DOI 10.15302/J-SSCAE-2023.05.012

煤矿能源资源高效利用发展研究

吕超贤[1]，孙文[1]，宋关羽[2,3*]，于浩[2,3]，王成山[2,3]

（1. 中国矿业大学电气工程学院，江苏徐州 221116；2. 天津大学电气自动化与信息工程学院，天津 300072；
3. 智能电网教育部重点实验室，天津 300072）

摘要：随着我国“双碳”进程的不断推进，煤炭行业亟需寻求低碳发展路径，利用煤矿能源资源优势，实现物质–能量的循环转化，提高能源资源的利用效率。本文从煤矿能源资源高效利用的角度出发，分析了煤矿能源资源利用的现状，凝练了煤矿能源资源利用面临的挑战与发展趋势，探讨了煤炭及共伴生资源高效利用、煤矿生产多环节物质–能量循环利用模式、资源动态演化下煤矿物质–能量循环高效利用拓扑构建方法、煤矿综合能源系统优化调度等关键技术，分阶段阐述了煤矿能源资源高效利用的发展路径。研究建议，加强政策引导与技术创新，促进煤炭共伴生资源及地下空间的高效利用；推进煤矿综合能源微网建设，优化能源组合及碳捕集、利用与封存技术应用；开发煤矿综合能源微网精细化调度平台，推动煤矿能源资源安全高效利用。

关键词：煤矿能源资源；伴生资源；高效利用；物质–能量循环；综合能源微网

中图分类号：TD82　　**文献标识码：**A

Efficient Utilization of Energy Resources in Coal Mines

Lyu Chaoxian[1], Sun Wen[1], Song Guanyu[2,3*], Yu Hao[2,3], Wang Chengshan[2,3]

(1. School of Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China;
2. School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3. Key Laboratory of the Ministry of Education on Smart Power Grids, Tianjin 300072, China)

Abstract: The coal industry in China urgently needs to seek a low-carbon development path as the country continues to promote its carbon peaking and carbon neutrality goals. By utilizing the advantages of energy resources in coal mines and achieving material–energy cycle transformation, the utilization efficiency of energy resources can be improved. This study starts from the perspective of efficient utilization of coal mine energy resources, analyzes the current status of coal mine energy resource utilization, and summarizes the challenges and trends of coal mine energy resource utilization. It explores key technologies for the efficient utilization of coal and coal-associated resources, multi-link material–energy cycle utilization mode in coal mine production, topology construction method for efficient utilization of material–energy cycle in coal mine under dynamic evolution of resources, and optimization and scheduling techniques for integrated energy systems in coal mines. The development path for the efficient utilization of energy resources in coal mines is expounded by stages. Furthermore, research suggests that policy guidance and technological innovation should be strengthened to promote the efficient utilization of coal, coal-associated resources, and underground space. A

收稿日期：2023-08-07；**修回日期：**2023-10-13

通讯作者：*宋关羽，天津大学电气自动化与信息工程学院高级工程师，研究方向为智能配电系统仿真分析与运行优化；
E-mail: gysong@tju.edu.cn

资助项目：中国工程院咨询项目“我国煤炭行业碳中和发展科学体系及战略路径研究”(2022-XBZD-09)

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

coal mine integrated energy microgrid should be built, and the optimal combination of energy sources and the application of carbon capture, utilization and storage (CCUS) technology should be promoted. A fine scheduling platform for coal mine integrated energy microgrid should be developed to promote the safe and efficient utilization of energy resources in coal mines.
Keywords: energy resources in coal mines; coal-associated resources; efficient utilization; material–energy cycle; integrated energy microgrid

一、前言

我国是能源消费及进口大国，面对错综复杂的外部环境以及“双碳”战略目标牵引下的能源转型进程，需深入推进能源革命，加强能源“产–供–储–销”体系建设，确保能源安全[1]。因此，丰富能源供给形式、提高能源利用效率、加强多种能源之间的协同互补能力成为保障能源安全的必然选择[2-4]。煤炭作为我国的重要能源，在较长时期内其主导地位不会改变。然而，随着我国经济的快速发展，全社会对能源需求的规模及多样性持续增加，煤炭产业高耗能、高污染的特性制约了其可持续发展路径的开展。近年来，煤炭行业迎来了前所未有的低碳转型挑战机遇，我国在重视和推动煤炭行业的转型发展的同时，给予了多项政策倾斜与支持。2021 年，国家能源局、科学技术部印发的《“十四五”能源领域科技创新规划》提出，开展涌水、低浓度瓦斯、矿井余热等能源资源利用相关示范[5]。2022 年，国家发展和改革委员会、国家能源局在《关于完善能源绿色低碳转型体制机制和政策措施的意见》中指出，完善煤矸石、涌水、矿井瓦斯等资源综合利用政策，鼓励利用煤矿资源优势开展新能源及储能项目的建设[6]。2022 年，中央经济工作会议提出，把握以煤为主的基本国情，抓好煤炭清洁高效利用，提高新能源消纳能力，促进煤与新能源的优化组合[7]。

煤矿能源资源种类多，电、热、冷、气等用能需求多样，但由于煤矿区较为粗放的能源管理方式以及分散的能源供给策略，使源端大量能源资源难以与多元需求相匹配，造成了资源浪费和额外的碳排放。近年来，国内外在煤矿能源资源高效利用方面做了大量研究，主要集中在煤矿能耗分析、资源利用、煤矿综合能源系统等方面，如美国已准备将煤矿转变为清洁能源中心，计划在煤矿建设光伏、风力等多种清洁能源电站[8]；我国煤矿能源资源利用仍处于起步阶段，相关资源的利用效率、清洁化利用水平等有待提升。

进一步发挥煤矿能源资源禀赋优势，通过物质–能量循环利用和优化调度策略，提升煤矿能源资源利用效率是未来实现煤矿能源资源高效利用的研究重点。本文在梳理煤矿能源资源利用现状的基础上，分析其面临的挑战及未来的发展趋势，总结煤矿能源资源利用的关键技术与发展路径，并提出发展建议，以期为推动煤炭行业低碳发展研究提供参考。

