DOI 10.15302/J-SSCAE-2024.12.029

煤炭与共伴生矿产资源一体化绿色开发战略研究

康红普[1]，谢和平[2]，王双明[3]，任世华[4*]，张亚宁[4]，王保强[1]，
陈佩佩[1]，焦小淼[4]，郑德志[4]，任仰辉[4]，刘跃东[1]

（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. 西安科技大学地质与环境学院，西安 710054；4. 煤炭科学研究总院有限公司，北京 100013）

摘要：煤炭是我国能源安全的压舱石，与煤炭共伴生的矿产资源种类多、分布广泛、储量丰富、利用价值高，推进煤炭与共伴生矿产资源一体化绿色开发是新时期提高矿产资源开发利用效率、加快发展方式绿色转型、保障国家能源和资源安全的必然要求。本文系统梳理了煤炭与共伴生矿产资源的组合类型及分布特征，分析了煤炭与共伴生矿产资源开发的技术成熟度，总结了包括技术一体化、开发主体一体化、管理一体化、产业链一体化在内的4种典型开发模式，评价了经济、安全、生态三方面的开发效益，总结了当前在政策、技术、经济性等方面存在的关键问题。在此基础上，描绘了我国煤炭与共伴生矿产资源一体化绿色开发的发展蓝图，提出了“三步走”的发展目标，建立了涵盖一体化数字勘查设计技术、安全高效协同开发技术、智能绿色低碳技术的一体化绿色开发技术体系，构建了“四个推进，一个探索”的发展路径框架。研究建议，完善矿权管理制度、形成共探共采机制、加大科技创新投入、建立协同勘查开发激励机制，推进煤炭与共伴生矿产资源一体化绿色开发。

关键词：煤炭；共伴生资源；一体化开发；绿色开发；负碳充填开采技术；深部原位流态化开采技术
中图分类号：R-1　　**文献标识码：**A

Research on the Integrated Green Development Strategy of Coal and Co-existed and Associated Resources

Kang Hongpu[1], Xie Heping[2], Wang Shuangming[3], Ren Shihua[4*], Zhang Yaning[4], Wang Baoqiang[1], Chen Peipei[1], Jiao Xiaomiao[4], Zheng Dezhi[4], Ren Yanghui[4], Liu Yuedong[1]

(1. China Coal Technology and Engineering Group, Beijing 100013, China; 2. Institute of Deep Earth Science and Green Energy, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong, China; 3. Geological Research Institute for Coal Green Mining, Xi’an University of Science and Technology, Xi’an 710054, China; 4. China Coal Research Institute Co., Ltd., Beijing 100013, China)

Abstract: Coal is the cornerstone of China’s energy security. There are many types and wide distributions of coal associated resources, with abundant reserves and high utilization value. Promoting the integrated green development of coal and associated resources is an inevitable requirement for improving the efficiency of resource development and utilization, accelerating the green transformation of development mode, and ensuring national resource security in the new era. This article clarifies the combination

收稿日期：2024-12-23；**修回日期：**2025-01-14
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：国家重点研发计划项目(2023YFC2907600)；中国工程院咨询项目“矿山立体空间能源化低碳化利用战略研究”(2024-XZ-30)，“煤炭与共伴生能源资源一体化绿色开发战略研究”(2023-XZ-19)
本刊网址：sscae.engineering.org.cn

types, distribution and typical resources of coal and associated resources. The technological maturity of coal and associated resource development has been analyzed. Four typical development models of coal and associated resource technology integration, development subject integration, management integration, and industrial chain integration have been analyzed. The development benefits in terms of economy, security, and ecology have been evaluated and the key problems currently existing have been summarized. On this basis, a strategic blueprint for the integrated green development of coal and associated resources in China has been depicted, the “three-step” strategic goal has been proposed, the integrated green development technology system covering integrated digital survey and design technology, safe and efficient collaborative development technology, and intelligent green low-carbon technology has been constructed, and the strategic path framework of “four advances, one exploration” has been constructed. Finally, policy recommendations have been put forward to promote the integrated green development of coal and associated resources, including improving the mining rights management system, forming a joint exploration and mining mechanism, increasing investment in scientific and technological innovation, and establishing a coordinated exploration and development incentive mechanism.

