废弃矿井协同开发利用技术框架与关键问题思考

吕　鑫[1,2],杨　科[2,3],袁　亮[1,2],华心祝[4],方珏静[1,2],张　通[4],段敏克[1,2],刘飞跃[1,2]
(1. 安徽理工大学 矿业工程学院,安徽 淮南　232001;2. 安徽理工大学 深部煤炭安全开采与环境保护全国重点实验室,安徽 淮南　232001;3. 安徽建筑大学 土木工程学院,安徽 合肥　230601;
4. 安徽理工大学 安全科学与工程学院,安徽 淮南　232001)

摘要: 废弃矿井开发作为我国能源转型与“双碳”战略目标实施的重要领域,在推动资源高效利用、生态修复与区域经济可持续发展中发挥着不可替代的作用.本文从顶层设计视角明确了废弃矿井开发的内涵,立足我国基本国情和区域差异,从资源化、能源化和功能化利用路径层面系统阐述了废弃矿井全生命周期开发利用战略构想与实施策略,以“分类施策、协同推进”为主导方针,坚持差异化开发与分步推进相结合,提出试点引领、分步推广的核心路径,构建区域协同、市场监管及技术创新、政策扶持的全方位保障机制.系统阐述了废弃矿井协同开发利用面临的科学与技术难题,从“空-天-地-藏”动态探测识别到全生命周期资源利用统筹优化,从地下空间稳定性控制到碳运移规律研究与三向控碳产业开发,从区域能源转型到混合微电网构建,重点突破废弃矿井从资源探测到多功能开发的全链条关键技术.研究可为废弃矿井从社会负担向战略资源转型提供科学依据,为实现“双碳”目标和区域经济高质量发展提供理论指导和实践路径.

关键词: 废弃矿井;全生命周期;碳中和;协同开发利用;多元利用转型
中图分类号: TD 841　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1000-1964(2026)01-0043-18

Technical framework and key issues in the coordinated development and utilization of abandoned mines

LYU Xin[1,2], YANG Ke[2,3], YUAN Liang[1,2], HUA Xinzhu[4], FANG Juejing[1,2], ZHANG Tong[4], DUAN Minke[1,2], LIU Feiyue[1,2]
(1. School of Mining Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China; 2. State Key Laboratory of Safe and Environment-friendly Mining for Deep Coal Resources, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China; 3. School of Civil Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei, Anhui 230601, China; 4. School of Safety Science and Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China)

Abstract: The development and utilization of abandoned mines play a crucial role in advancing China's energy transition and achieving its “Dual Carbon” goals. From a top-level design perspective, the concept of abandoned mine reuse is defined, considering China's national context and regional differences. This paper systematically presents a full-lifecycle development strategy, focusing on three primary utilization paths: resource-based, energy-based, and function-based. Follow-

收稿日期: 2025-07-04　　**修回日期:** 2025-09-04　　**DOI:** 10.13247/j.cnki.jcumt.20250255
基金项目: 国家自然科学基金项目(52504071);国家资助博士后研究人员计划项目(GZB20250453);安徽理工大学高层次引进人才科研启动基金项目(2025yjrc0008)
第一作者: 吕　鑫(1995—),男,山西省大同市人,讲师,工学博士.
通信作者: 袁　亮(1960—),男,安徽省金寨县人,中国工程院院士,教授,博士师导师.E-mail:yuanl_1960@sina.com
引用格式: 吕　鑫,杨　科,袁　亮,等.废弃矿井协同开发利用技术框架与关键问题思考[J].中国矿业大学学报,2026,55(1):43-60.
LYU Xin, YANG Ke, YUAN Liang, et al. Technical framework and key issues in the coordinated development and utilization of abandoned mines[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2026, 55(1): 43-60.

ing the guiding principle of "classified strategies and coordinated advancement", a phased and differentiated approach was proposed, led by pilot projects and supported by a comprehensive mechanism involving regional coordination, market regulation, technological innovation, and policy incentives. The key scientific and technological challenges faced in the coordinated development and utilization of abandoned mines were systematically discussed, including dynamic multi-source detection ("sky-space-ground-storage"), underground space stability control, carbon migration patterns, three-dimensional carbon management, regional energy transition, and hybrid microgrid construction. Critical technologies spanning the entire chain, from resource detection to multifunctional development, were identified. This research offers a theoretical foundation and practical guidance for transforming abandoned mines from environmental burdens into strategic resources, contributing to carbon neutrality and the high-quality development of regional economies.

Key words: abandoned mines; full lifecycle; carbon neutrality; coordinated development and utilization; multifunctional transformation

我国是全球最大的能源生产和消费国,化石能源和矿山开采既是经济发展的重要支柱,也是保障国家能源安全的战略基石.我国具有"富煤、贫油、少气"的资源禀赋特点[1-2],加之国际环境中"两个大局"的复杂交织,决定了以煤炭为主的能源生产和消费格局在短期内难以根本改变.截至2023年,全国原煤产量47.1亿t,同比增长3.4%,且煤炭在我国一次能源消费结构中的占比高达55.3%[3-4],化石能源在能源保障和供应稳定性方面仍发挥着不可替代的作用(图1).然而,传统化石能源的高强度开发和利用带来了资源快速消耗、环境污染和碳排放等多重压力[5].习近平总书记指出:"要构建清洁低碳安全高效的能源体系.抓好煤炭清洁高效利用,确保发挥兜底保障和对新能源发展的支撑调节作用.大力发展风电和太阳能发电,统筹水电开发和生态保护,积极安全有序发展核电,加快构建新型电力系统."[6]在此目标的指引下,传统能源优化与新能源替代成为能源结构调整的必然路径[7-8].

多年的高强度开采已导致部分矿区资源逐步枯竭,同时,随着环境保护政策的不断完善,大量高污染、高风险矿井相继关停.据《2023煤炭行业发展年度报告》统计,截至2023年底,全国煤矿数量经过整合优化后已减少至约4 300处.预计到2030年,关闭或废弃矿井数量将达到15 000余处[9-10],这些废弃矿井不仅蕴含未被开采的残余资源,还因地质条件复杂、历史治理不完善,存在塌陷、瓦斯泄漏等潜在安全隐患[11-13],威胁区域生态与社会经济稳定.然而,现阶段废弃矿井的管理大多采取"一刀切"式的闭井封堵处理[14],缺乏科学的长期规划.许多矿井在封闭后,仅对地表进行简易"面子化"装饰,遗留资源和空间功能未能被有效利用,长期处于闲置状态[15-16],不仅造成了资源浪费,也成为企业的负担和社会的隐患.

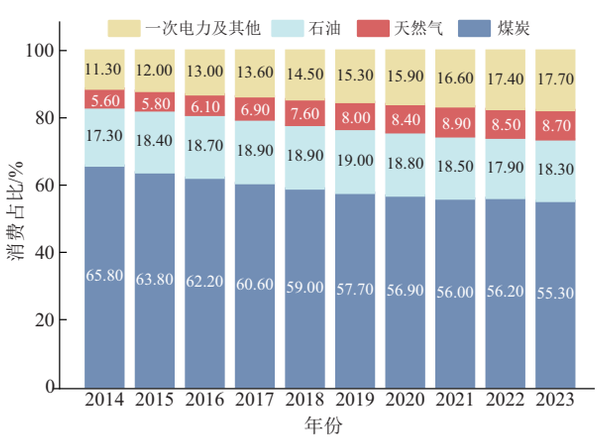


图1 2014—2023年我国能源消费结构

Fig. 1 Energy consumption structure in China, 2014—2023

当前,我国新能源发展取得了显著进展.据国家能源局统计,截至2023年底,全国风电年投资额超过6 700亿元、光伏年投资额超过3 800亿元,装机容量分别达到430和490 GW[17-18],总量均居世界首位(图2).然而,新兴能源的间歇性和波动性问题依然突出,新能源的消纳能力、电网调控水平以及储能技术的发展尚不能完全满足发电需求.同时,传统能源与新能源在时空分布上存在明显不平衡,旧能源的退出与新能源的接替之间存在衔接断层[19-21].在推动能源体系转型和实现"双碳"目标的背景下,废弃矿井因其广阔的地下空间、高效的储能潜力和残余资源利用价值,是传统

能源与新能源衔接的最佳载体，也是实现资源再利用、生态修复和区域经济可持续发展的重要抓手．通过构建储能、电力消纳、碳封存和生态修复功能一体化的开发模式，废弃矿井将成为推动传统能源绿色低碳转型的重要基地．

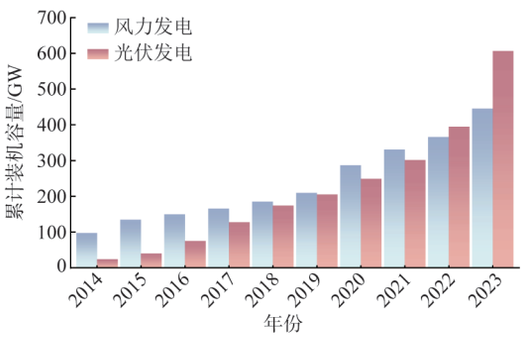


图 2　2014—2023 年我国风力、光伏发电累计装机容量

Fig. 2　Cumulative installed capacity of wind and solar power in China, 2014—2023

因此，本文基于全生命周期管理理念，从废弃矿井开发利用的多维视角出发，明确废弃矿井在资源综合利用、能源转型和区域功能拓展中的多重角色．围绕资源化、能源化、功能化三大方向，提出了协同开发的战略路径．通过突破“空-天-地-藏”动态探测技术、全生命周期资源优化模型、地下空间稳定控制与风险平衡机制、多相多场碳运移规律解析与控碳技术，以及区域能源转型与混合微电网建设等方面的关键问题，构建从试点示范到区域协同、再到全面推广的实施框架．研究可为废弃矿井从负担向资源转化提供理论基础与技术支持，为我国能源体系的绿色低碳转型和区域经济高质量发展提供理论指导和实践参考．

1　全生命周期开发路径

1.1　废弃矿井开发概念

在矿井开采过程中，随着时间的推移，部分区域的矿产资源已被开采殆尽，或受限于当前技术条件，在开采难度过大、存在重大安全隐患条件下不再继续开采的区域；矿井开采晚期由于资源枯竭、经济效益下降、政策变动或安全隐患等原因，被迫停止或暂停开采的矿井区域，统称为废弃矿井．这些矿井区域通常不再承担矿产资源的开采任务．

随着国家“双碳”目标的提出与环境保护法规的不断完善（表 1），关闭矿井数量逐年增加，产生的大量遗留资源仍具备进一步开发利用的潜力，是再生资源、能源储存和社会基础设施的潜在来源．废弃矿井的开发利用不仅是对矿产资源和矿区空间的再生利用，更是推动区域经济转型、促进绿色低碳发展的重要途径．