二、煤矿能源资源利用现状

（一）能源资源现状

根据性质和产生方式的不同，可以将煤矿能源资源分为常规资源、煤炭伴生资源和其他资源 3 类。

1. 常规资源

常规资源主要包括煤炭、太阳能、风能、地热能等。我国煤矿主要分布在华北、西北地区，分布区域与太阳能、风能、地热能等新能源资源富集区高度吻合，在地理空间上存在较大的重合性。根据我国煤炭资源储量排名前十的省份所对应的新能源资源储量情况来看（见图 1）[9]，在煤炭资源丰富的地区，其太阳能、风能资源在全国的占比超过 80%，地热资源在全国的占比超过 50%。

2. 煤炭伴生资源

煤炭伴生资源由煤炭开采衍生而来，主要包括

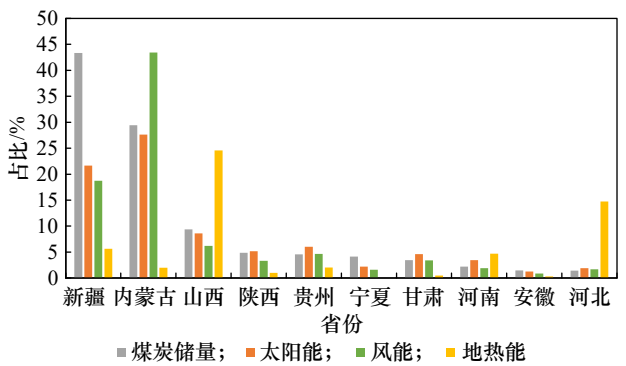
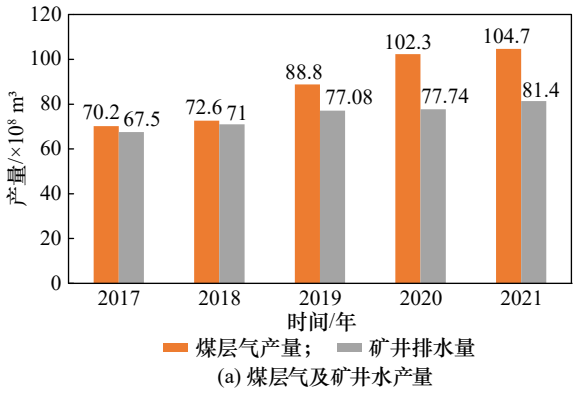


图 1　我国煤炭资源储量排名前十的省份对应的新能源资源情况

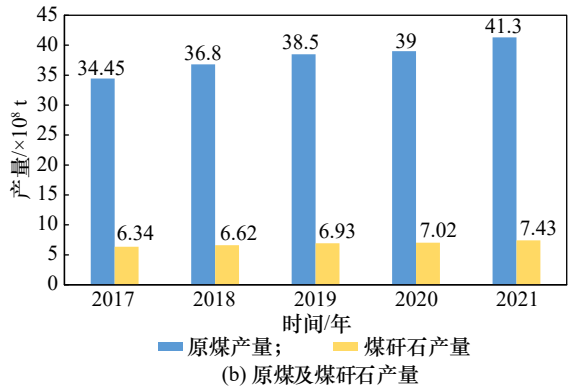
煤矸石、煤层气（煤矿瓦斯）、乏风瓦斯、涌水等。其中，煤矸石来源于采煤、洗煤过程中排放的固体废弃物，主要成分为Al_2O_3、SiO_2以及含有铁、钙等的氧化物[10]；我国煤矸石的产量大，2021年的产量约为7.43×10^8 t。煤层气来源于煤和围岩中的CH_4、CO_2和N_2的混合气体，属于非常规天然气，是一种新型清洁能源[11]；我国每年直接排放的低浓度瓦斯总量约为1.32×10^9 m³[12]。乏风瓦斯又称煤矿风排瓦斯，是瓦斯浓度低于0.75%的煤矿瓦斯，虽然浓度极低，但其排放量很大，我国每年排入大气中的乏风瓦斯超过1.5×10^{10} m³[13]。涌水是在矿井开采过程中，大气降水、地下水等通过各种通道涌入井下所形成的[14]。图2为2017—2021年我国原煤及伴生资源矿井的产量情况[15~17]。由图2可知，我国原煤产量在持续增长的同时，煤炭伴生资源产量也随之增长。

3. 其他资源

煤矿区的其他资源主要是空气压缩机余热、矿井地下空间和地表塌陷区等。空气压缩机余热资源指煤矿空气压缩机工作过程中产生的高温高压油气混合物所带来的热能，温度通常为80~100 ℃，约占空气压缩机输入电能的80%~93%，属于能源转换过程中的余热[18]。矿井地下空间是由井下设备转移或矿井开采结束所留下的地质空腔，多分布在废弃/关闭的矿井中。地表塌陷区是由矿山开采结束后，采空区上方覆岩层应力平衡受到破坏所形成的地表塌陷区域，在废弃/关闭矿井中较为常见。目前，我国待开发利用的废弃矿井约有10 000多处，矿井地下空间资源超过1.56×10^{10} m³，每年新增煤矿地表塌陷区面积超过60 000 km²[19,20]。“十五”时期以来，我国废弃/关闭的矿井数量情况如图3所示，预计2030年我国废弃/关闭矿井数量将达到15 000处[21,22]。



(a) 煤层气及矿井水产量



(b) 原煤及煤矸石产量

图2　2017—2021年我国原煤及伴生资源产量情况

（二）能源需求特性

按开采方式的不同，煤矿可分为井工煤矿和露天煤矿两类。我国主要以井工煤矿开采为主，这两类煤矿的能源资源特性如下。

1. 井工煤矿

井工煤矿能源需求按功能区的不同，可分为生产区负荷和生活区负荷，各功能区内均包含电、热、冷、气等能源需求（见表1）。井工煤矿生产区负荷具有鲜明的峰谷时段特征，即采煤时段用能较多，非采煤时段（检修期）用能较少。井工煤矿电负荷主要包含采煤机、刮板输送机、皮带运输机、抽水泵、通风机等；由于煤炭开采机械设备种类多、功率容量大，生产区负荷的电能需求占煤矿总电能需求的绝大部分[23]。井工煤矿热负荷包括井筒防冻、建筑采暖以及洗浴热水供应，其中井筒防冻主要是应对寒冷季节或寒冷地区可能发生的冻结现象；全时段洗浴热水供应则是为保障矿工在煤矿三班倒工作制下的洗浴需求。以某12 Mt/a的井工煤