Keywords: coal; co-existed and associated resources; integrated mining; green mining; carbon-negative backfill mining technology; deep in-situ fluidized mining technology

一、前言

矿产资源一体化绿色开发是保障国家能源和资源安全的重要举措。党中央、国务院多次提出推进矿产资源一体化开发利用，提高矿产资源开发保护水平，推进发展方式绿色转型；我国主要产煤省份相继出台政策文件以加快发展，如山西省发布《关于煤系地层矿产资源综合开发的意见》（2023 年），推动煤炭开采与利用方式变革，构建煤炭与共伴生矿产资源一体开发新格局。近年来，我国对矿产资源一体化开发的要求逐步提高[1,2]。2023 年，我国有 37 种矿产的消费量居世界第一位，其中有 23 种矿产的消费量超过 50%[3]。但受储量、赋存条件等限制，我国矿产资源长期自给能力有限，对外依存度较高；24 种战略性矿产中有 21 种依赖进口、12 种对外依存度超过 70%、15 种战略性金属矿产已经从优势矿产转变为紧缺矿产[4]。尤其是在当前地区冲突仍在持续、中美贸易摩擦和地缘政治竞争日益加剧的背景下，我国矿产资源的国际供应风险不断攀升。

煤炭是我国能源安全的压舱石，煤系共伴生资源种类多、分布广泛、储量丰富、利用价值高。在目前已发现的 173 种矿产中，有 85 种矿产与煤系共伴生或直接相关联[5,6]。煤系中不仅赋存保障国家能源安全的煤层气、铀等能源矿产，更是发展高新技术和制造国防产品所需稀土、镓、锗、铌、锆等战略性金属矿产增储的重要来源[7~9]。在山西、内蒙古、新疆、贵州等省份的煤系中，战略性金属富集并成矿的案例诸多。铝土矿、铀矿、锗等典型煤系共伴生矿产储量在全国总储量的占比高于 50%，部分粉煤灰中的战略性金属丰度甚至高于传统金属矿床，一些矿产价值高于煤本身[10~13]。例如，在国家稀缺矿产资源的富集地准格尔矿区，与煤炭共伴生的氧化铝储量高达 3.5×10^9 t，是我国铝土矿可采储量的 12 倍；伴生镓的储量为 8.6×10^5 t，相当于世界总储量的 80%；伴生锂的储量为 2.6×10^6 t，相当于我国总储量的 51%[14]。此外，我国 42 个主要含煤盆地埋深 2000 m 以浅的煤层气地质资源量达 3.681×10^{13} m^3，占世界煤层气总量的 12%[15,16]。

煤炭与共伴生矿产资源是经济社会发展的重要支撑[17~19]，推进一体化绿色开发是新时期提高矿产资源开发利用效率、加快发展方式绿色转型、保障国家能源和资源安全的必然要求，迫切需要系统研究和谋划，加快推进。当前，部分煤系共伴生资源已实现工业化开发利用，煤与煤层气共采等已具有一定规模，协同效益明显。相关学者在理论技术、矿权政策等方面进行了大量研究。在赋存与分布规律方面，煤系矿产聚集分布成矿理论独具特色，构建了煤系关键金属及煤层气地质理论体系，分析了煤系共伴生矿产在煤层中及煤层附近均可单独成矿，分布规律呈现明显的时期性和区域性特征[20~23]；在勘查和开发方面，初步构建了煤与煤系矿产资源协同勘查理论与技术方法体系框架[24~31]，在此基础上，综合考虑不同矿种的开采工艺、设备等因素，探索形成了煤与部分共伴生矿产资源的协同开发模式及配套共采工艺和技术[32~36]，提出应同步加强煤系中优势和紧缺战略性金属矿产的勘查开发研究等[13]；同时，梳理了煤炭与共伴生矿产资源加工和利用的研究进展[37~39]、体制机制、管理政策等[40,41]，为未来煤系共伴生矿产资源的综合利用提供了一定借鉴。整体来看，煤炭与共伴生矿产资源协同共采已取得了部分积极成效，但受制于理念认识、体制

机制、技术工艺等因素，实现一体化绿色开发还存在一定差距和挑战。

本文在总结煤炭与共伴生矿产资源组合类型及分布情况的基础上，分析煤炭与共伴生矿产资源开发的技术成熟度、典型模式和开发效益，归纳当前存在的关键问题，描绘煤炭与共伴生矿产资源一体化绿色开发的发展思路，提出发展目标、技术体系、发展路径和对策建议等，以期为我国煤炭与共伴生矿产资源一体化绿色开发提供借鉴和参考。

二、煤炭与共伴生矿产资源概况

（一）煤炭与共伴生矿产资源的组合类型

参考《矿产资源法实施细则》中的“矿产资源分类细目”，结合赋存特征、成因机制等，煤炭共伴生矿产资源指在煤的形成和聚集过程中，与煤层一起共生 / 伴生的能源、金属、非金属、水气矿产等。能源矿产主要包括煤层气、油页岩、铀等；金属矿产包括稀土、锂、锗、钨等战略性矿产以及铝、铁等大宗矿产；非金属矿产主要包括高岭土、石墨、耐火黏土、硅藻土、萤石等[42]；水气矿产包括地下水等。以耦合成矿（藏）机理和赋存现状为依据，结合相关进展[43]，本研究将煤炭与共伴生矿产资源种类组合划分为煤与能源矿产、金属矿产、非金属矿产、水气矿产等4个基本组合类型，7个组合类型大类，以及煤与煤系气、油页岩、锗、镓等20多个主要组合类型，如图1所示。