表 1　各国废弃矿井开发利用相关政策

Table 1　Policies on the development and utilization of abandoned mines in various countries

年份	国家	政策名称	相关内容
1977	美国	《地表采矿管理与复垦法》	要求采矿企业在关闭矿井后进行土地复垦，恢复生态环境，防止环境污染
1987	澳大利亚	《矿山复垦与关闭政策》	要求矿山企业在运营期间制定并实施复垦计划，确保关闭后环境得到有效恢复
1989	加拿大	《加拿大矿山复垦法》	对废弃矿井环境管理进行了明确要求
2008	德国	《废弃淹水矿井的水资源管理》	阐明了矿井关闭后地下水检测、排水管理与处理等方面遵循的原则
2014	中国	《十二部门关于加快落后小煤矿关闭退出工作的通知》	提出加快落后小煤矿关闭退出的工作目标，淘汰落后产能
2019	中国	《自然资源部办公厅关于政策性关闭矿山采矿许可证注销有关工作的函》	明确关闭矿山的生态修复责任主体，并规范采矿许可证注销程序
2021	中国	《全国矿产资源规划(2021—2025 年)》	统计全国关闭退出矿井数量，并明确矿山关闭后应加强资源利用与环境修复
2023	中国	《“十四五”现代能源体系规划》	提出积极推动废弃矿井资源综合利用，建设抽水蓄能、压缩空气储能等绿色低碳项目
2024	中国	《国务院办公厅关于加快构建废弃物循环利用体系的意见》	强调废弃矿井在废弃物循环利用中的重要性，促进区域经济发展

1.1.1　废弃矿井开发优势

废弃矿井的开发利用在当前资源紧张、能源结构转型和环境保护日益受到重视的背景下，其资源潜力和空间价值逐渐凸显，成为新型能源开发和绿色发展的重要阵地．但目前的废弃矿井仍存在矿产开发不充分、退出机制不完善、安全雷点

频爆发、矿权义务无人管等问题.

1)提高资源利用效率,防止能源浪费

废弃矿井中残留的资源,如煤层气、矿井水等往往得不到有效利用,会白白浪费.通过对这些资源进行科学回收与合理开发,不仅能有效补充现有能源供应,减少对进口能源的依赖,还能最大限度地降低资源浪费,提升矿产资源的综合利用效率.转变废弃矿井资源回收利用的方式,有助于实现能源的可持续发展,并促进资源节约型社会的构建.

2)推动能源消费革命,协同新旧能源交替

在全球能源转型的背景下,传统化石能源面临枯竭及环境污染问题,绿色低碳能源逐渐成为主流.废弃矿井作为能源转型中的关键阵地,能够为新旧能源的交替提供重要支持.提前布局废弃矿井区域,接入新能源发电,实现新旧能源全空间覆盖,利用矿井空间进行能源储存,为新能源的消纳提供增额空间,促进传统能源与清洁能源之间的协调共存,从而加速能源结构的优化和转型(图3).

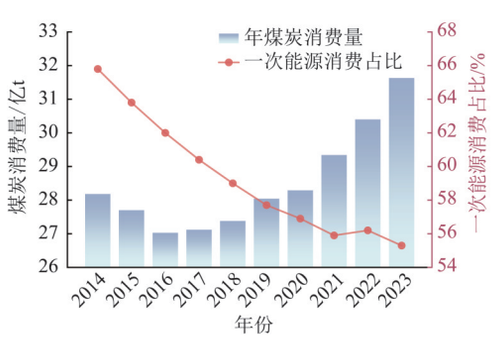


图3 2014—2023年我国煤炭消费占比

Fig. 3 Coal consumption proportion in China, 2014—2023

3)健全能源安全体系,促进绿色低碳发展

未妥善管理的废弃矿井不仅会造成资源浪费,还可能引发一系列安全与环境问题.无人监管状态下有害气体持续逸散,将进一步加剧温室效应;长期失维的矿井内部结构引发塌陷和爆炸事故[22],对周边居民的生命安全和财产造成威胁(表2).通过开发废弃矿井中的剩余资源或地下储能空间,不仅可以减少潜在的安全隐患,还能有效利用地下储能空间,降低对外部能源的依赖,优化能源供给结构,增强国家能源自主性;并且为绿色低碳技术的应用和发展创造了条件,有助于实现国家和地区的低碳转型目标,支撑绿色发展战略规划.

表2 废弃矿井安全事故

Table 2 Safety incidents in abandoned mines

时间	地点	死亡人数/人	事故描述
2011-07	黑龙江省鸡西市	10	关闭煤矿内发生透水
2013-05	河南省平顶山市	5	废弃矿井内瓦斯爆炸
2014-08	山西省吕梁市	11	关闭煤矿内发生塌陷
2016-09	贵州省盘州市	7	废弃煤矿内瓦斯爆炸
2020-12	重庆市永川区	23	煤矿关闭后瓦斯爆炸
2024-09	安徽省淮南市	27	煤矿停产后瓦斯爆炸

4)发展区域循环经济,提升地方社会稳定性

矿山企业在生产结束后,缺乏废弃矿井管理义务履行积极性,尤其是在矿权到期或丧失后,企业再开发利用的意愿和能力均受到制约[23-24].同时,政府面临矿山环境保护重大压力,相关标准法规执行周期长,地方监管难以及时到位,导致废弃矿井成为社会负担.通过发展废弃矿井相关产业(如表3中的典型案例),可推动地方经济多元化,促进新兴产业的落地和发展,实现从传统矿业向现代产业的平稳转型,搭建矿区循环经济体系,能够制造就业缺口与专业需求,避免劳动力流失,贯彻人才引进政策,提升整体社会的稳定性,为地方经济的可持续发展提供坚实的支撑.

表3 典型国家废弃矿井开发计划

Table 3 Development plans for abandoned mine utilization in representative countries

年份	国家	计划名称	计划目的
2004	中国	上海辰山矿坑花园项目	对辰山废弃矿坑实施矿山地质环境综合治理,打造特色生态修复型园林景观
2012	中国	晋华宫国家矿山公园建设项目	利用废弃矿区发展文旅、教育等复合功能,打造国家级工业旅游与科普示范基地
2012	美国	中西部地区废弃矿井生态再利用项目(印第安纳州)	通过湿地系统改善矿区水文与水质,减少酸性排水风险,促进生态系统恢复
2013	澳大利亚	西澳废弃矿山治理专项基金	设立永久性修复基金,由矿企缴纳专款,用于支持废弃矿山的长期修复与管理
2016	德国	杜伊斯堡矿区城市公园项目	将废弃矿区转型为城市生态绿地,提供生态服务功能并提升区域宜居环境
2016	德国	“失落矿坑变绿洲”生态复育计划(鲁尔工业基地)	通过整体生态改造工程,将废弃矿坑修复为城市绿洲,实现生态系统服务功能重构

续表 3

年份	国家	计划名称	计划目的
2020	英国	盖茨黑德矿井水地热供热网络项目	利用封闭矿井中的矿井水资源提取地热，为社区和企业提供低碳、可再生供热
2020	加拿大	北部废弃矿山复垦与管理计划	针对 8 个典型废弃矿区开展系统修复与环境风险管控，实施长期维护管理与可持续生态恢复

1.1.2　废弃矿井利用科学内涵

根据矿井资源禀赋及新能源发展趋势，结合政府政策导向，科学、系统开发废弃矿井剩余价值，依据空间特点、资源属性及环境条件，聚焦资源化、能源化和功能化 3 个主要方向[25]，以“分类施策、协同推进”为主导方针（图 4），挖掘废弃矿井资源潜力，优化区域经济结构，推动可持续发展. 通过能源化利用，可提升能源利用效率并支持绿色转型；资源化利用则侧重于提升资源回收率，减少浪费，实现循环经济；而功能化利用致力于将矿井空间转化为社会所需的多功能基础设施，助力区域社会与经济长期稳定发展. 这三者的有机结合，有望推动矿区从传统的单一资源依赖向多元化、可持续的经济模式转型.

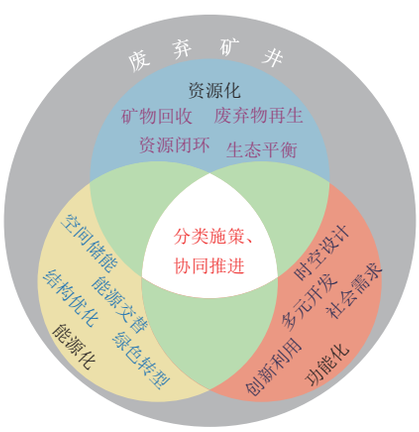


图 4　资源化、能源化和功能化利用

Fig.4　Resource-oriented, energy-oriented, and function-oriented utilization

1）资源化利用

资源化利用旨在对废弃矿井中残余的矿产、伴生资源以及矿井废弃物进行再开发与综合利用. 有效提取未完全开采的矿物资源和地下水资源等，提升资源利用率，减少资源浪费；同时，矿井废弃物的再利用不仅有助于降低环境负担，还能实现矿区资源的闭环循环. 资源化利用强调资源的最大化回收和生态效益的平衡，从而支持可持续的资源管理体系建设.

2）能源化利用

能源化利用是指通过矿井的废弃空间及其特殊的物理条件，实现能源的生产、转换和储存. 矿井的独特环境为各类能源技术的应用提供了良好条件，如储能系统、热能转换等. 在这一过程中，通过充分利用废弃矿井中的潜在能源，不仅能够优化能源供给结构，还能提升新能源利用效率，推动能源系统的绿色转型. 能源化利用的核心在于将废弃矿井的资源优势转化为能源安全和清洁能源发展的助力，促进能源体系优化升级.

3）功能化利用

功能化利用是对废弃矿井的时间-空间进行设计和调整，以满足多样化的社会需求. 根据其特殊的物理环境，废弃矿井可被改造为社会基础设施、科研空间和文化旅游场所等，实现区域多元化协同发展. 功能化利用的重点在于协调废弃矿井时空关系，实现对矿井空间的创新性开发，提升矿区土地的利用效率，为区域经济和社会服务提供新的增长点，推动区域可持续性发展和社会福利设施建设.

1.2　全生命周期框架

废弃矿井全生命周期管理是一种系统化的资源开发和环境治理策略，围绕矿井建设、开采、逐步关停到最终再利用的全过程，进行科学规划和统筹管理. 不仅关注矿井在运营期间的资源开采和环境保护，还将新旧能源同步发展与协同交替规划在内，从全生命周期时间尺度上制定矿井废弃区域可持续发展计划，实现对矿井资源的最大化利用以及环境和社会效益的平衡. 全生命周期管理核心在于将矿井视为一个动态系统，各个阶段的开发重点根据能源化、资源化和功能化的比重动态调整，通过分阶段的精细化管理指导矿井的多元开发与资源的综合利用（图 5）.