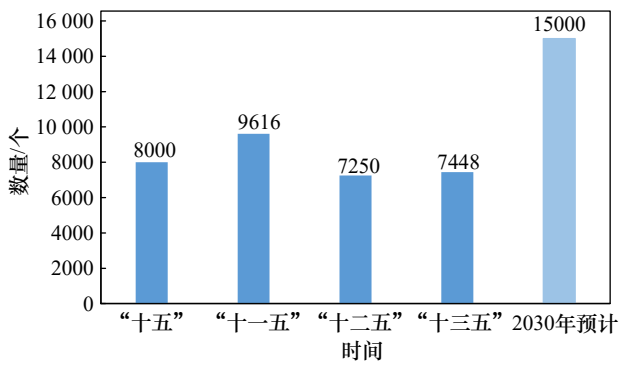


图3　“十五”以来我国废弃/关闭矿井数量

表1 井工煤矿多元用能需求

能源类型	生产区	生活区
电	采煤机、刮板输送机、破碎机、转载机、皮带运输机、给煤机、抽水泵、瓦斯抽放泵、通风机、洗选煤厂等	水源热泵、地源热泵、空气源热泵、公寓等
热	井筒防冻、井下硐室、职工澡堂等	餐厅、公寓、办公楼等
冷	井下供冷、生产建筑等	行政及辅助建筑等
气	燃气锅炉、注氮站	餐厅

矿为例，其总用电负荷为53 529.78 kW，其中生产区负荷为52 426.48 kW，占总用电负荷的97.94%；在−17 ℃条件下，该煤矿的总热负荷为21 162 kW，其中井筒防冻、采暖、热水供应占比分别为53.7%、39.7%、6.6%[24]。井工煤矿冷负荷主要包括井下供冷、建筑供冷等。受开采深度、地热、设备散热等因素影响，在井下温度较高的地区需通过供冷操作，降低井下环境温度以保障工人的生命安全。此外，井工煤矿还存在天然气、N_2等与煤矿生产紧密相关的能源需求。

2. 露天煤矿

露天煤矿在穿爆、采装、运输、排土、辅助以及办公建筑等方面存在用能需求（见表2），主要是机械设备对能源的消耗，其中以柴油和电力为主以及少部分的汽油。以某20 Mt/a的露天煤矿为例，其年度电力总能耗为8.295×10^7 kW·h，柴油总能耗为73 154 t，汽油总能耗为279.5 t[25]。

（三）资源利用现状

1. 常规资源

目前，煤矿常规资源利用主要包括燃煤发电、光伏发电、风力发电、地热资源开发等，以实现传统火力发电与新能源发电的耦合。① 燃煤发电，利用传统燃煤机组，将煤的化学能转化为电能。② 光伏发电，在煤矿建筑屋顶及周边空地布置光伏板，增加煤矿能源供给形式，如新疆哈密大南湖二矿分布式光伏项目。③ 风力发电，通过在煤矿周围风能富集区建设风力发电单元，实现对煤矿的电能供给，如加拿大Raglan矿井大型风能发电系统。④ 地热资源，利用矿井井下生产优势，在建井时兼顾地热资源的开发，根据矿井地温赋存差异，进行矿井水、岩温、混合型地热的开发利用[9]。

表2 露天煤矿多元用能需求

能源类型	设备
电力	钻机、电铲、办公楼等
柴油	装卸机/反铲、自卸卡车、推土机、平路机、洒水车、压路机等
汽油	调度车等

2. 煤炭伴生资源

煤炭伴生资源与煤炭开采息息相关，是煤矿最具开发利用潜力的一类能源资源。① 煤矸石经预处理后可回收其中的煤、黄铁矿等有用矿物；也可用作矸石发电的原材料，产生的灰渣可作为砖块、路基、土壤改良剂、充填煤矿沉陷区等材料。近年来，随着煤矸石发电、制砖、充填等规模性消纳项目的实施，煤矸石综合利用率持续增长，2021年我国综合利用的煤矸石约为5.43×10^8 t，综合利用率达73.1%[16]。② 煤层气按所含瓦斯浓度的不同，分为低浓度瓦斯（浓度为1%~30%）、抽采瓦斯（浓度为30%~80%）和高浓度瓦斯（浓度为80%~100%）。低浓度瓦斯多用于蓄热氧化、燃烧发电或提纯后利用；抽采瓦斯经煤水气分离装置分离出其中的水气后，可用作民用及化工原料；高浓度瓦斯可作为燃料，直接经管道外输加以利用[26]。目前，我国煤矿瓦斯综合利用率不足50%，今后的可利用空间较大。山西省能源局在《关于推动煤矿瓦斯综合利用的指导意见》中提出，到2025年力争全省瓦斯利用率达到50%[27]，煤矿瓦斯的高效利用任重道远。③ 乏风瓦斯的主要利用方式是蓄热氧化、余热回收等。蓄热氧化技术通过蓄热氧化装置将乏风中低浓度瓦斯转换为热能，余热回收则是通过热泵提取矿井回风中的低温废热。我国乏风氧化技术在山西、陕西等省份已实现工业化运行[11]，但由于乏风瓦斯排放总量显著，实现乏风瓦斯的完全利用仍有困难。④ 矿井涌水的利用方式包括余热回收和净化利用。余热回收一般通过热泵回收矿井排水中的低温余热；净化利用则是对矿井水进行净化除杂，用于喷

洒除尘、绿植灌溉等。目前我国煤矿矿井涌水的平均利用率约为35%[28]，水资源浪费情况较为严重。

3. 其他资源

① 煤矿空气压缩机余热资源的利用方式主要有热风直接利用和热水直接利用[18]，资源回收利用效率较高，但由于涉及设备建设或改造、大量资金投入等，尚未在煤矿区广泛推广和应用，余热资源利用潜力有待提升。② 矿井地下空间通常可以进行储能（抽水蓄能、压缩空气储能等）、封存CO_2，也可以改造为地下实验室、地下养殖、人防工程等。③ 煤矿地表塌陷区资源主要围绕经济与生态功能进行开发利用，包括新能源开发、农林复垦、水产养殖、水库蓄水等[21]。由于矿井地下空间、煤矿地表塌陷区资源利用属于煤炭开采后期，资源利用对于煤矿企业而言不具有显著的经济效益，导致大量废弃矿井资源遭到浪费。