（二）煤炭共伴生矿产资源的分布特征

与煤炭共伴生的矿产资源在煤层及顶底板、附近岩层中均有赋存。在我国华北、东北、西北、华南、滇藏五大赋煤区中，煤炭共伴生矿产资源丰富、矿种齐全，发育了煤层气、砂岩型铀矿、锗、镓、耐火黏土、石墨、地下水等多类资源，潜在的

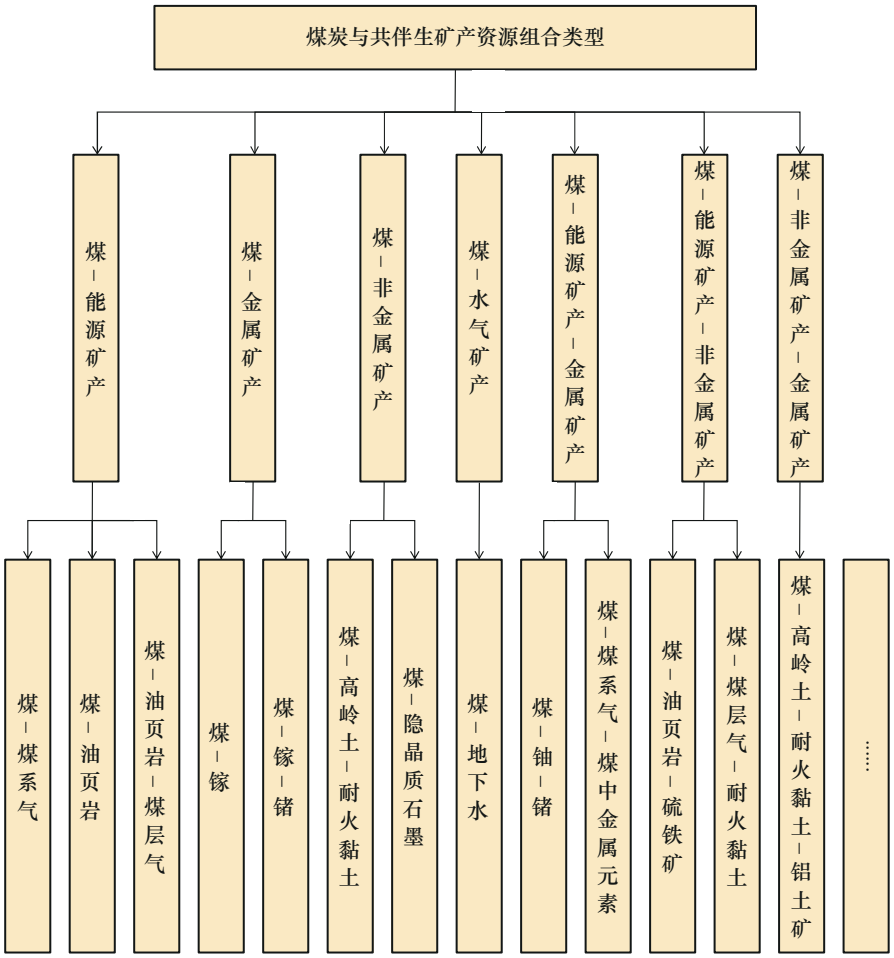

图1　煤炭与共伴生矿产资源组合类型

经济价值高，分布特点各异。

东北赋煤区分为东部赋煤亚区、中部赋煤亚区、西部赋煤亚区，包含11个赋煤带，区内含煤地层分布广泛，有早、中侏罗统，早白垩统及古近系。在平面上，该区煤系矿产资源在3个赋煤亚区均有不同类别、不同程度的展布。在垂向上，煤系能源矿产分布时代较为宽泛，煤系金属矿产分布时代最为集中。东北赋煤区主要发育煤层气、页岩气、油页岩、砂岩型铀矿、锗、镓、硅藻土、硫铁矿、耐火黏土、煤系石墨等煤系矿产资源。

华北赋煤区位于华北古大陆板块主体部位，包括华北北缘、鄂尔多斯煤盆地、山西块坳、华北东部以及南华北盆地5个赋煤亚区，共22个赋煤带。该区聚煤期主要为石炭二叠纪，其次为早、中侏罗世，晚三叠世，古近纪[44]。在平面上，煤系矿产资源的分布以鄂尔多斯盆地赋煤亚区最为广泛，其次为山西块坳赋煤亚区。在垂向上，华北赋煤区不同的煤系矿产资源种类具有各自典型的有利赋存时期，如煤系铝土矿和铁分别在本溪组中上部、羊虎沟组较为发育。华北赋煤区主要发育煤系气、油页岩、砂岩型铀矿、“三稀”金属、铝土矿、铁、高岭土、耐火黏土等煤系矿产资源。