1）矿井建设与初期开采阶段（功能化主导）

矿井建设初期以功能化为主，核心在于对矿区的科学规划设计，并开展基础设施建设和矿产资源的初步开发. 在矿井设计之初，就融入全生命周期管理的理念，从一开始就将矿井设计为多用途的空间区域，为未来的多元化开发奠定坚实基础. 在基础设施规划中，预留用于未来能源储存、科研设施、数据中心建设的空间，确保后续开发的灵活性和可持续性. 除了矿产资源的高效开采外，

还应开展环境保护和地下水管理，注重矿井未来的可持续开发能力．通过前期科学规划，不仅可以保证矿井在开采期内的安全高效运行，还能为其转型为多功能空间提供条件，减少后期改造的难度和成本．

2)高峰生产与资源开采阶段(资源化主导)

随着矿井进入全面开采阶段，资源化成为主要目标．这一阶段的重点是最大化矿产资源的开采效率，确保经济效益的最大化．专注于高效开采核心资源的同时兼顾伴生资源的回收，利用先进的开采和处理技术，减少废弃物对环境的压力．逐步引入新能源设施，在已开采完毕的矿区部署基础设施建设，为后续的能源化和功能化开发做准备，并妥善安置开采过程中产生的副产品，在废弃矿井再开发时回收利用．

3)矿井晚期与逐步关闭阶段(能源化逐渐增加)

当矿产资源逐渐枯竭，矿井进入晚期运营阶段，此时能源化的比重逐渐增加，战略重点转向如何高效利用矿井的废弃区域，将其转化为清洁能源生产和储存的基地，提升废弃矿井剩余价值．发挥储能优势建设智能电网调节平台，助力新能源的推广和区域能源安全的保障，开始提前部署矿井关闭前期的功能化改造，为下一阶段的全面再利用做准备，延长矿井的经济寿命．

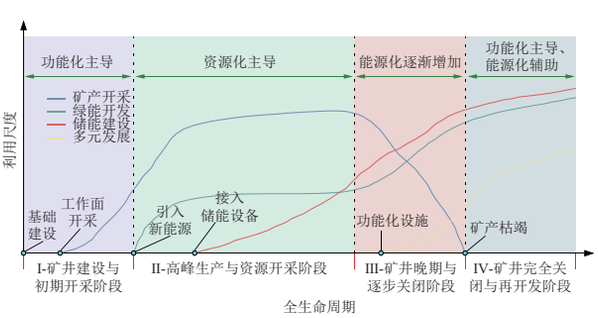


图 5　废弃矿井全生命周期管理

Fig. 5　Full lifecycle framework for abandoned mine development

4)矿井完全关闭与再开发阶段(功能化主导、能源化辅助)

当矿井资源枯竭、全面停产后，开发的重心转向功能化利用，将废弃矿井改造为多种社会基础设施，建设地下数据中心、应急避难所、科研实验室以及文化旅游设施等，促进区域经济的多元化发展．同时，能源化作为辅助开发方向继续发挥作用，矿井内部空间仍可用于能源的长期储存，实施氢气、地热和碳封存开发．通过功能化和能源化的综合利用，不仅能有效减少废弃矿井带来的环境和安全风险，还能增加企业经济收益，提升矿区的社会效益和生态价值．

2　废弃矿井利用战略方向

2.1　资源化利用

1)矿产资源的再开发与高效利用

废弃矿井资源化利用示意如图 6 所示．在生产矿井和废弃矿井中，由于开采难度较大、技术限制或经济效益较低等原因，遗留有大量低品位矿石、伴生矿物和稀有元素．在智能化采矿技术日益发展的背景下，通过人工智能算法和精准探测方式，可以大大降低残余资源二次开发的经济成本．借助三维地质建模和精细勘探技术，定位矿井内的矿层和边缘矿体，提升开采的精度和效率；引入自动化采矿设备实现“采-充-支”一体化运行，降低人工成本和安全风险；应用超细磨矿技术、浮选技术以及磁选等高效选矿组合工艺和化学处理手段，对煤-铀共采等伴生矿物进行二次回收[26-27]，最大限度地回收矿物中的有价元素，提高低品位矿石的利用率与矿山的整体经济效益．

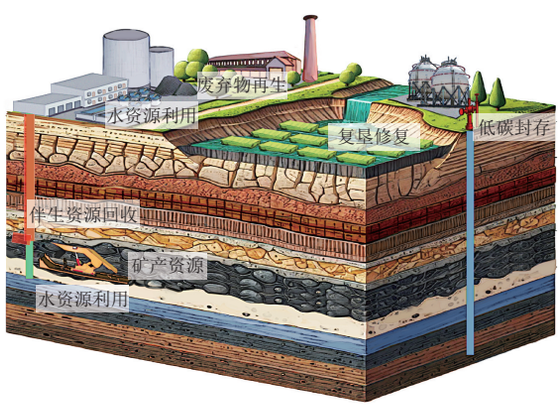


图 6　资源化利用

Fig. 6　Resource-oriented utilization

2)煤层气和伴生资源的回收利用

煤矿和部分金属矿井在开采过程中伴生大量煤层气、二氧化碳及其他气体，这些气体一旦逸散到大气中，会对环境造成严重污染．尤其是甲烷，作为一种强效温室气体，其全球增温潜势通常为二氧化碳的 21～35 倍[28-29]．因此，对伴生气体的回收利用不仅有助于环境保护，还能产生实际的经济效益．采用煤层气抽采技术，通过打孔抽采、压力调节和气体分离装置，可以将回收的煤层气净化并转化为液化天然气或压缩天然气，供工业燃料使用；此外，使用膜分离技术和低温冷凝技术，可以实现伴生气体的高效提纯，获取氢气等高价值气体，作为

化工原料或能源储备．我国伴生矿产资源开发现状如表 4 所示[30]．对煤层气和伴生资源的回收利用不仅会提高资源利用率，还能有效减少矿井内甲烷积聚引发的爆炸风险，提高矿井的安全性．

表 4　伴生矿产资源开发现状[30]

Table 4　Current status of associated mineral resource development

共伴生矿产资源	代表矿产	开发现状
能源矿产	煤层气、页岩气、油页岩与致密气	“高储低渗”的特点限制了我国煤层气工业发展；页岩气、油页岩与致密气在局部地区进入实质开采阶段
金属矿产	锂、铍、钠、镁、镓、锗、锡、铟等 65 种金属	国家能源集团在镓、锗、锂等高价金属元素提取技术研发方面也走在了前列，铝等大宗金属矿物多从煤矸石与粉煤灰中提取
非金属矿产	高岭土、耐火黏土、硅藻土、膨润土、石墨等	高岭土是目前煤系非金属伴生矿的最主要开采矿种；我国煤系共伴生硅藻土、膨润土、石墨储量可观，且品位较高

3）矿井水资源的综合开发与利用

在矿井开采过程中，岩层断裂或断层位移都会诱发地下水的渗流，进而形成矿井水．目前，矿井水的开发利用主要集中在工业生产、农业灌溉和市政供水等领域．由于矿井水通常含有较高浓度的矿物质和多种污染物，因此需采用科学的水处理工艺，通过粗过滤、絮凝沉淀、活性炭吸附和反渗透脱盐等多道处理流程，去除矿井水中的悬浮物、有机污染物和重金属，从而将矿井水转化为符合利用标准的水资源，助力水资源的循环利用与绿色转化．

4）矿山废弃物的再生与循环利用

矿井开采过程中会产生大量的废石、矿渣和尾矿，这些废弃物堆积不仅占用土地，还对环境造成潜在威胁．通过无害化处理，将其转化为可用的建筑材料已经成为一种趋势，既减少了废弃物的堆积量，又为建筑行业提供了低成本、环保的替代材料．部分矿区已开展了“零废弃矿山”试点，通过资源循环利用和废物处理，实现矿区的闭环管理：例如将尾矿粉碎后用作水泥添加剂、混凝土骨料和道路基础材料[31]；通过改性处理，将矿渣制成轻质砖、环保砖等新型建筑材料；进行尾矿与废石综合处理，制造高强度透水砖用于生态护坡工程．资源的循环利用和再生处理不仅提升了矿区资源的利用效率，同时也为企业提供了新的经济增长点．

5）土地复垦与生态修复

采矿活动不可避免地会导致地表塌陷、土壤退化和生态破坏．因此，对废弃矿区的土地进行复垦，恢复其生态功能，是矿井资源化利用战略中不可或缺的部分，也是推动矿区可持续发展中成效较快、成本较低的措施．目前，复垦技术主要集中在采空区充填、土壤改良和植被恢复 3 个方面：利用矿山废石和尾矿进行采空区充填，防止地表塌陷，增强地质稳定性；依靠有机肥料、土壤改良剂以及微生物技术，改善受损土壤的肥力和结构[32]，使其适合农业生产或绿化；种植适应性强的本地植物，通过植被种植和管理，恢复矿区的生态平衡．此外，还可通过水土保持工程和生物多样性恢复项目，将废弃矿区转化为城市绿地或生态公园，从而提升区域的环境质量和社会效益．

6）低碳化与绿色发展

资源化利用的最终目标是推动矿区的绿色低碳转型，通过减排和封存双重手段对废弃矿井进行碳管理．回收利用矿井内的剩余资源和废弃物，减少温室气体的排放强度，助力碳中和目标的实现；再实施碳捕集与封存技术，将二氧化碳注入废弃矿井的深层地层进行封存，利用林地进行固碳．在减少碳排放的同时，为碳市场提供潜在的碳汇资源，提升矿区经济可持续发展和低碳转型的支撑能力．

2.2　能源化利用

2.2.1　地下储能技术的开发与应用

废弃矿井能源化利用示意如图 7 所示．废弃矿井的深层空间具有良好的密闭性和稳定性，是理想的地下储能场所．根据我国相关储能政策（图 8），目前的地下储能方式主要包括抽水蓄能、压缩空气储能、氢能储存和重力储能等．

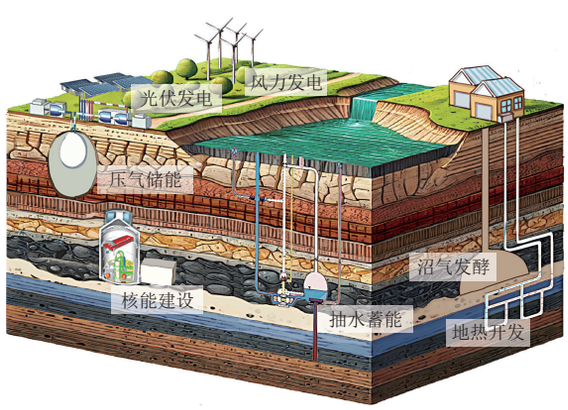


图 7　能源化利用

Fig. 7　Energy-oriented utilization

1)抽水蓄能:通过在矿井上、下构建2个储水库,利用水位高程差进行能量存储和释放.在电力需求低谷时,将水泵送至上层水库储存;到达用电高峰期释放水流以驱动水轮发电机发电,增加电力系统的灵活性,促进可再生能源的平稳接入.