三、煤矿能源资源利用面临的挑战与发展趋势

（一）煤矿能源资源利用面临的挑战

1. 煤炭伴生资源的综合利用水平较低

煤炭伴生资源种类丰富、总量大，利用效率不高。对于单类伴生资源而言，即使70%的综合利用率，也会造成大量的资源浪费与环境污染，因此，单个伴生资源的综合利用水平仍需进一步提升。煤矿各伴生资源分散分布的特点决定了其分散利用的格局，不能充分发挥各伴生资源能源品位及时空分布优势，因此，对于多类型煤炭伴生资源而言，其多资源聚合模式以及耦合利用机理有待进一步探明。

2. 资源动态演化下煤矿多环节物质–能量耦合传输链路尚不清晰

煤矿资源动态演化导致全生命周期内煤矿运行场景的复杂多样性，加之随着煤矿生产多环节能量输入与物质产出的差异性、生产及生活用能中各能流的强耦合特性，使得煤矿多环节物质–能量耦合传输链路愈加混杂不清。此外，对煤矿物质生产和能量耦合的特性和调控机制缺乏清晰的认识，难以优化和调节链路中的各个环节以实现煤矿物质–能量的高效耦合利用。

3. 缺少精细化调度手段和平台支撑

煤矿生产用能的高安全性以及能源资源利用的高效性都要求煤矿能源系统需具备精细化调度能力，以精准约束各能源设备出力及生产用能行为。目前，煤炭及伴生资源产量、各环节生产用能等多类型物质–能量数据的采集、记录与存储方式各异，缺少统一的数据集成分析平台作支撑，难以实现有效的数据集成和共享，限制了系统精细化调度的实施。

（二）煤矿能源资源利用趋势

1. 供能多元化

随着对煤矿新能源资源及煤炭伴生资源的持续开发利用，煤矿将逐渐形成以煤炭为主体、电力为核心、多种能源资源协同供能的综合供能体系。该体系包括传统燃煤发电、太阳能及风能发电、太阳能等新能源供热、煤炭伴生资源高效转化等多种供能形式，在提高煤矿能源资源利用效率的同时将煤矿区打造为集传统能源与新能源为一体的综合能源供能网络。

2. 用能清洁化

近年来，水电、风电、光伏发电等新能源装机规模不断攀升，终端用能清洁化水平大幅提升。同时，煤矿负荷端燃油、燃气等碳排放环节逐渐被电力设施替代，用能更加清洁。随着煤矿综合供能网络的逐步完善，形成了源端以多种清洁能源为主的供能形式，满足了煤矿及周边城镇多元负荷用能需求，提高了煤矿清洁化用能水平。

3. 生态友好化

煤矿在开采结束后，仍赋存着大量的煤、水、气、地热、地下空间等多种可利用资源，可发挥废弃/关闭矿井土地资源、遗留资源赋存及设施优势，采用土地资源利用、生态修复、新能源开发、土地复垦等措施，实现废弃矿井的精准开发利用，优化当地能源产业结构，推动废弃矿井资源型城市转型发展，助力美丽中国建设。

四、煤矿能源资源高效利用的关键技术与发展路径

（一）煤矿能源资源高效利用的关键技术

1. 煤炭及共伴生资源高效利用技术

（1）煤炭清洁高效利用技术主要包括煤炭清洁高效转化、先进燃煤发电技术。煤炭清洁高效转化

涵盖煤洗选加工、煤制液体燃料及化工品、煤炭气化及煤与有机物协同气化、煤转化过程中多种污染物协同控制。先进燃煤发电技术主要有超超临界发电、整体煤气化燃气蒸汽联合循环（IGCC）、整体煤气化燃料电池联合循环（IGFC）等。煤炭及共伴生资源的高效利用，可实现煤炭洗选、加工、废弃物利用、发电等全过程清洁低碳，提高煤炭的清洁化利用水平。

（2）煤矸石高效利用技术。将煤矸石经粉碎、分选、喂料、燃烧、发电等工艺，驱动蒸汽轮机带动发电机产生电能，使其中的可燃物质或化合物转化为可供煤矿生产生活使用的电能。我国已建成陕西煤业化工集团有限责任公司2×300 MW低热值资源综合利用发电厂、中煤平朔集团有限公司2×660 MW煤矸石发电厂等发电项目，其中后者每年可消纳煤矸石约5.1×10^6 t，发电约6.6×10^9 kW·h，供热约1×10^{16} J，显著提高了煤矸石的综合利用水平。

（3）煤层气高效利用技术。煤层气的高效利用方式由其所含甲烷的体积分数决定。体积分数≥8%的煤层气可用于瓦斯发电，矿井抽采出的煤层气经水封、燃气脱硫、排空等操作后进入燃气发电机组燃烧发电；体积分数在0.75%~8%的煤层气可用于氧化发电；通常将体积分数在8%以下的低浓度瓦斯与乏风瓦斯掺混至体积分数为1%~1.2%后，通过蓄热氧化机组回收氧化后产生的高温烟气余热进行供热或推动蒸汽机发电。我国已建成晋煤控股集团有限公司胡底10 MW高浓度瓦斯发电厂、阳泉煤业（集团）股份有限公司二矿桑掌15 MW低浓度瓦斯氧化发电厂等发电项目，其中后者每小时可氧化利用5.4×10^5 m³级的低浓度瓦斯，年发电总量可达1.2×10^8 kW·h，显著提升了煤层瓦斯的利用水平。

（4）乏风瓦斯高效利用技术。乏风中的甲烷浓度极低（在0.75%以下），通常将乏风送入蓄热氧化装置中发生蓄热氧化反应，同时释放大量的热能，经热交换后乏风中低浓度瓦斯蕴含的化学能转化为可供煤矿使用的热能。此外，乏风温度受矿井通风循环系统影响，略高于环境温度，可采用热泵提取矿井回风中的低温热能供煤矿生产生活使用。我国已建成淮南矿业（集团）有限责任公司谢桥煤矿8×500 kW低浓度瓦斯氧化供热项目、潞安集团高河能源有限公司30 MW低浓度瓦斯氧化发电厂，其中，后者通过瓦斯氧化炉、余热锅炉及相关辅机等设备，每年可节约标准煤15 000 t以上，降低了乏风瓦斯直排对环境的污染。