西北赋煤区分为准噶尔盆地（北疆）赋煤亚区、塔里木盆地（南疆）赋煤亚区、祁连－走廊赋煤亚区，共16个赋煤带，区内有石炭－二叠纪、晚三叠世、早－中侏罗世、早白垩世各地质时代含煤地层，其中以早－中侏罗世含煤地层为主。在平面上，西北赋煤区煤系矿产资源主要赋存在祁连－走廊赋煤构造亚区，在准噶尔盆地（北疆）赋煤构造亚区、塔里木盆地（南疆）赋煤构造亚区的煤系矿产资源种类较少。在垂向上，煤系矿产资源主要集中分布于侏罗纪和石炭纪。西北赋煤区主要发育煤层气、煤系页岩气、致密砂岩气、天然气水合物、油页岩、砂岩型铀矿、“三稀”金属、高岭土、耐火黏土等煤系矿产资源。

华南赋煤区划分为扬子赋煤亚区和华夏赋煤亚区，区内中、晚二叠世煤系全区发育，其次为晚三叠世煤系，新近纪煤系则局限于西南部滇东一带，煤类齐全，从褐煤到无烟煤均有分布。在垂向上，该区煤系矿产资源从早石炭世到新近纪均有分布，以二叠纪煤系矿产资源的种类最为丰富。华南赋煤区主要发育煤系气、油页岩、锂、稀土、镓、锗、铌、铝土矿、锰矿、隐晶质石墨、硫铁矿、高岭土、耐火黏土等煤系矿产资源。

滇藏赋煤区分为青南—藏北赋煤亚区、藏中（冈底斯）赋煤亚区、滇西赋煤构造亚区3个赋煤亚区，包括13个赋煤构造带，区内从石炭纪至新近纪各地质时代的含煤地层均有发育，其中以早石炭世、晚二叠世较为重要，其次为晚三叠世以及滇西的新近纪含煤地层[45]。滇藏赋煤区煤系矿产资源研究程度较低，在平面和垂向上，不同的煤系矿产资源赋存的成煤时代也有明显差异。滇藏赋煤区主要发育页岩气、煤层气、天然气水合物、铀、油页岩、锗、铁、钒、硅藻土、石膏等煤系矿产资源。

三、煤炭与共伴生矿产资源一体化绿色开发的可行性分析

面向煤炭与共伴生矿产资源的主要组合类型，调研国内外典型开发案例和技术案例（见图2），分析煤炭与共伴生矿产资源一体化绿色开发的技术成熟度、一体化方式并评价开发效益。

（一）技术成熟度分析

当前，煤炭与煤层气等部分共伴生矿产资源一体化绿色开发技术已较为成熟，处于推广和应用阶段，但仍有大部分技术处于示范和研究探索阶段。

1. 推广和应用阶段

煤与煤层气、矿井水等一体化绿色开发技术已相对成熟，处于推广和应用阶段[46,47]。山西省晋城市的寺河煤矿持续开展煤与煤层气共采理论和关键技术攻关，实施了地面超前预抽、井上井下联合抽采、井下区域递进式精准抽采，实现了地面、井下相结合的“两条腿走路”的煤与瓦斯共采模式。该技术和模式逐步推广到甘肃省窑街、河南省平顶山等高瓦斯煤矿区，为煤与煤层气共采开辟了可供复制、借鉴的技术路径。神东矿区创新发展了煤矿分布式地下水库储水技术，已在15个矿井建成了35座地下水库，总储水量约为2.5×10^7 m^3，提供了95%的矿区生产用水，实现了矿区水资源立体循环生态和生活用水，大幅减少了外购水和排水，在煤炭资源高效开发的同时，实现了矿井水的保护和利用。