2)压缩空气储能:利用矿井内部空间的良好密闭性和地质稳定性,将空气压缩储存于其中,当电力需求增加时释放压缩空气驱动涡轮发电,并通过热能回收装置提升发电效率,将压缩空气与余热系统、地热系统相结合提高能量转换效率,实现新能源的消纳与电网的"削峰填谷".

3)氢能地下存储:以废弃矿井的地下空腔为基础,经过密封加固处理后,实现高压氢气的长期安全储存,结合可再生能源电解水制氢技术,搭建废弃矿井区域化产供储体系,利用可再生能源将地下矿井水资源转化为氢气进行存储,从而实现能量的季节性平衡.

4)重力储能:利用废弃矿井中的垂直空间,借助重物升降原理实现能量的存储和释放.通过在电力过剩时提升重物至高位储存能量,电力需求高峰时释放重物带动发电机发电,可实现能量的高效转换与回收.结合矿井深度和现有设施条件,废弃矿井可作为区域化重力储能系统的核心载体.

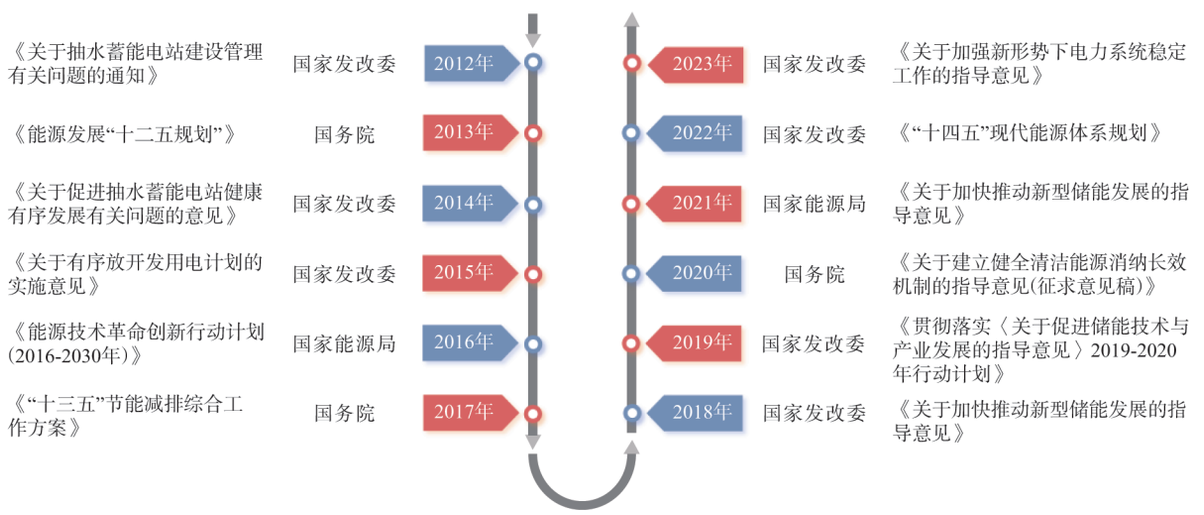


图8 储能相关政策

Fig. 8 Policies related to energy storage

2.2.2 地热能的开发与利用

我国赋煤区地热资源估算值见表5.我国矿井深部地热梯度较高,地热资源丰富且分布广泛,依靠矿井水吸收岩层中的热能,再通过热泵系统可将地热能转化为可用的能源[33-34],用于供暖、制冷与发电.

1)矿井水地热调温:在冬季借助矿井水提取深部地热能量,再经过换热设备为建筑供暖或为工业园区提供热能;在夏季则可通过水循环吸收室内热量实现制冷目的,为废弃矿井周边社区提供稳定的供暖和制冷服务,以减少对传统化石燃料的依赖,极大提升能源效率.

2)深层地热发电:对于具有较高地热梯度的矿井,可直接利用深井循环换热技术[35],将深层高压热水降压分离出水和蒸汽,借助高压蒸汽驱动汽轮机旋转进行发电,促进地区经济绿色转型.

表5 我国赋煤区地热资源估算

Table 5 Estimation of geothermal resources in coal-endowed areas in China

地区	赋煤区面积/万 km^2	赋煤区面积占比/%	地热资源储量/10^{18} J	赋煤区地热资源理论储量/10^{18} J	折合标煤/(万 $t\cdot a^{-1}$)	折合减排 CO_2/(万 $t\cdot a^{-1}$)
北京	0.14	8.54	94.81	8.10	276.73	743.86
天津	0.04	3.33	394.51	13.14	448.92	1 206.71
河北	0.71	3.76	3 052.00	114.76	3 920.74	10 538.94
山西	3.34	21.31	897.92	191.35	6 537.41	17 572.56
内蒙古	10.51	8.88	17 635.00	15.66	535.02	1 438.13
辽宁	0.33	2.23	339.91	7.58	258.97	696.11
吉林	0.46	2.45	96.00	2.35	80.29	215.81

续表 5

地区	赋煤区面积/万 km^2	赋煤区面积占比/%	地热资源储量/10^{18} J	赋煤区地热资源理论储量/10^{18} J	折合标煤/(万 $t\cdot a^{-1}$)	折合减排 CO_2/(万 $t\cdot a^{-1}$)
黑龙江	0.46	0.97	236.50	2.29	78.37	210.67
江苏	0.13	1.21	266.13	3.22	110.01	295.71
浙江	0.00(2)	0.02	1.20	0.02	0.82	2.20
安徽	0.59	4.21	60.52	2.55	87.12	234.18
福建	0.13	1.07	44.70	4.78	163.31	438.97
江西	0.49	2.94	66.66	1.96	66.96	180.00
山东	0.96	6.08	2 092.86	127.49	4 355.65	11 708.00
河南	1.51	9.04	404.68	36.58	1 249.74	3 359.31
湖北	0.02	0.11	87.81	0.10	3.31	8.91
湖南	0.27	1.27	10.46	0.13	4.54	12.20
广东	0.14	0.78	222.91	1.74	59.45	159.79
广西	0.13	0.55	256.12	1.41	48.17	129.49
海南	0.00(015)	0.42	20.44	8.58	293.27	788.31
四川	1.14	2.35	6 525.40	153.35	5 239.15	14 082.84
贵州	3.19	18.10	88.08	15.94	544.69	1464.12
云南	1.38	3.50	197.71	6.92	236.42	635.50
西藏	0.05	0.04	4 807.70	1.92	65.70	176.60
陕西	2.34	11.38	68.94	7.85	268.05	720.51
甘肃	1.68	3.94	95.40	3.76	128.42	345.19
青海	0.77	1.07	142.50	1.52	51.93	139.59
新疆	7.60	4.56	961.00	43.82	1 497.10	4 024.19

注：赋煤区地热资源理论储量＝地热资源储量×赋煤区面积占比.

2.2.3　核能的开发与利用

随着小型模块化反应堆技术的发展，矿井地下空间成为极佳的核能储存和反应场所，能够大幅提升核电站建设与废料处理的安全性.

小型核反应堆作为一种新型的能源解决方案，具有规模小、灵活性强、建设周期短等优点[36-37]. 其紧凑的设计和模块化构造，使其在空间有限的地下环境中也能高效运作，适合在废弃矿井这样的封闭空间中安装和运行. 将核电站安装在废弃矿井内，可有效减少其对地表空间的占用，同时增强其抗自然灾害（如地震、洪水和飓风）的能力，并可降低辐射外泄的可能性，有助于反应堆的高效运行.

2.2.4　生物质能的开发与利用

废弃矿井可利用其地理条件和空间优势，为生物质能的生产和转化提供新的平台，在地表或地下空间中根据生物特性进行灵活布局.

1）沼气发电：沼气技术对资源的消耗低、效率高，并可直接作为生活燃料，同时沼气肥是一种能改良土壤优质的有机肥. 通过集中处理周边区域的有机废弃物，在废弃矿井地下空间内利用厌氧发酵技术产生沼气，用于社区发电或供热，可减少土地资源的浪费，促进产业结构的调整.

2）植物气化发电：在矿区周围种植生物质能源作物，通过地下气化技术将其转化为可燃气体进行发电，能减少对传统能源的依赖，是一种可持续的清洁能源解决方案.

2.2.5　太阳能与风能的地下综合利用

矿井上方的地表空间也可以与地下空间相结合，安装太阳能光伏电站和风力发电系统等，利用矿井内的储能设施进行能量的存储和调度.

1）“光伏＋储能”系统：在矿井周边部署光伏电池板，利用矿井内部的储能系统进行电力调节，在电力需求高峰期释放储存的能量，提高可再生能源的利用效率，实现稳定的电力输出.

2）“风电＋储能”系统：通过在矿井上方建设风力发电设施，结合地下压缩空气储能系统，有效缓解风电间歇性发电的问题，确保可再生能源的持续供应，平衡电网负荷.

2.3　功能化利用

2.3.1　基础设施与公共服务

废弃矿井功能化利用如图 9 所示，我国十大产

煤省份煤矿可利用井巷地下空间量估算值见表6.废弃矿井的地下空间由于其稳定的物理特性和相对隔绝的环境,使其在基础设施和公共服务领域具有广泛的应用潜力.

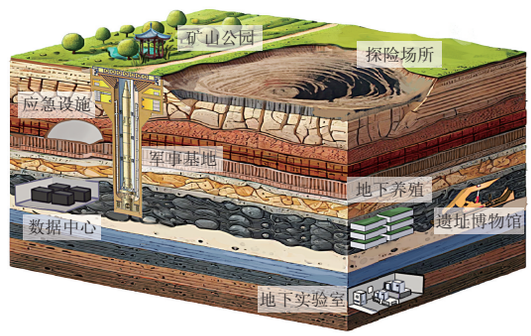


图9 功能化利用

Fig. 9 Function-oriented utilization

1)地下数据中心:在当今数字经济快速发展的背景下,数据中心的冷却成本高昂,而矿井的自然环境具备恒温、低湿的特点,能够显著降低冷却能耗,同时提升数据安全性和抗风险能力.利用废弃矿井中已有的矿井水形成水冷体系,还可进一步减少数据中心的能源消耗,提升数字基础设施的绿色环保水平.