（5）涌水高效利用技术。受矿井的天然地质条件影响，涌水温度常年保持稳定，是一种较为稳定的低品质热能，因此可以采用热泵对其进行余热回收，通过少量的电能消耗即可将涌水所蕴含的低品位热能转化为可供煤矿生产生活使用的高品质热能，具有节能、环保、一机多用、可靠性高等特点。目前，太原煤气化龙泉能源发展有限公司、淮北矿业（集团）有限责任公司信湖煤矿配备了多台水源热泵机组以回收矿井排水余热供煤矿使用，其中，前者在供暖季可节约标煤1100 t，实现了对煤矿热能的清洁供应。

（6）采煤塌陷区及废弃矿井利用技术。采煤塌陷区及废弃矿井拥有大量的土地/空间资源，加之煤炭产区与新能源分布区具有重合性，可在采煤塌陷区上新建光伏、风机等，为煤矿提供清洁电能。废弃矿井则围绕地下空间储能、新能源开发、CO_2封存技术进行高效利用。加强采煤塌陷区及废弃矿井利用技术的应用和落地，提升煤矿区的生态治理能力，促进资源型城市转型升级。

综上所述，以高效能量转化装置为基础，资源利用技术为支撑，对煤炭及共伴生资源进行回收利用，以期提高煤炭伴生资源的利用水平，实现煤矿能源资源的梯级利用。

2. 煤矿生产多环节物质–能量循环利用模式

煤矿包含诸多特殊的能源生产和消费行为，尤其是在煤炭伴生资源利用环节，既利用矿井生产过程产生的煤矸石、乏风、涌水等资源，同时也消耗外部电能来驱动带式运输机、通风机、抽采泵等生产设备，因此，煤炭伴生资源与其他多形态能源间存在强耦合特性。鉴于此，煤矿生产多环节物质–能量循环利用模式在解析矿井异质资源物质流动和能量循环关系的基础上，通过煤矿能量耦合环节多能转化设备聚合煤矿地面及井下的风、光、热、气等能源资源，将煤炭伴生资源转化为可供煤矿使用的电、热、冷等。同时，全面剖析煤矿能源生产和消费特征，辨识煤矿用能关键环节，基于源荷状态信息、关键环节能量–物质连接模式与耦合机理，形成从源端资源利用到荷端能源需求的全环节物质–能量循环利用模式，实现煤矿能源资源的自主循环利用。

3. 资源动态演化下煤矿物质–能量循环高效利用拓扑构建方法

煤矿生产具有鲜明的周期性，如前期建井、中期开采、后期关闭，各时期内伴生资源赋能特征、能源产销特性等具有较大差异。以煤矿中期开采为例，随着煤炭的持续开采，井下工作面的新增与关闭、地质空间环境变化等都会引起煤炭伴生资源赋能特征、生产用能行为以及系统拓扑结构的改变。因此，在煤矿资源动态演化条件下，围绕煤矿全生命周期内物质生产全流程以及多环节能量耦合模式，可以构建煤矿物质–能量循环高效利用拓扑架构。目前，太原煤气化龙泉能源发展有限公司根据现阶段煤矿开采特征，拟构建的煤矿拓扑结构如图4所示。该结构充分考虑煤矿生产特性，以满足煤矿开采、生产、生活办公等的电、气、冷、热需求为主要目标，通过伴生资源和其他可利用能源资源之间的多能互补综合利用，提升煤矿能源利用效率、能源供给可靠性，促进煤矿能源系统向绿色低碳的综合能源微网发展。

4. 煤矿综合能源系统优化调度技术

与传统综合能源相比，煤矿存在能源供给可靠性要求极高、多种伴生资源与可再生能源共存、物质–能量各环节高度耦合等特殊性和复杂性，这使得煤矿综合能源优化调度技术需更多地关注煤矿供能与生产安全、异质资源间的资源协调利用、能量与生产耦合环节的耦合特性等方面。通过解析煤矿能源资源禀赋特性、识别能量与生产的核心环节、提取多元负荷耦合特征以及区分运行场景变化等，可以实现对煤矿综合能源系统的深层剖析。在构建煤矿综合能源系统优化调度模型时，通过以煤矿供电和供热/冷等的安全可靠性、煤矿能源资源利用效率、能源生产及消费成本等经济性指标，或以碳、污染物排放量等环保性指标，确定需要优化的目标；然后，考虑煤矿能源转化设备的出力约束、物质–能量各环节耦合约束以及系统各类用能行为约束，尤其是与生产强相关的安全性约束，如通风机、抽水泵、瓦斯抽放泵等。根据模型呈现的大规模、强耦合、非线性等特征，选取合适的求解方法进行模型求解，生成可指导煤矿生产、能源产出、用能行为的能源资源分配方案，促进煤矿能源资源的高效利用[29~33]。