2. 工业示范阶段

煤与铝、镓、锂、铝土矿、铀、天然气等部分

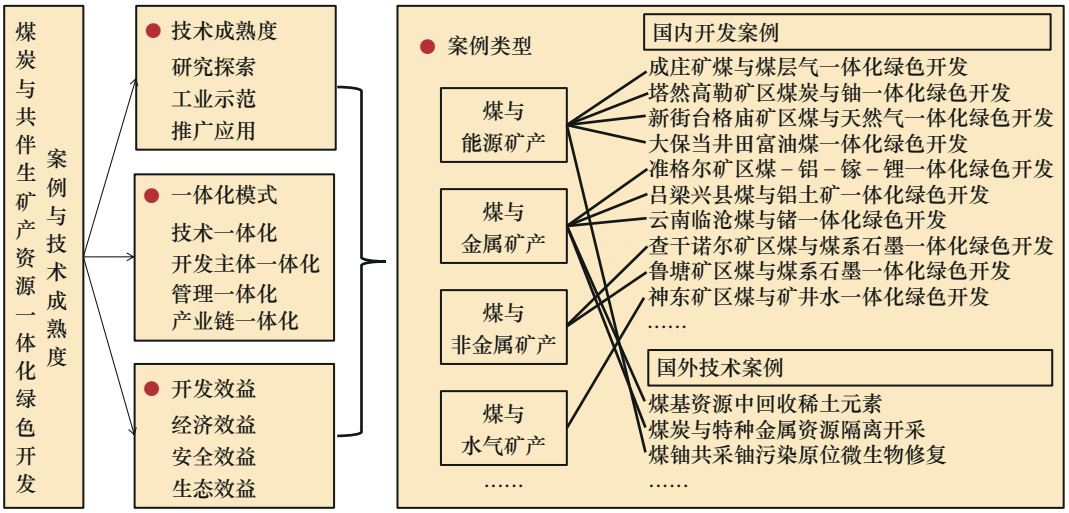

图2　国内外煤炭与共伴生矿产资源一体化绿色开发案例与可行性分析

共伴生矿产资源已建设工业化示范项目和共采试点，处于工业示范阶段[48,49]。山西省吕梁地区70%左右的铝土矿为煤铝共生资源；铝土矿中含有铁、镓等战略性金属，主要有煤下铝（煤炭矿业权下部有铝土矿资源）、铝上煤（铝土矿矿业权上部有煤炭资源）、煤铝协同开采（煤铝资源伴生且矿权均未出让）3种类型。矿区内的兴县主要矿山企业积极开展煤与共生铝土矿协调开采，铝土矿充填护顶与置换开采，铝土矿提取铁、镓等关键技术研究，探索共采模式，已建成成套综合利用生产线，初步实现了煤－铝－铁－镓的综合开发。目前矿区管理机构仍在继续扩大煤铝共采试点范围。

3. 研究和探索阶段

煤与锂协同开发、富油煤井下原位热解开发、煤基资源回收稀土元素等技术已初步进行了实验室研究或先导性试验，处于研究和探索阶段[50]。广西贤按煤田内的煤层不稳定、煤质较差，锂金属元素主要赋存于煤层及煤层夹矸中；中国煤炭地质总局对万福矿区的煤系锂进行了协同勘查，估算的锂矿石资源量总计为5.735×10^7 t，在此基础上进行了锂开发提取实验室研究，为后续开发利用奠定了基础。富油煤集煤、油、气属性于一体，是一种煤基油气资源。我国富油煤资源主要分布在西部五省区，资源储量近5.5×10^{11} t，但绝大部分富油煤未按照油气资源属性进行开发利用，仅作为动力煤燃烧的占比达到75%。虽然井下原位热解开采先导性试验在2024年已取得实质性突破，但实际生产和大规模推广应用仍需时日。

（二）一体化模式分析

依据资源特点、开发方法、管理方式等，煤炭与共伴生矿产资源一体化绿色开发模式主要有技术一体化、开发主体一体化、管理一体化、产业链一体化4种模式，具体如下。

1. 技术一体化模式

技术一体化模式指以创新一体化开发工艺、突破一体化开发技术、研发一体化开发装备等技术手段为主，实现煤炭与共伴生矿产资源一体化绿色开发的模式。例如，我国山西省晋城矿区等高瓦斯煤矿区通过创立以“四区联动”技术为核心的井上井下联合抽采技术体系，实现了以技术驱动煤炭与煤层气一体化安全高效生产和煤层气梯级利用。该矿区的成庄煤矿建立了煤与瓦斯共采技术体系，包括“三级”地质勘测、“四区联动”井上井下联合立体高效抽采、煤炭高效开采、煤与瓦斯共采信息智能化管控、瓦斯分类梯级利用五大项技术，基本实现了“采前抽”“采中抽”“采后抽”的全系列抽采。目前，成庄煤矿的瓦斯抽采量达1.3×10^8 m^3/a，瓦斯抽采率为84%以上，实现了高瓦斯矿区低瓦斯采煤和不同浓度瓦斯最大限度分类梯级利用，成为全国唯一的煤与瓦斯共采绿色开采示范矿井。

2. 开发主体一体化模式

开发主体一体化模式指煤炭开发主体同时拥有与煤炭共伴生矿产资源的矿权，以矿权优势为主实现煤炭与共伴生矿产资源一体化绿色开发的模式。例如，湖南省鲁塘矿区有煤系石墨赋存，是目前我