2)应急避难所与地下医院:矿井的坚固结构和深层封闭性,使其非常适合作为应急避难所和地下医院,在自然灾害和突发公共事件中,地下避难所能够为居民提供安全庇护,并支持医疗救护站进行应急救治.通过改造矿井空间,可建设独立供电、供水和通风系统,确保在极端条件下提供必要的生活支持,增强城市的防灾能力,公共卫生应急体系提供有力保障.

3)储物仓库:将矿井改造成地下储存设施,可以有效减少物品的腐蚀、老化和受损风险,非常适合存放高价值的物品、文物和艺术品.矿井的封闭特性还提供了额外的安全保障,防止火灾和盗窃等,提高国家和企业应对突发事件的处理能力.

4)地下核废料储存:废弃矿井深部的地质环境稳定,密闭性好,环境温度相对恒定,湿度低,能够有效阻止中低放射性废物和乏燃料的外渗,减缓核废料容器的腐蚀速度.将废弃矿井的地下空腔建设为核废料长期封存场所,能够最大限度地减少放射性物质泄漏的风险,避免新建核废料储存设施的高昂成本,同时提升公众对核能开发的接受度.

表6 十大产煤省份不同产能煤矿可利用井巷地下空间量估算

Table 6 Estimated underground roadway space by production capacity in ten major coal-producing provinces

省份	0~300/(kt·a^{-1})		>300~1 200/(kt·a^{-1})		>1 200~5 000/(kt·a^{-1})		>5 000~10 000/(kt·a^{-1})		>10 000/(kt·a^{-1})		可利用空间合计/km^3
	系数	可利用空间/km^3	系数	可利用空间/m^3	系数	可利用空间/km^3	系数	可利用空间/km^3	系数	可利用空间/km^3	
内蒙古	0.20	540.0	0.17	26 163.0	0.15	36 555.0	0.15	30 630.0	0.12	40 080.0	133 968.0
山西	0.19	0	0.16	67 088.0	0.14	54 544.0	0.13	15 431.0	0.12	10 440.0	147 503.0
陕西	0.21	5 779.2	0.19	34 395.7	0.18	28 701.0	0.15	25 650.0	0.15	29 700.0	124 225.9
新疆	0.17	61.2	0.14	4 398.8	0.21	10 195.5	0.15	10 125.0	0.15	13 500.0	38 280.5
贵州	0.29	10 440.0	0.30	20 805.0	0.26	8 429.2					39 674.2
山东	0.21	504.0	0.19	9 159.9	0.17	7 556.5	0.15	4725.0			21 945.4
安徽	0.22	0.0	0.20	732.0	0.18	14 436.0	0.16	5 136.0	0.14	1 540.0	21 844.0
河南	0.28	5 367.6	0.26	12 342.2	0.25	18 745.0					36 454.8
宁夏	0.19	171.0	0.15	337.5	0.14	5 796.0	0.11	1 870.0	0.11	1 320.0	9 494.5
河北	0.18	216.0	0.16	1 888.0	0.15	6 352.5	0.14	798.0			9 254.5
合计		23 079.0		177 310.1		191 310.7		94 365.0		96 580.0	582 644.8

注:系数指煤矿规模(产能)与其井巷可利用地下空间量的比例系数.

2.3.2 科研与教育设施

废弃矿井地下环境低辐射、低噪音的特性非常适合开展高精度科学实验,同时,矿井的封闭性为培训和教育活动提供了真实的模拟环境,有助于提升科研和教育水平.

1)地下实验室:矿井深处的低辐射和稳定环境,适合开展暗物质探测、中微子研究以及地下水循环系统的模拟研究[38],是粒子物理、地质科学和环境科学研究的理想场所.建设深地原位实验室有助于推动基础科学的前沿探索,还能为新材料和新能源的开发提供创新平台,得到更高精度的实验结果.

2)培训与教育基地:废弃矿井可为采矿安全和工程技术培训提供真实环境,模拟实际矿井的

工作条件，进行新技术的测试与应用，增强应对突发事故的能力．还可用于校企合作，培养矿业工程、地质勘探和环境管理的专业人才，通过实践教学帮助学员掌握操作技能，为矿区安全生产和可持续发展提供支持．

2.3.3　文化旅游与运动场所

随着工业遗产保护意识的增强，废弃矿井的文化价值日益受到重视．通过对矿井的功能性改造，不仅可以将其转化为旅游景点，还能够推动区域文化和经济的融合发展，创造新的经济增长点．

1）矿山遗址公园：废弃矿井往往蕴含着丰富的工业历史，改造为矿山遗址公园后可以展示采矿历史和技术发展历程．吸引游客观光的同时，还能提升地方文化影响力，促进经济复兴，推动区域经济多元化．

2）地下探险与极限运动：利用矿井环境开发地下攀岩、漂流和探洞探险等运动景点，可以吸引户外运动爱好者．通过增加探险活动，可以为地方旅游业注入活力，并带动周边产业链的发展，提升矿区的知名度，成为区域品牌推广的重要手段．

2.3.4　特殊用途与军事化开发

废弃矿井的隐蔽性和深度优势，使其在军事和国家安全领域具有独特的应用潜力．通过改造，可以将其转化为军事设施，保障国家的战略安全需求．

1）军事指挥中心与地下基地：隐蔽和坚固是军事场所的重要特征，将废弃矿井地下空间改建为军事基地[39]，不仅能够作为国家防御的重要据点，还可用于军事训练和紧急指挥调度．地下基地良好的防护能力可以抵御地面攻击和自然灾害，为国家安全提供战略储备基地．

2）战略武器储备与防御设施：矿井深处的封闭环境能够确保武器和物资的安全存储，防止外部入侵和自然灾害．并且完备的矿井上、下设施与智能化监控系统，可以实现对储备物资的实时管理，有效提升国家的应急响应能力．

2.3.5　地下农业与养殖工厂

废弃矿井恒温、恒湿的环境为地下农业的发展提供了独特的条件．通过引入现代农业技术，可以在矿井内种植高附加值作物，实现全年无间断生产．

1）植物工厂：矿井地下封闭的环境中更便于控制光照、温度和湿度，确保作物在最佳条件下生长[40]．单一的生态环境也能够减少病虫害，提高作物产量，为城市提供新鲜农产品．同时，利用矿井水循环系统，可以有效减少淡水资源的消耗．

2）地下水产养殖：地下空间便于地下水的利用，且能够有助于控制水质，通过在矿井内部进行高密度的水产养殖，特别是高价值的鱼类和甲壳类养殖，能够提高养殖效益，防止自然灾害的影响．

3　协同开发利用关键问题

废弃矿井协同开发利用面临多重复杂挑战，涵盖了资源探测、动态开发、安全调控和产业集成等关键领域，既需要深入的机理研究，也依赖于先进技术与工程实践的支持．针对资源评估与分配、全生命周期开发优化、地下空间稳定性控制、多相多场碳封存与利用以及区域能源系统的高效协同，亟需构建系统化解决方案，以实现废弃矿井资源的高效利用和绿色发展，同时为区域经济可持续发展和全球能源转型提供重要示范和创新驱动．

3.1　“空-天-地-藏”资源动态探测与智能判识方法

矿产资源分布复杂多变，涉及地表、地下浅层和深层等多维空间，不同区域的资源特性存在显著差异；同时，矿产资源开发过程中资源赋存受自然或人为活动影响，会发生动态变化．现有的资源探测技术主要集中于单一维度或局部区域，缺乏覆盖全空间的综合探测手段，难以提供全面的资源分布与动态变化信息，且各数据获取手段之间的协同性较弱，不同探测技术采集的数据在分辨率、尺度和时效性上存在不兼容性，数据难以融合，资源评估结果的可靠性和精度受到限制．面对废弃矿井资源高效利用与环境安全协同发展的需求，亟需构建“空-天-地-藏”一体化资源探测体系，通过整合多源探测技术，实现资源从太空、天空、地面到矿藏的全覆盖动态监测与智能判识（图 10）．突破现有技术的瓶颈，为矿井资源的精准开发和环境风险评估提供科学依据，提升废弃矿井综合开发的效率与安全性．

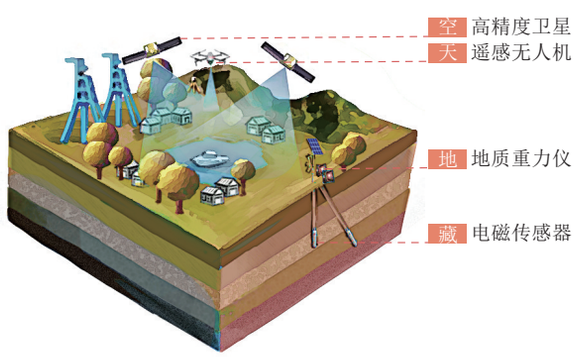


图 10　“空-天-地-藏”资源动态探测

Fig. 10　"Sky-Space-Ground-Subsurface" dynamic resource detection

“空-天-地-藏”资源动态探测技术研究方向的核心在于整合卫星通信定位、空基遥感扫描、地面探测和地下传感技术,实现多尺度、多维度资源探测,通过建立协同探测体系,全面捕获矿山及周边区域的资源分布与环境变化信息,并生成动态的资源监测图谱. 着力发展基于卫星遥感技术的地表资源探测、高光谱成像、雷达遥感等方法,提供矿区大范围、高时效性的地表资源分布信息;利用无人机搭载多类型传感设备,对矿井周边区域进行高精度扫描和浅层资源探测,补充地表细节信息;结合地质雷达、重力仪和电磁成像技术,精确探测浅层地下资源与结构特性参数;通过光纤传感器、深井电磁探测等技术,捕获矿井深部资源分布与动态变化. 推动多源数据的实时采集与时空关联分析,构建从地表到深地的全域资源探测网络,实现资源动态变化的实时跟踪.

智能判识方法是对多源探测数据进行高效整合与智能分析,为资源分布规律的精准识别和动态开发提供技术支撑. 聚焦于多源异构数据的高效融合与判识算法的开发,利用机器学习和深度学习技术从复杂数据中提取关键特征,解决数据类型多样、分辨率不一致等问题. 基于时空序列分析技术构建动态资源预测模型,量化资源状态的时空变化规律,为资源开发提供科学指导;整合实时监测数据,建立快速响应的智能感知与预警系统,对矿井资源动态变化和潜在环境风险进行实时评估. 通过可视化决策支持平台,将探测与判识结果以直观形式呈现,为政策制定和开发决策提供全面支持.