（二）煤矿能源资源高效利用的发展路径

根据能源资源关键技术的发展水平及国家政策

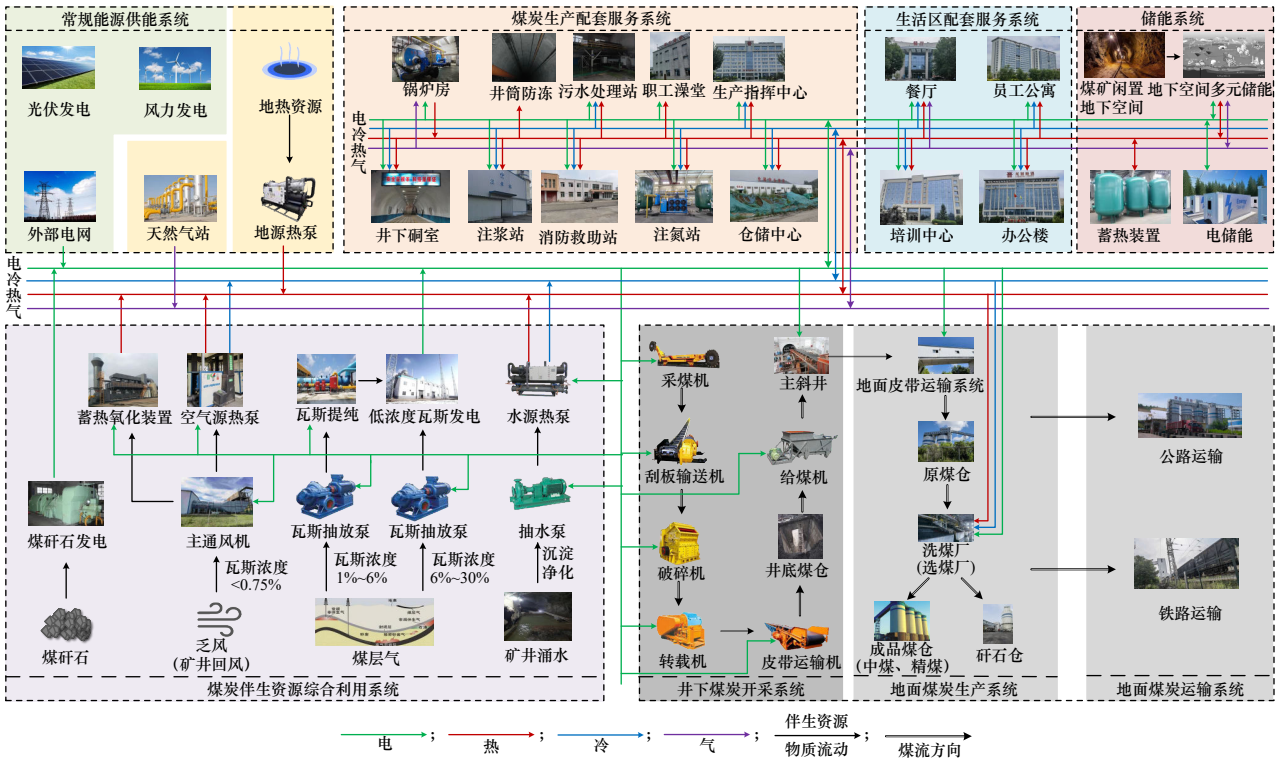


图4　基于煤矿生产特性的煤矿综合能源系统能源资源高效利用拓扑结构

导向等因素，可将煤矿能源资源高效利用发展路径划分为以下3个阶段。

工程示范阶段：2023—2025年，融合多种资源高效利用技术，构建煤矿多能互补体系，推进煤与共伴生资源协同开发利用。该阶段煤矿开发建设需与国家能源领域政策相结合，以提高煤、煤矸石、煤层气、涌水等矿山基础能源的综合利用效率为目标，推动煤炭清洁转换、伴生资源高效利用等技术的发展，重点攻关IGCC、IGFC等先进燃煤发电技术、高性能热泵技术等，积极探索煤矿资源耦合利用循环模式，为煤矿综合能源系统应用推广提供理论支持。

应用推广阶段：2025—2030年，在国家相关政策的支持下，在条件良好的煤矿推广综合能源系统。利用煤矿自身能源资源优势，加强煤矿企业与高校、科研院校之间的合作，重点推进煤与伴生资源、新能源耦合发展，实现煤矿物质–能量循环。在应用推广过程中检验相关能源技术应用的效果，总结出煤矿不同资源禀赋下的技术集成形式，为规模化应用阶段提供案例参考。

规模化应用阶段：2030年后，煤矿综合能源系统初具规模，并协同煤电、煤化工等煤炭上下游产业形成煤基综合能源基地。以风、光资源为依托，匹配煤电支撑性调节电源，深入推进煤基综合能源与新能源的优化组合。推动煤基多元清洁能源协同开发、煤基风光互补多元协同运行、高效大规模多元储能、碳捕集利用与封存（CCUS）等技术融合，促进煤炭清洁低碳利用，优化能源结构，实现能源资源高效利用。

五、发展建议

（一）加强政策引导与技术创新，促进煤炭共伴生资源及地下空间的高效利用

建议国家主管部门出台相关政策，明确伴生资源开发利用的要求和标准，加大对煤炭及共伴生资源利用的研发投入，推动技术创新和示范应用。加大煤炭清洁高效转化及先进燃煤发电技术的研究力度，开展煤矸石、煤层气、乏风瓦斯、涌水等伴生资源高效能量转化技术及设备的研制，积极探索多种伴生资源聚合利用的方式方法与耦合机理。鼓励企业自发高效、安全、梯级利用煤炭伴生资源，提高煤炭及共伴生资源的综合利用效率和附加值。探究矿井废弃空间资源利用方式，推进循环减碳技术、大规模地下储气技术与煤矿能源体系相结合，延伸煤炭行业产业链。

（二）推进煤矿综合能源微网建设，优化能源组合及CCUS技术应用

在把握煤矿资源动态演化规律的基础上，深入开展煤矿生产多环节物质–能量循环利用模式、耦合链路及拓扑构建方法研究。加强煤矿物质生产与能源消费之间的联系，根据煤矿资源动态变化情况合理匹配源荷资源。协同煤炭、电力、热力、光伏发电、风电等不同能源系统的配置和集成，确保煤矿能源微网在电力供需、能源配置、市场交易等方面与煤矿整体能源系统相协调。推动煤炭与新能源优化组合、物质–能量自主循环、CCUS等相关技术创新，将CCUS技术与电转气、地下储气技术相融合，利用CCUS装置捕集煤矿综合能源微网产生的CO_2，用作电转气甲烷化反应环节的原料以生成CH_4，额外的CO_2进行就地封存，实现煤矿综合能源微网循环减碳。

（三）开发煤矿综合微网精细化调度平台，推动煤矿能源资源安全高效利用

建立煤矿综合能源微网精细化调度平台，将煤炭及伴生资源产量、能源出力、各生产环节用能等信息纳入平台，实现煤矿多类型数据的集成、共享与生产全流程的运行监控，从而精准掌握煤矿物质–能量耦合变化关系，实现煤矿刚性负荷的可靠供给，保障煤矿生产运行安全。同时以精细化调度手段、智能算法、优化模型等技术为支撑，充分发挥煤矿多环节、多资源的调动能力，实现多阶段源端能源出力与荷端多元用能的精准匹配，提高煤矿安全、低碳运行水平。

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: August 7, 2023; **Revised date:** October 13, 2023

Corresponding author: Song Guanyu is a senior engineer from the School of Electrical and Information Engineering of Tianjin University. His major research fields include the simulation analysis and operation optimization of active distribution networks. E-mail: gysong@tju.edu.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Research on Scientific System and Strategic Path of Carbon Neutral Development

of China's Coal Industry" (2022-XBZD-09)

参考文献

[1] 王轶辰. 能源安全保障有力 [N]. 经济日报, 2022-12-19 (01).
Wang Y C. Strong energy security guarantee [N]. Economic Daily, 2022-12-19 (01).