国乃至亚洲最大的微晶石墨储藏地。该矿区的煤炭开采企业一般同时持有煤矿开采和石墨开采证。在矿权优势条件下，煤炭与共伴生石墨资源一体化绿色开发的难度显著降低，石墨资源产能达 1.6×10^6 t/a，年产量约为 1.2×10^6~1.5×10^6 t。从产业效益来看，目前石墨开采销售收入为 3.1×10^8~4.7×10^8 元，经济效益显著。

3. 管理一体化模式

管理一体化模式指煤炭开发主体虽然没有共伴生矿产资源的矿权，但通过与其他矿权主体协商开发时序、管理方式等，以管理为主实现煤炭与共伴生矿产资源一体化绿色开发的模式。例如，内蒙古自治区塔然高勒矿区的煤炭、铀资源矿权分属国家能源投资集团有限责任公司、中国核工业集团有限公司。2014 年，在煤矿建设期间发现了铀矿（直接压覆煤炭储量为 1.84×10^8 t）；2023 年，通过签订协议，明确了煤、铀协调开采方式。内蒙古自治区新街台格庙矿区的煤炭资源、天然气资源分属国家能源投资集团有限责任公司、中石油集团公司，矿区内天然气资源位于煤层底板下方约 1600~2500 m，现阶段“先气后煤”的开采方式严重制约了煤炭的开采布局。为此，两家企业通过论证协商和设计规划，减少一体化开发安全隐患、降低扰动影响等，推进煤气共采。

4. 产业链一体化模式

产业链一体化模式指在煤炭开发过程中，煤中或煤顶底板中的共伴生矿产资源可随煤一起采出，并在煤或煤基固废中富集提取进一步利用的开发模式。该模式以进一步延伸煤炭产业链为主，实现煤炭与共伴生矿产资源的一体化绿色开发。内蒙古自治区准格尔矿区的煤炭中蕴含大量的铝、镓、锂等战略资源。国能准能集团有限责任公司充分挖掘煤的特性，在煤炭高效开发和清洁利用的基础上，利用燃煤发电产生的粉煤灰富集制取铝、镓、锂资源，实现了煤中共伴生资源综合利用和全要素变废为宝，由此打造的循环经济产业链经济效益是仅生产原煤的 18 倍。2022 年，“神华准格尔矿区 3×10^5 t/a 高铝粉煤灰综合利用工业化示范”项目获特批 6.5×10^4 t 电解铝指标。

（三）开发效益评价

1. 经济效益

构建考虑时间价值的煤炭与共伴生矿产资源一体化绿色开发项目动态评价模型，对成庄煤矿煤与煤层气，国能准能集团有限责任公司煤与铝、镓、锂，吕梁兴县煤与铝土矿 3 个案例进行经济效益评价（见表 1）。结果显示，在煤与煤层气共采方案中，一体化绿色开发的收益较单独开发煤炭资源的收益高 8%；在煤与铝土矿共采，煤与铝、镓、锂产业链延长开发两个方案中，一体化绿色开发的净现值分别是煤单独开发的 4.8 倍、2.8 倍。3 个方案中一体化开发方式的期初投入和投资回收期均高于单独开发方式。总体上，煤炭与共伴生矿产资源一体化绿色开发相比单独开发，虽然前期投资较高、投资回收期较长，但项目的净现值等经济指标更具优势，具有更高的经济效益。

2. 安全效益

在内蒙古自治区新街台格庙矿区案例中，煤与天然气一体化绿色开发可降低对天然气井、地面设施设备的扰动和破坏，减少开发的安全隐患。在成庄煤矿的案例中，煤与煤层气一体化绿色开发实现了矿井瓦斯超限次数由治理前的 64 次到瓦斯零超限，显著降低了瓦斯爆炸事故的风险。在吕梁兴县煤与铝土矿共采的案例中，煤与铝土矿一体化绿色开发可避免岩层活动相互影响，实现安全生产。总体来看，一体化绿色开发可以统筹规划开发时序、

表 1　煤与共伴生矿产资源一体化绿色开发方案比较

序号	方案	期初投入/$\times10^9$ 元	投资回收期/年	净现值/$\times10^9$ 元
1	煤单独开发	243.84	5	17.83
	煤与煤层气协同开发	246.34	7	19.23
2	煤单独开发	98.21	6	3.40
	煤与铝土矿协同开发	154.53	8	16.40
3	煤单独开发	214.47	5	15.07
	产业链延长开发	308.25	9	42.18