3.2 全生命周期资源利用时空统筹与开发优化模型

全生命周期资源利用具有明显的时空动态特征,不同阶段资源特性和利用目标差异显著. 废弃矿井资源当前开发多为单一模式,缺乏对全生命周期内资源开发的系统统筹,导致开发效率低下、资源浪费和环境压力增大. 同时各阶段资源开发的优先级和空间分布未能有效量化,“三化”(能源化、资源化、功能化)利用开发的时空协调不足,甚至存在冲突矛盾. 科学统筹矿井资源利用的时空关系,优化开发路径,最大化资源效益并最小化环境影响,是当前矿井开发利用的核心科学问题,提出全生命周期资源利用时空统筹与开发优化模型对提升资源利用效率、实现绿色开发和推动区域经济可持续发展具有重要意义.

全生命周期资源利用时空统筹技术的核心在于构建动态优化模型,从时间-空间维度科学划分资源开发阶段,平衡不同阶段的资源开发强度与生态环境保护需求. 建立资源开发的生命周期分期模型,结合资源分布特征、开发优先级和环境约束,量化各阶段的资源利用目标;开发基于时空大数据分析的动态分配算法,优化资源在时间和空间维度上的分步开发路径;构建区域资源开采与生态系统服务的耦合模型,评估资源利用与生态保护的协同效应;设计全生命周期管理平台,集成资源监测、动态评估和路径优化功能,支持开发方案的动态调整.

开发优化模型以资源利用效益最大化为目标,通过多目标优化方法解决资源分配、开发路径和环境保护之间的冲突. 构建多目标优化开发模型,综合考虑资源利用效率、经济效益、环境影响和社会效益,平衡开发过程中的相互扰动影响;开发基于人工智能的动态优化算法,结合时空序列数据实现资源利用策略的实时调整;研究资源开发的智能决策支持系统,通过融合资源探测、环境监测和动态优化技术,提供科学的开发决策建议;提出分布式开发模式,在保障资源高效利用的同时,提升区域经济发展的协调性和可持续性,为矿井全生命周期的绿色开发和高效管理提供技术支持.

3.3 地下空间协同开发稳定性控制与风险平衡机制

废弃矿井地下空间的多功能协同开发在带来资源综合利用效益的同时,也对地下结构的稳定性提出了严峻挑战. 矿井资源开发活动往往会带动地下岩层的力学、热力和水文条件的显著变化,可能会诱发地质灾害,造成地面塌陷、地下水污染和岩体破坏等,同时不同功能的开发在空间布局和环境需求上的冲突也增加了开发风险. 目前对协同开发过程中多场耦合作用的机理研究尚不完善,缺乏对地下空间稳定性动态控制与监管的科学方法和技术手段. 确保开发效益的同时实现地下空间的长期稳定性,建立风险平衡机制,是地下空间多功能协同开发的关键科学问题,对解决地下空间的安全开发和可持续利用具有重要意义.

地下空间稳定性控制的核心在于研究多物理场耦合作用下地下结构的动态行为,并设计基于实时监测的稳定性调控方法. 分析储能、开采和功能化利用对岩体应力分布、热场和水文系统的耦合影响,量化地下结构的动态变化范围;开发实时监测系统,捕获地下空间结构在开发过程中的细微变化,划分长期稳定性评估指标;设计动态稳定性预测模型,结合历史监测数据和实时反馈,评估地下开发对结构稳定性的潜在风险;提出基于监

测的调控方案，通过围岩支护、注浆加固和环境调控技术，动态调节地下空间的结构，实现对地下空间结构的动态感知和智能控制，降低协同开发潜在风险.

风险平衡机制致力于在多元开发过程中协调各功能模块的利用冲突，构建风险动态评估与应对体系，实现开发活动与环境安全的有机统一. 建立多功能利用的风险评估模型，综合考虑地质条件、开发活动和环境变化，评判不同开发方式对地下稳定性的影响；开发智能化风险预警系统，结合实时监测数据和人工智能算法，动态预测潜在风险并提出优化建议；研究空间利用冲突的协同调控方法，通过优化开发布局与时序接替安排，缓解不同利用方式间的相互影响；提出基于全生命周期的风险管理方案，涵盖前期的地质评估、中期的风险监控与控制、后期的修复与调整，确保地下空间的长期安全性，为矿井的多功能利用提供技术保障.

3.4　多相多场碳运移规律与三向控碳产业发展模式

废弃矿井地下空间作为碳封存与利用技术的重要载体，其内部气-液-固多相介质中碳的运移和转化过程涉及复杂的多场耦合作用. 然而，针对碳在多相介质中的跨尺度迁移规律的研究凤毛麟角，尤其在矿井复杂地质环境下，碳的分布动态、转化路径以及潜在泄漏风险尚未充分明确. 同时，减排、封存与利用之间的联动机制与产业集成模式还未成熟，缺乏全链条闭环绿色产业技术方案. 因此，揭示多相多场碳运移规律并构建适用于矿井环境的三向控碳（减排-封存-利用）模式（见图11），是废弃矿井碳中和战略中的核心科学问题，对推动绿色低碳产业发展和实现全球碳中和目标具有重要意义.

多相多场碳运移规律的研究核心在于揭示碳在矿井复杂介质中的动态行为，完善减排、封存与利用过程中的运移和转化机制，建立跨尺度的理论模型与试验验证体系，评估碳的长期封存稳定性. 通过实验室模拟与现场测试，研究碳在气-液-固多相介质中的吸附、扩散、溶解和矿化机制，量化不同地质条件下的碳运移动力学特征；构建跨尺度碳运移数值模型，将微观孔隙尺度的动力学行为与宏观矿井尺度的封存效应耦合，研究碳封存过程中多场之间的相互作用，揭示因注入压力变化、化学反应和地热梯度引发的封存稳定性变化规律，为碳减排和封存技术的优化设计及风险评估提供科学支撑.

三向控碳产业发展模式旨在构建“碳减排-封存-利用”的全链条绿色产业体系，实现碳资源的闭环管理与高效利用. 开发高效低能耗的碳减排技术，优化碳封存过程的系统设计，提出注入压力、地质条件与封存效率的协同调控方案；探索碳资源高值化利用路径，通过矿井内矿物碳化技术、微生物转化技术和化学反应路径，将二氧化碳转化为高附加值化学品或新能源载体；构建三向控碳产业链协调机制，形成基于区域资源禀赋的产业集成模式，实现减排、封存与利用环节的协同优化.

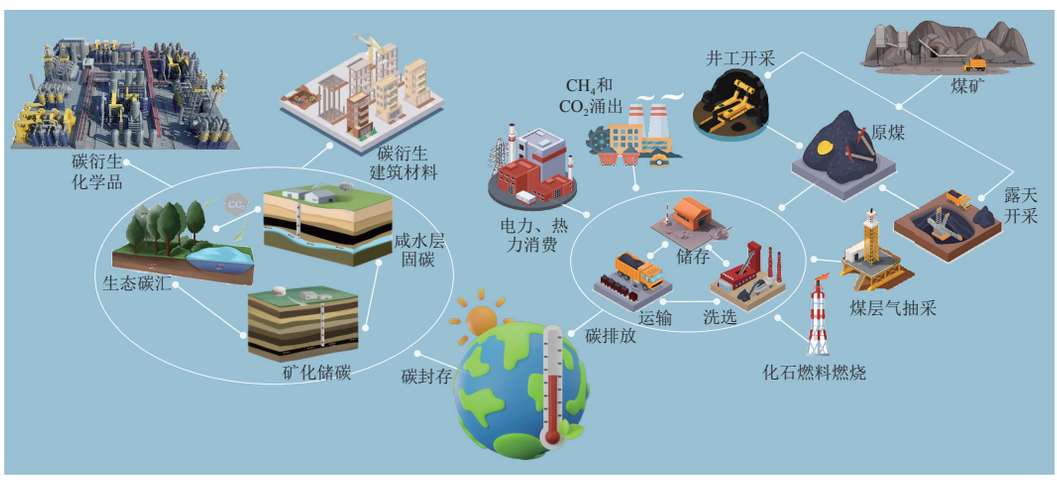


图11　废弃矿井三向控碳模式

Fig. 11　Triple-control carbon model for abandoned mines

3.5　区域能源转型与混合微电网产、供、储、销分配方案

在全球能源转型的背景下，区域能源系统正面临从传统化石能源向可再生能源的快速过渡. 然而，能源的间歇性与波动性特性对电力系统的稳定性和灵活性提出了更高要求. 废弃矿井区域同时具备新旧能源共存、储能、调节和能源转换的潜力，为区域能源转型提供了重要支撑. 但当前仍

缺乏传统能源的逐步退出与新型能源接入之间的衔接机制，导致资源利用率不高；区域能源系统的产、供、储、销链条无法动态匹配能源供需，影响能源结构优化；混合微电网的设计缺乏多能源融合的协同机制，新旧能源在经济性和灵活性上失衡．基于废弃矿井构建适应新旧能源并存的混合微电网系统，实现多能源之间的高效协同与动态调控，优化产、供、储、销各环节的分配方案，是区域能源转型的核心科学问题．

废弃矿井区域能源转型的技术研究核心在于充分利用新旧能源共存的特点，发挥废弃矿井储能与调节能力，建立协同开发与动态优化的区域能源系统，实现区域能源供需的动态平衡．开发基于废弃矿井的抽水蓄能、压缩空气储能和氢能存储技术，提升区域能源系统的调节能力和稳定性；设计分布式能源接入技术，优化风能、太阳能和生物质能等可再生能源的接入路径与能源配比；构建新旧能源交替的动态优化模型，量化不同能源形态在时空维度上的贡献率，平衡区域能源供应与需求；开发废弃矿井能源储存与转化的智能监控平台，实现对能量流动与转化过程的实时感知与动态调控．

混合微电网在废弃矿井区域的新旧能源融合交替中起着推动作用，旨在通过优化能源的生产、供应、存储和销售全链条，实现能源系统的经济性和可持续性(见图 12)．通过构建多目标优化混合微电网分配模型，集成传统能源发电与可再生能源接入技术，综合考虑能源成本、电网稳定性和生产碳排放；开发智能化能源调度算法，结合实时监测数据动态调整微电网的负载分配与运行策略；设计区域能源共享平台，促进用户间的能源互换与交易，提升能源利用效率；创新区域能源分布式电网保护与控制技术，优化储能技术在混合微电网中的部署，确保电力系统的可靠性与抗风险能力；探索基于废弃矿井的混合微电网商业化运营模式，明确新旧能源在产供储销环节的经济收益分配与政策激励，推动混合微电网的规模化应用，促进区域能源的低碳化、灵活化和高效化发展．