[2] 王成山, 吕超贤, 李鹏, 等. 园区型综合能源系统多时间尺度模型预测优化调度 [J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(23): 6791–6803, 7093.
Wang C S, Lyu C X, Li P, et al. Multiple time-scale optimal scheduling of community integrated energy system based on model predictive control [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(23): 6791–6803, 7093.

[3] 吕超贤, 孙文, 梁睿, 等. 基于信息间隙决策理论的含电转气煤矿综合能源系统鲁棒调度 [J/OL]. 高电压技术: 1–13 [2023-10-01]. https: //doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20230358.
Lyu C X, Sun W, Liang R, et al. Information gap decision theory-based robust scheduling of coal mine integrated energy [J/OL]. High Voltage Engineering: 1–13 [2023-09-04]. https: //doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20230358.

[4] 王成山, 王丹, 李立涅, 等. 需求侧智慧能源系统关键技术分析 [J]. 中国工程科学, 2018, 20(3): 132–140.
Wang C S, Wang D, Li L C, et al. Key technology analysis of demand-side smart energy system [J]. Strategic Study of CAE, 2018, 20(3): 132–140.

[5] 国家能源局, 中华人民共和国科学技术部. "十四五"能源领域科技创新规划 [EB/OL]. (2021-11-29)[2023-10-01]. https: //www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-04/03/5683361/files/489a4522c1da4a7d88c4194c6b4a0933.pdf.
National Energy Administration, Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China. "14th Five-Year Plan" scientific and technological innovation plan in the field of energy [EB/OL]. (2021-11-29)[2023-10-01]. https: //www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-04/03/5683361/files/489a4522c1da4a7d88c4194c6b4a0933.pdf.

[6] 中华人民共和国国家发展和改革委员会, 国家能源局. 关于完善能源绿色低碳转型体制机制和政策措施的意见 [EB/OL]. (2022-01-30)[2023-10-01]. https: //www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-02/11/content_5673015.htm.
National Development and Reform Commission of the Peaple's Republic of China, National Energy Administration. Opinions on improving institutional mechanisms and policy measures for the green and low-carbon transition of energy [EB/OL]. (2022-01-30)[2023-10-01]. https: //www. gov. cn/zhengce/zhengceku/2022-02/11/content_5673015.htm.

[7] 武强, 涂坤, 曾一凡. "双碳"目标愿景下我国能源战略形势若干问题思考 [J]. 科学通报, 2023, 68(15): 1884–1898.
Wu Q, Tu K, Zeng Y F. Research on China's energy strategic situation under the carbon peaking and carbon neutrality goals [J]. Chinese Science Bulletin, 2023, 68(15): 1884–1898.

[8] 孟雨晨, 伍浩松. 美准备将矿区转变为清洁能源中心 [J]. 国外核新闻, 2022 (7): 5.
Meng Y C, Wu H S. The United States plans to transform mining areas into clean energy hubs [J]. Foreign Nuclear News, 2022 (7): 5.

[9] 王双明, 刘浪, 赵玉娇, 等. "双碳"目标下赋煤区新能源开发——未来煤矿转型升级新路径 [J]. 煤炭科学技术, 2023, 51 (1): 59–79.
Wang S M, Liu L, Zhao Y J, et al. New energy exploitation in coal-endowed areas under the target of "double carbon": A new path for transformation and upgrading of coal mines in the future [J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 59–79.

[10] 李振, 雪佳, 朱张磊, 等. 煤矸石综合利用研究进展 [J]. 矿产保护与利用, 2021, 41(6): 165–178.
Li Z, Xue J, Zhu Z L, et al. Research progress on comprehensive utilization of coal gangue [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2021, 41(6): 165–178.

[11] 黄中伟, 李国富, 杨睿月, 等. 我国煤层气开发技术现状与发展趋势 [J]. 煤炭学报, 2022, 47(9): 3212–3238.
Huang Z W, Li G F, Yang R Y, et al. Review and development trends of coalbed methane exploitation technology in China [J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(9): 3212–3238.

[12] 罗申国, 宋沛鑫, 冯大伟. 我国煤层气开发利用现状及综合利用途径分析 [J]. 煤炭加工与综合利用, 2020 (7): 83–87.
Luo S G, Song P X, Feng D W. Analysis of the current situation and comprehensive utilization approaches of coalbed methane development and utilization in China [J]. Coal Processing & Comprehensive Utilization, 2020 (7): 83–87.

[13] 曹敏敏, 王雪峰, 王荀, 等. 煤矿低浓度甲烷利用技术研究进展 [J]. 煤炭技术, 2022, 41(1): 101–105.
Cao M M, Wang X F, Wang X, et al. Research progress on utilization technology of low concentration methane in coal mines [J]. Coal Technology, 2022, 41(1): 101–105.

[14] 顾大钊, 李庭, 李井峰, 等. 我国煤矿矿井水处理技术现状与展望 [J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(1): 11–18.
Gu D Z, Li T, Li J F, et al. Current status and prospects of coal mine water treatment technology in China [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(1): 11–18.

[15] 金智新, 曹孟涛, 王宏伟. "中等收入"与新"双控"背景下煤炭行业转型发展新机遇 [J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 45–58.
Jin Z X, Cao M T, Wang H W. New opportunities for coal industry transformation and development under the background of the level of a moderately developed country and a new "dual control" system [J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 45–58.