综合考虑生产影响、有效规避安全隐患等，大幅提升安全生产能力。

3. 生态效益

山西省晋城市的寺河煤矿通过煤与煤层气一体化绿色开发，可以实现年井下抽采煤层气8×10^9 m^3，年减排CO_2达1.2×10^7 t。吕梁兴县煤与铝土矿一体化绿色开发可通过铝土矿充填护顶与置换开采、反对称沉降叠加平衡调控等技术，降低地表沉陷影响。在富油煤井下原位热解案例中，一体化绿色开发可实现煤炭在井下原位转化，大幅减少固废排放。整体来看，一体化绿色开发可以对矿产资源开发带来的生态环境影响进行整体整治，大幅减少地表沉陷、碳排放等方面的生态影响。

四、煤炭与共伴生矿产资源一体化绿色开发存在的问题

（一）政策体系和体制机制尚不健全

煤炭与共伴生矿产资源的分类方法、矿权配置、管理方式等尚未形成统一标准和法律法规，给开发过程带来诸多难题。一是矿权配置不协调，煤炭与共伴生矿产资源的探矿权和采矿权往往分属不同行业或企业，易出现资源叠置区域重复勘探、开发互相影响等问题。例如，内蒙古自治区塔然高勒煤矿在建设期间发现了煤层上部压覆的铀资源而停产，由此导致设计能力1×10^7 t/a的煤矿近10年处于停滞状态，造成了巨大的经济损失。二是评价标准体系未建立，煤系共伴生矿产资源的地质评价标准、安全开采标准、采后可修复标准等仍是空白，缺乏综合评价指标体系，无法对现场工程实践提供具体指导。三是统一的矿业管理机构未成立，煤炭与共伴生矿产资源的勘查开发涉及不同管理部门，缺乏统一的管理机构统筹管理煤炭与共伴生矿产资源的勘查开发。

（二）关键技术及核心装备亟待攻关

煤炭与共伴生矿产资源一体化绿色开发的基础理论研究亟待深入，工程技术难题与关键科学问题依然突出，关键核心技术与装备仍需研发。一是缺乏多矿种综合勘探技术和方法，传统单一矿种的勘查方法存在协调度、精准度不足等问题。目前，地球物理勘查技术的精度难以准确判识或定量表征煤系中大部分金属元素的组合关系、丰度等特征；适用于某种煤炭共伴生矿产资源的地球物理和地球化学勘查技术，难以适应其他类型的矿床。二是煤炭与共伴生资源综合开发技术存在短板。全生命周期协调开采理论与技术、低浓度瓦斯利用、资源综合评价及协同开发大数据分析平台等方面亟需加强研究。例如，鄂尔多斯纳岭沟铀矿压覆塔然高勒煤矿的煤炭资源量约为2×10^8 t，铀矿开发后含铀溶浸液部分残留在煤层上部的含水层中，仅依托现有技术手段无法实现该部分煤炭资源的回收，造成巨大的资源浪费；新街台格庙煤矿区中、北部与苏里格气田（东区）约有68%的矿权面积重叠，天然气开发过程中储层大规模压裂可能造成煤矿动力灾害和矿井水污染，对现有开发和保护的技术及装备提出巨大挑战。三是智能绿色低碳技术有待提升，传统充填开采、保水开采、塌陷区治理等技术普遍存在效率低、效益差等问题，亟需研发矿井全生命周期生态环境天–地–井监测与预报、煤矿CO_2固碳充填等技术[51]。

（三）规模化开发的经济性仍需提升

除煤层气外，目前大部分煤系共伴生矿产资源仍未能实现规模化经济性开发。一是资源优势未得到充分发挥，部分矿区煤系共伴生矿产资源种类、规模未充分探明，或已探明资源的矿区受技术、环境等因素制约无法实现充分开发，导致资源浪费。二是资源综合开发效益无法实现最大化，对能源、数据、技术、人力等各类资源的系统管理不足，资源开发利用合作、合资、产业链对接等经营模式还在探索过程中，煤矿企业难以低成本开发共伴生矿产资源。据测算，煤与铝土矿，煤与铝、镓、锂共采方案较煤炭单独开发，虽然直接经济收益提高2倍以上，但由于前期投资过大、投产延期影响等，整体经济性仍需提升。三是不同共伴生资源的分类协同开发适用模式需要深入探索，如1500~2000 m以浅煤层气开发与我国煤炭资源的开发深度绑定，地质赋存条件复杂多样、煤炭开采交叉影响、煤层气单一资源开采产量不足且经济性弱、低浓度煤层气利用率低且企业投入意愿低等影响了浅层煤层气规模开发的效果。