图 12　混合微电网产、供、储、销分配

Fig. 12　Production-supply-storage-distribution allocation in hybrid microgrids

4　废弃矿井发展规划构想

立足长远、科学布局，结合资源特性、区域条件和产业需求，制定系统性、可持续的废弃矿井开发规划，如图 13 所示．

在未来的发展过程中，应以目标导向为核心，逐步推进以实现由点及面的大范围推广；加强多主体协作，形成政府引导、市场驱动和社会参与的有机结合，实现资源开发与生态保护的平衡；以技术创新为驱动，以政策保障为支撑，推动废弃矿井从断崖式封闭管理向多元化、现代化和高效利用模式转型；通过科学的管理框架与执行体系，建立多层次协调机制，为绿色转型和高质量发展提供强有力的支撑．

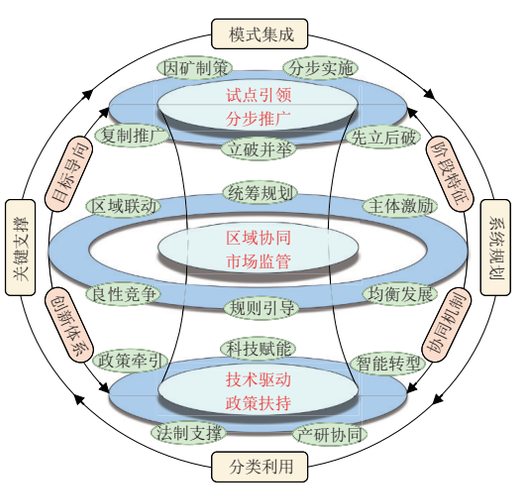


图 13　废弃矿井发展规划构想

Fig. 13　Development planning framework for abandoned mines

4.1　试点引领、分步推广

因资源特性、地质结构和开发潜力的显著差异，废弃矿井难以采用统一的开发模式进行全面推进．需要以试点工程作为科学探索的先导，验证技术方案可行性、优化废弃矿井开发路径、建立企业管理机制．聚焦矿井协同开发中的关键问题，选择具有典型性和代表性的矿井，开展多功能协同开发示范项目，探索技术与管理的适用性．在示范过程中，通过对资源禀赋、技术适配性和生态影响的综合评估，构建可复制的开发模式与标准化技术体系，实现从“已破再立”向“先立后破、立破并举”的废弃矿井利用模式转变．试点工程的实践成果将为后续大规模推广提供理论基础与实践支撑，确保开发利用活动的科学性和可操作性．

在试点经验基础上，逐步推进、分步推广，实现废弃矿井开发由局部突破到区域扩展的有序布局．推广过程坚持系统性与针对性相结合的原则，根据不同矿区资源分布与开发需求，制定分区分级的实施策略．通过逐步建立技术输出与管理协同机制，实现成功经验的高效转化与适应性扩展．科学评估不同区域的开发优先级，优化技术经济路径，形成从点到面的全面覆盖，将试点与推广有机结合，为废弃矿井的高效利用、生态保护和绿色转型提供全方位支持．

4.2　区域协同、市场监管

废弃矿井的开发利用面临资源和功能的多维度挑战，需要从单一矿井区域逐步扩展至更大范围的区域协同．先以单个矿井为核心建设探索，逐步统筹相邻矿区，最终构建跨区域、系统化的协同发展模式．强调因地制宜与整体协调并重，充分发挥不同矿区在资源类型、开发潜力和功能布局上的互补优势，提高资源利用效率，形成大范围废弃矿井开发利用经济增益．

推动区域协同进程中政府承担着核心责任，应加强对能源工作的组织领导和统筹协调，将能源工作纳入国民经济和社会发展规划、年度计划中，确保资源开发与生态保护的平衡．同时，为市场主体提供清晰的操作指引，引入公平竞争的市场机制，借助市场主体活力激发企业在废弃矿井开发中的主观能动性．逐步完善市场监管体系，以法律法规和技术手段确保开发活动的透明性、合规性与可持续性，促使企业在开发过程中更加注重效益和社会责任，形成高效有序的区域化废弃矿井开发利用良性竞争发展模式．

4.3　技术驱动、政策扶持

推进废弃矿井的协同开发利用，依赖于技术创新对全链条的赋能与升级．随着矿井功能从传统采掘向能源化、资源化与功能化的多元利用转型，对资源探测、开发路径优化、环境保护及智能化监测的技术需求日益增长．但当前针对废弃矿井复杂地质条件、资源高效回收及“三化”布局上尚存瓶颈，制约了矿井协同开发的规模化与持续性，亟需从关键技术突破到整体技术体系构建的全面提升．通过引入新一代智能化技术、自动化设备和多源探测手段，提升矿井资源利用的精度和效率，并减少开发过程中对生态环境的扰动；从资源驱动为主，向科技驱动为主转变，以能源新技术、新模式、新业态发展新质生产力，进一步推动核心技术的标准化与模块化，加速技术成果的推广与规模化应用．

技术创新与实践落地的关键在于政策扶持，政府需构建完善的政策体系，以立法形式明确废弃矿井开发的法律地位和规范要求，为项目实施提供法制保障，支撑废弃矿井开发从探索性阶段向规范化、产业化迈进．制定激励性政策，依托专项资金支持、税收优惠以及技术示范工程的优先审批手段，调动企业、科研机构和社会资本的参与积极性；注重区域间资源、技术和市场之间的协同、互动、融合，建立跨区域协作机制，加快区域自平衡向跨区域优化配置并重的转变；搭建多能源、多行业、多层次协同发展平台，强化技术共享理念，为废弃矿井开发注入持续动力．

5　总结与展望

废弃矿井在未来能源体系转型与生态文明建设中占据着重要的战略地位，其综合开发利用不仅是资源回收开发的重要途径，更是推动能源革命与绿色发展的关键阵地．通过全生命周期的科学规划与统筹管理，废弃矿井能够在资源开发、能源转化与生态修复等方面实现协同效应，成为构建现代能源体系和助力区域经济高质量发展的重要载体．废弃矿井协同开发利用的功能定位已从传统能源剩余资源的高效回收，拓展至新兴能源储备、智能化储能及多功能综合利用，为区域经济转型和生态价值提升提供了新方向．

展望未来，全球能源结构向多元化、清洁化、智能化转型的趋势日益显著，废弃矿井将在这一转型过程中发挥基础性和关键性作用．通过构建

覆盖生命周期全阶段的系统化管理机制，废弃矿井将进一步强化传统能源与新型能源协同开发的枢纽功能，为绿色低碳技术的应用与规模化推广提供实践平台．在政策引导与技术创新的双轮驱动下，废弃矿井开发将逐步形成可推广、可复制的标准化模式，不仅能推动区域经济的绿色转型，还将在全球能源治理和生态建设中发挥重要示范效应，为构建可持续的现代能源体系与低碳社会提供坚实支撑．

参考文献：

[1] 袁　亮，王恩元，马衍坤，等．我国煤岩动力灾害研究进展及面临的科技难题[J]．煤炭学报，2023，48(5)：1825-1845.
YUAN Liang，WANG Enyuan，MA Yankun，et al.Research progress of coal and rock dynamic disasters and scientific and technological problems in China [J].Journal of China Coal Society，2023，48(5)：1825-1845.

[2] 华凯敏，季轩宇，陈志强，等．“碳中和”战略背景下制氢技术与“绿氢”还原CO_2转化利用技术的进展、挑战及前景[J]．中国矿业大学学报，2025，54(3)：680-697.
HUA Kaimin，JI Xuanyu，CHEN Zhiqiang，et al.Progress，challenges and prospects of hydrogen production technologies and CO_2 reduction and utilization with "green hydrogen" under the "carbon neutrality" strategy [J].Journal of China University of Mining & Technology，2025，54(3)：680-697.

[3] 邹才能，李士祥，熊　波，等．新能源新兴产业在推动新质生产力中的地位与作用[J]．石油学报，2024，45(6)：889-899.
ZOU Caineng，LI Shixiang，XIONG Bo，et al.Status and role of emerging industries of new energy in promoting new quality productive forces [J].Acta Petrologica Sinica，2024，45(6)：889-899.

[4] 孔令峰，东　振，陈艳鹏，等．基于中深层煤原位清洁转化技术构建低碳能源生态圈[J]．天然气工业，2022，42(9)：166-175.
KONG Lingfeng，DONG Zhen，CHEN Yanpeng，et al.Construction of low-carbon energy ecosystem based on in-situ clean conversion technology of medium-deep coal[J].Natural Gas Industry，2022，42(9)：166-175.

[5] 姜培学，金红光．面向“双碳”目标的能源转化利用领域前沿交叉战略研究[J]．科学通报，2024，69(34)：5007-5015.
JIANG Peixue，JIN Hongguang.A strategic study of interdisciplinary frontier in the field of energy conversion and utilization for the “dual carbon” goals [J].Chinese Science Bulletin，2024，69(34)：5007-5015.

[6] 习近平．以美丽中国建设全面推进人与自然和谐共生的现代化[J]．求是，2024(1)：4-9.
XI Jinping. Building a beautiful China：Promoting harmony between humanity and nature [J]. QIUSHI，2024(1)：4-9.

[7] 孙晶琪，秦玉杰，黄甫思卿，等．能源低碳转型下计及边际贡献的省级电源结构优化研究[J]．太阳能学报，2025，46(3)：263-271.
SUN Jingqi，QIN Yujie，HUANGFU Siqing，et al.Provincial power structure optimization considering marginal contribution under energy low-carbon transition [J].Acta Energiae Solaris Sinica，2025，46(3)：263-271.

[8] 金之钧，张　川，王晓峰，等．关于中国碳中和与能源转型实现路径的思考[J]．石油与天然气地质，2024，45(3)：593-599.
JIN Zhijun，ZHANG Chuan，WANG Xiaofeng，et al.A pathway to China′s energy transition in a carbon neutrality vision [J].Oil & Gas Geology，2024，45(3)：593-599.

[9] 孟凡非，浦　海，倪宏阳，等．关闭矿井采空区破碎岩体再断裂机制及空隙结构演化特性[J]．煤炭科学技术，2024，52(2)：104-114.
MENG Fanfei，PU Hai，NI Hongyang，et al.Research on re-fracturing mechanism and cavity structure evolution characteristics of broken rock mass in goaf of closed mine [J].Coal Science and Technology，2024，52(2)：104-114.

[10] 胡彦勇，张　瑞，郄晓彤，等．全生命周期下中国煤炭资源能源碳排放效率评价[J]．中国环境科学，2022，42(6)：2942-2954.
HU Yanyong，ZHANG Rui，QIE Xiaotong，et al.Evaluation of China′s coal resource energy carbon emission efficiency in the whole life cycle [J].China Environmental Science，2022，42(6)：2942-2954.