[16] 常纪文, 杜根杰, 杜建磊, 等. 我国煤矸石综合利用的现状、问题与建议 [J]. 中国环保产业, 2022 (8): 13–17.
Chang J W, Du G J, Du J L, et al. Current situation of the comprehensive utilization of coal gangue in China and the related problems and recommendations [J]. China Environmental Protection Industry, 2022 (8): 13–17.

[17] 孙钦平, 赵群, 姜馨淳, 等. 新形势下中国煤层气勘探开发前景与对策思考 [J]. 煤炭学报, 2021, 46(1): 65–76.
Sun Q P, Zhao Q, Jiang X C, et al. Prospects and strategies of CBM exploration and development in China under the new situation [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1): 65–76.

[18] 张泽飞, 殷卫峰, 向艳蕾, 等. 煤矿空压机余热利用技术现状与展望 [J]. 煤质技术, 2022, 37(2): 26–30.
Zhang Z F, Yin W F, Xiang Y L, et al. Current status and prospect

of waste heat utilization technologies of air compressor in coal mines [J]. Coal Quality Technology, 2022, 37(2): 26–30.

[19] 袁亮. 推动我国关闭/废弃矿井资源精准开发利用研究 [J]. 煤炭经济研究, 2019, 39(5): 1.
Yuan L. Promote the precise development and utilization of closed/abandoned mine resources in China [J]. Coal Economic Research, 2019, 39(5): 1.

[20] 袁亮, 杨科. 再论废弃矿井利用面临的科学问题与对策 [J]. 煤炭学报, 2021, 46(1): 16–24.
Yuan L, Yang K. Further discussion on the scientific problems and countermeasures in the utilization of abandoned mines [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1): 16–24.

[21] 袁亮, 姜耀东, 王凯, 等. 我国关闭/废弃矿井资源精准开发利用的科学思考 [J]. 煤炭学报, 2018, 43(1): 14–20.
Yuan L, Jiang Y D, Wang K, et al. Precision exploitation and utilization of closed/abandoned mine resources in China [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1): 14–20.

[22] 赵同彬, 刘淑敏, 马洪岭, 等. 废弃煤矿压缩空气储能研究现状与发展趋势 [J/OL]. 煤炭科学技术: 1–13 [2023-10-01]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20230810.1402.001.html
Zhao T B, Liu S M, Ma H L, et al. Research status and development trend of compressed air energy storage in abandoned coal mines [J/OL]. Coal Science and Technology: 1–13 [2023-09-04]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20230810.1402.001.html

[23] 葛世荣, 刘洪涛, 刘金龙, 等. 我国煤矿生产能耗现状分析及节能思路 [J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(1): 9–14.
Ge S R, Liu H T, Liu J L, et al. Energy consumption analysis and energy saving strategies for coal mine production in China [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2018, 47(1): 9–14.

[24] 卞正富, 伍小杰, 周跃进, 等. 煤炭零碳开采技术 [J]. 煤炭学报, 2023, 48(7): 2613–2625.
Bian Z F, Wu X J, Zhou Y J, et al. Coal mining technology with net zero carbon emission [J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(7): 2613–2625.

[25] 周游, 刘宇, 艾畅, 等. 露天煤矿全流程能耗分析及节能对策研究 [J]. 煤炭工程, 2020, 52(7): 136–141.
Zhou Y, Liu Y, Ai C, et al. Energy consumption analysis and energy saving potential research based on whole-process energy audit of open-pit coal mine [J]. Coal Engineering, 2020, 52(7): 136–141.

[26] 罗申国, 宋沛鑫, 冯大伟. 我国煤层气开发利用现状及综合利用途径分析 [J]. 煤炭加工与综合利用, 2020 (7): 83–87.
Luo S G, Song P X, Feng D W. Analysis of current situation & comprehensive utilization approaches of development & utilization of coalbed methane in China [J]. Coal Processing & Comprehensive Utilization, 2020 (7): 83–87.

[27] 山西省能源局. 关于推动煤矿瓦斯综合利用的指导意见 [EB/OL]. (2022-08-19)[2023-10-01]. http://nyj.shanxi.gov.cn/zfxxgk/fdzdgknr/snyjwj/sjwj/202302/t20230203_7913414.html.
Shanxi Provincial Energy Administration. Guiding opinions on promoting the comprehensive utilization of coal mine gas [EB/OL]. (2022-08-19)[2023-10-01]. http://nyj.shanxi.gov.cn/zfxxgk/fdzdgknr/snyjwj/sjwj/202302/t20230203_7913414.html.

[28] 顾大钊, 李井峰, 曹志国, 等. 我国煤矿矿井水保护利用发展战略与工程科技 [J]. 煤炭学报, 2021, 46(10): 3079–3089.
Gu D Z, Li J F, Cao Z G, et al. Technology and engineering development strategy of water protection and utilization of coal mine in China [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(10): 3079–3089.

[29] 黄宏旭, 梁睿, 张小彤, 等. 计及碳约束下的煤矿综合能源系统多目标配置双层优化 [J]. 电网技术, 2022, 46(5): 1731–1742.
Huang H X, Liang R, Zhang X T, et al. Two-stage multi-objective deployment optimization approach of coal mine integrated energy system considering carbon emission constraints [J]. Power System Technology, 2022, 46(5): 1731–1742.

[30] Huang H X, Liang R, Lv C X, et al. Two-stage robust stochastic scheduling for energy recovery in coal mine integrated energy system [J]. Applied Energy, 2021, 290: 116759.

[31] Huang H X, Li Z M, Hoay B G, et al. Distributionally robust energy-transportation coordination in coal mine integrated energy systems [J]. Applied Energy, 2023, 333: 120577.

[32] Huang H X, Li Z M, Lahanda P M I S, et al. Blockchain-enabled carbon and energy trading for network-constrained coal mines with uncertainties [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2023, 14(3): 1634–1647.

[33] 梁睿, 张鸽, 袁乐童, 等. 煤流–潮流协同的矿山供电系统低碳优化运行 [J/OL]. 中国电机工程学报: 1–12 [2023-10-01]. https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.221690.
Liang R, Zhang G, Yuan L T, et al. Low carbon optimal operation for mine power supply system with coordinated coal-power flow [J/OL]. Proceedings of the CSEE: 1–12 [2023-09-04]. https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.221690.