技术，实施技术工艺和设备升级改造，提高机械化、信息化、智能化水平。把促进清洁能源消纳、推动绿色低碳发展作为市场建设的关键目标，扩大市场主体范围，全面放开重点行业用户进入市场，研究打破省际壁垒，循序渐进形成统一市场规则，积极稳妥推进现货交易试点，努力构建清洁低碳、安全高效的能源体系。

4.4 通过“造链、补链、延链、强链”，打造新型矿业全产业链绿色发展链条

在矿产资源开发利用的全产业链条中，应以新技术、新业态、新模式为支撑，通过“造链、补链、延链、强链”，构筑资源绿色评价、绿色勘

查、矿山规划建设、资源开采与综合利用、矿山环境生态保护与修复等生命周期的全链条。科学合理地进行资源产业链的国土空间布局，构建资源节约与循环综合利用、清洁生产相协调的矿业产业发展体系，推动矿业产业结构更加优化、产品结构绿色高端，产业链、价值链从中低端向中高端迈进。

致谢：文章写作过程中，中国自然资源经济研究院院长张新安研究员给予悉心指导和宝贵建议，在此表示衷心感谢！

参考文献

- [1] 王伟光,郑国光.应对气候变化报告(2016):《巴黎协定》重在落实[M].北京:社会科学文献出版社,2016:1.
- [2] 王灿,张雅欣.碳中和愿景的实现路径与政策体系[J].中国环境管理,2020,12(6):58-64.
- [3] 第一财经.2060年中国“碳中和”目标的路径、机遇与挑战[EB/OL].(2020-11-18)[2021-03-21].<https://www.yicai.com/news/100843313.html>.
- [4] 吴青.考虑碳排放的我国矿业全要素生产率及其影响因素研究[D].北京:中国地质大学(北京),2017:40-45.
- [5] 中国自然资源经济研究院矿业绿色发展研究所.践行生态文明思想,加快矿业绿色发展[N].中国自然资源报,2021-03-04(03).
- [6] 世界银行.矿产品促气候行动:清洁能源转型的矿产消费强度[R].世界银行,2020.
- [7] 自然资源部.我国初步形成生态修复新格局[N].央视快讯,2021-02-21(02).
- [8] LU FEI,HU HUIFENG,SUN WENJUAN,et al.Effects of national ecological restoration projects on carbon sequestration in china from 2001 to 2010[J].Proc Natl Acad Sci U S A,2018,115(16):4039-4044.
- [9] 以自然为本的解决方案:企业实现碳中和的机遇[R].新加坡:淡马锡国际私人有限公司,2021.
- [10] 蔡博峰,李琦,林千果,等.中国二氧化碳捕集、利用与封存(CCUS)报告(2019)[R].北京:生态环境部环境规划院气候变化与环境政策研究中心,2020.
- [11] 丛书编写组.推进绿色循环低碳发展[M].北京:中国市场出版社,2020:193-206.
- [12] 强海洋.北京市地热资源开发利用问题研究[J].上海国土资源,2018,39(1):60-63.
- [13] 洪大用.中国应对气候变化的努力及其社会学意义[J].社会学评论,2017,5(2):3-11.