[11] 刘　峰，郭林峰，赵路正．双碳背景下煤炭安全区间与绿色低碳技术路径[J]．煤炭学报，2022，47(1)：1-15.
LIU Feng，GUO Linfeng，ZHAO Luzheng. Coal safety range and green low-carbon technology path under the dual-carbon background [J]. Journal of China Coal Society，2022，47(1)：1-15.

[12] 郑美楠，邓喀中，张宏贞，等．基于InSAR的关闭矿井地表形变监测与分析[J]．中国矿业大学学报，2020，49(2)：403-410.
ZHENG Meinan，DENG Kazhong，ZHANG Hongzhen，et al.Monitoring and analysis of surface deformation in closed mine based on InSAR [J].Journal of China University of Mining & Technology，2020，49(2)：403-410.

[13] 武　强，李松营．闭坑矿山的正负生态环境效应与

对策[J].煤炭学报,2018,43(1):21-32.
WU Qiang, LI Songying. Positive and negative environmental effects of closed mines and its countermeasures [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1):21-32.

[14] 师　鹏,万志军,张　源,等.深部矿井煤层注水取热能力与预冷效果分析[J].采矿与安全工程学报,2025,42(5):1188-1203.
SHI Peng, WAN Zhijun, ZHANG Yuan, et al. Analysis of heat extraction capacity and pre-cooling effect during water injection ahead of coal seam extraction in deep mines [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2025, 42(5):1188-1203.

[15] 程建超,刘殷彤,王路军,等.水力耦合作用下层间岩体渗透压差衰减时空演化理论模型[J].岩石力学与工程学报,2025,44(10):2715-2733.
CHENG Jianchao, LIU Yintong, WANG Lujun, et al. Spatiotemporal modelling of decaying evolution of seepage pressure difference in interlayer rock under hydraulic-mechanic coupling [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2025, 44(10): 2715-2733.

[16] 李姗姗,范明轩,袁　亮.我国“双碳”政策效应研究:基于文本挖掘的量化分析[J].中国矿业大学学报,2025,54(1):227-236.
LI Shanshan, FAN Mingxuan, YUAN Liang. Research on the effect of China's “Dual-Carbon” policy: Quantitative analysis based on text mining [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2025, 54(1):227-236.

[17] 白桦林,王　青,江　华.中国光伏产业组件退役规模测算模型[J].太阳能学报,2025,46(3):435-444.
BAI Hualin, WANG Qing, JIANG Hua. Modeling of decommissioned photovoltaic module scale in China [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2025, 46(3): 435-444.

[18] 田坤鹏,韩建振,臧　义,等.电力系统风险规避投资模型及分布式求解策略[J].太阳能学报,2024,45(11):34-39.
TIAN Kunpeng, HAN Jianzhen, ZANG Yi, et al. Risk-averse investment models and distributed solution strategies for power systems [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2024, 45(11):34-39.

[19] 张俊杰,白中科,杨博宇.新疆荒漠露天矿区生态受损及砾幕层重构方法研究[J].地学前缘,2021,28(4):142-152.
ZHANG Junjie, BAI Zhongke, YANG Boyu. Gravel curtain layer in the desert open-pit mining area of Xinjiang: Ecological damage and reconstruction method [J]. Earth Science Frontiers, 2021, 28(4):142-152.

[20] 侯梅芳,葛　苏,程小岛.新形势下中国能源安全的内涵、挑战和举措[J].天然气工业,2022,42(9):157-165.
HOU Meifang, GE Su, CHENG Xiaodao. China's energy security under the new situation: Connotation, challenges and strategic initiatives [J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(9):157-165.

[21] 司起步,邱　硕,毕胜山,等.碳强度和水资源约束下2030年中国西北五省能源供给规划研究[J].西安交通大学学报,2022,56(5):31-42.
SI Qibu, QIU Shuo, BI Shengshan, et al. Energy supply planning of the five northwest provinces in 2030 under carbon intensity and water resource constraints [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(5):31-42.

[22] 罗　锦,李英明,郭庆彪,等.关闭矿井地表抬升变形特征及其影响因素[J].煤田地质与勘探,2025,53(2):118-129.
LUO Jin, LI Yingming, GUO Qingbiao, et al. Deformation characteristics and influential factors of the surface uplift of closed mines [J]. Coal Geology & Exploration, 2025, 53(2):118-129.

[23] 杨勇平,陈　衡,郝俊红,等.“双碳”目标下我国燃煤发电转型升级发展路径[J].中国电机工程学报,2024,44(17):6900-6910.
YANG Yongping, CHEN Heng, HAO Junhong, et al. Development pathways for the transformation and upgrading of China's coal-fired power generation under the goals of carbon peak and carbon neutrality [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(17):6900-6910.

[24] 张遂安,张典坤,彭　川,等.中国煤层气产业发展障碍及其对策[J].天然气工业,2019,39(4):118-124.
ZHANG Suian, ZHANG Diankun, PENG Chuan, et al. Obstacles to the development of CBM industry and countermeasures in China [J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(4):118-124.

[25] 张　冰,王汉鹏,袁　亮,等.废弃煤矿压缩空气储能过程力-热-流耦合相似准则建立与分析[J].中国矿业大学学报,2025,54(4):743-753.
ZHANG Bing, WANG Hanpeng, YUAN Liang, et al. Establishment and analysis of thermo-hydro-mechanical coupling similarity criteria for compressed air energy storage process in abandoned coal mines [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2025, 54(4):743-753.

[26] 温志新,王建君,王兆明,等.2023年全球油气及伴生资源勘探形势与发展趋势展望[J].石油勘探与开发,2024,51(6):1267-1279.
WEN Zhixin, WANG Jianjun, WANG Zhaoming, et al. Analysis of the current status of global oil, gas, and associated resources exploration in 2023 [J]. Petro-

leum Exploration and Development, 2024, 51(6): 1267-1279.

[27] 吴占伟,黄炳香,赵兴龙,等.我国煤系共伴生矿产赋存特征及分布规律[J].采矿与安全工程学报,2024,41(1):29-46.
WU Zhanwei, HUANG Bingxiang, ZHAO Xinglong, et al. Occurrence characteristics and distribution of paragenetic commercial minerals and associated minerals in coal-bearing strata in China [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2024, 41(1): 29-46.

[28] 刘淑琴,刘 欢,纪雨彤,等.深部煤炭地下气化制氢碳排放核算及碳减排潜力分析[J].煤炭科学技术,2023,51(1):531-541.
LIU Shuqin, LIU Huan, JI Yutong, et al. Carbon emission accounting and carbon reduction analysis for deep coal underground gasification to hydrogen [J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 531-541.

[29] 程 洋,刘 薇,张 娜,等.神东采煤沉陷区生态环境一体化监测技术与应用[J].煤田地质与勘探,2024,52(12):143-154.
CHENG Yang, LIU Wei, ZHANG Na, et al. An integrated ecosystem monitoring technology for coal mining subsidence areas and its application in the Shendong mining area [J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(12): 143-154.

[30] 王方田,张辰凯,张 村,等."双碳"目标驱动下煤系伴生资源协同开发技术框架[J].科技导报,2024,42(7):40-55.
WANG Fangtian, ZHANG Chenkai, ZHANG Cun, et al. A collaborative development framework of coal-related resources under carbon peaking and carbon neutrality goals [J]. Science & Technology Review, 2024, 42(7): 40-55.

[31] 杜颜胜,李佳岐,陈志华,等.矩形截面钢管尾矿砂再生混凝土柱抗震性能研究[J].建筑结构学报,2022,43(11):63-73.
DU Yansheng, LI Jiaqi, CHEN Zhihua, et al. Study on seismic performance of rectangular concrete-filled steel tube columns made with tailings and recycled aggregates [J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(11): 63-73.

[32] 姜彬慧,姜 琦,周星星,等.煤矸石及其自燃风化土中可培养细菌的分离与解磷抗镉特性[J].东北大学学报(自然科学版),2020,41(10):1438-1444.
JIANG Binhui, JIANG Qi, ZHOU Xingxing, et al. Isolation of cultivable bacteria in coal gangue spontaneous combustion weathered soil and phosphate-solubilizing and cadmium-resistant characteristics [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2020, 41(10): 1438-1444.

[33] WANG M, GUO P Y, JIN X, et al. Evaluation of development potential of pumped hydroelectric storage and geothermal utilization system in abandoned coal mine [J]. Journal of Central South University, 2024, 31(8): 2872-2890.

[34] GUO P Y, ZHENG L G, SUN X M, et al. Sustainability evaluation model of geothermal resources in abandoned coal mine [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 144: 804-811.

[35] WANG M, GUO P Y, FANG C, et al. Investigation of evaluation models for geothermal resources and intermittent operation/cycle thermal storage mode in closed coal mines [J]. Geothermics, 2025, 129: 103294.

[36] 李 政,陈楚琦,曾文杰,等.小型压水堆核蒸汽供应控制系统参数多目标优化研究[J].核动力工程,2024,45(6):185-191.
LI Zheng, CHEN Chuqi, ZENG Wenjie, et al. Research on multi-objective optimization of parameters of small pressurized water reactor nuclear steam supply control system [J]. Nuclear Power Engineering, 2024, 45(6): 185-191.

[37] 朱 攀,习蒙蒙,许东芳,等.模块式小型堆多样性保护系统研究与设计[J].核动力工程,2022,43(增2):228-233.
ZHU Pan, XI Mengmeng, XU Dongfang, et al. Research and design of diversity protection system for small modular reactor [J]. Nuclear Power Engineering, 2022, 43(Sup 2): 228-233.

[38] 谢和平,张 茹,张泽天,等.深地科学与深地工程技术探索与思考[J].煤炭学报,2023,48(11):3959-3978.
XIE Heping, ZHANG Ru, ZHANG Zetian, et al. Reflections and explorations on deep earth science and deep earth engineering technology [J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(11): 3959-3978.

[39] 孙中博,赵毅鑫,任建东.废弃矿井地下空间再利用根源因素识别及评价模型构建[J].中国矿业大学学报,2024,53(3):585-599.
SUN Zhongbo, ZHAO Yixin, REN Jiandong. Identification of fundamental factors and construction of evaluation model for the utilization of underground space in abandoned mines [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2024, 53(3): 585-599.

[40] 郭 林,毛佳玲,何 凯,等.煤矿开采区地下水微生物群落结构与功能及其对环境的响应[J].地球科学,2024,49(9):3252-3263.
GUO Lin, MAO Jialing, HE Kai, et al. Microbial community structure and function in groundwater of abandoned coal mine and its response to environment [J]. Earth Science, 2024, 49(9): 3252-3263.

(责任编辑 沈春妮 仝 腾)