五、煤炭与共伴生矿产资源一体化绿色开发战略

（一）发展蓝图

1. 发展思路

贯彻落实新发展理念，统筹矿产资源综合利用与有效保护，协同资源、技术、人才、管理等4个要素，聚焦勘探、规划、开发3个环节，以高效率、低损害、可持续的协同开发方式，推进绿色矿山建设、推动煤炭开采方式变革，构建资源综合勘查、系统规划、协同开发、建设运营相结合的煤炭与共伴生矿产资源一体化绿色开发新模式，提高多种矿产资源综合回收率，推动矿产资源开发与区域经济社会、生态保护协调发展。煤矿区发展为多种矿产资源、绿色矿产资源、智慧矿产资源和低碳矿产资源供应基地。

多种矿产资源供应基地：通过应用多种矿产资源协同开发技术，煤矿区由单一供应煤炭变为煤炭、锂、镓等多种矿产资源供应基地。

绿色矿产资源供应基地：通过应用高新技术和先进适用绿色减损开采技术，科学制定矿区生态环境治理与恢复的规划和实施方案，大幅提升矿区生态环境效益。

智慧矿产资源供应基地：通过应用一体化智能开发技术，实现煤炭与共伴生矿产资源的智能协同开发，进一步促进矿区生产减人增安，大幅提升综合开发效益。

低碳矿产资源供应基地：通过研究和应用碳捕集、利用与封存等低碳开发技术，实现煤炭与共伴生矿产资源的低碳开发，减少矿区碳排放。

2. 发展目标

（1）总体目标

构建安全、高效、智能、绿色的煤炭与共伴生矿产资源一体化绿色开发技术体系，形成一批煤炭与共伴生矿产资源一体化绿色开发典型示范工程，构建资源、数据、技术、人才相统一的管理模式，实现各类矿产资源综合高效、绿色低碳、节约集约开发，全部建成智能绿色矿山，资源综合开发经济效益、安全效益、生态效益实现最大化。

（2）阶段目标

2030年：初步构建典型煤炭与共伴生矿产资源一体化绿色开发技术体系，煤与铀等典型共伴生模式的资源综合开发模式取得突破性进展，资源综合采出率进一步提升，安全、绿色开发水平进一步提高。

2035年：突破典型煤炭与共伴生矿产资源一体化绿色开发核心技术，资源、数据、技术、人才等要素实现有效充分流动，资源综合开发效益大幅提升，智能绿色开发水平显著提高。

2050年：建成成熟的煤炭与共伴生矿产资源一体化绿色开发技术体系，形成资源、数据、技术、人才相统一的管理模式，资源综合开发效益实现最大化，全部建成智能绿色矿山；将煤矿区发展为多种矿产资源、绿色矿产资源、智慧矿产资源、低碳矿产资源供应基地。

（二）技术体系

1. 一体化数字勘查设计技术体系

开展煤炭共伴生矿产资源富集规律、矿产资源综合评价技术、环境承载力评价技术、“透明矿井”核心软件平台、井下复杂环境多物理场自适应感知技术、“空天地”一体化多方位综合探测技术、多资源协同勘查技术等一体化数字勘查技术攻关，查明煤炭与共伴生矿产资源的储量、特征、品位、赋存规律等。研发三维矿山信息模型和协同平台技术、基于虚拟现实的矿井设计技术等数字设计技术，实现煤炭与共伴生矿产资源矿井的数字化集成设计。

2. 安全、高效、协同开发技术体系

推进一体化开采核心共性科学问题、分区错时协调开采原理、一体化成套开发方式和开采方法、一体化开采含矿含水层水位调控技术、一体化开采岩层控制技术、一体化开发工艺与设备兼容技术、一体化开采安全管理技术等常规技术研究，推进煤炭与各类共伴生矿产资源的安全、高效、协同开发。开展生物协同采矿颠覆性技术、煤炭原位生物制氢技术、化学协同采矿颠覆性技术、深部原位化学气化技术、富油煤地下原位热解技术、深部煤与煤层气物理流态化共采技术等颠覆性技术研究，实现复杂地质条件下的煤炭与共伴生矿产资源一体化绿色开发。

3. 智能、绿色、低碳技术体系

开展一体化开采生态保护技术、煤矿煤水共采地下水库储水技术、矿井全生命周期生态环境天 –

地–井监测及预报技术、矿区水资源保护及生态环境修复关键技术、一体化开采沉陷区精细治理与利用地质保障技术、一体化开采多源固废处置与利用技术等智能绿色技术研究，加快多相多场耦合下CO_2封存机理与调控机制、煤矿区煤气共采CO_2驱替煤层气技术、矿区一体化开采咸水层CO_2封存技术、CO_2封存长期环境效应及储库稳定性技术、煤矿负碳充填开采技术、煤矿区一体化开采CO_2封存等低碳负碳技术研究，推进煤炭与各类共伴生矿产资源的绿色低碳开发。

（三）发展路径

1. 推进资源综合勘查

将矿区矿产资源作为一个整体，查明各类矿产资源总量、开发潜力，规划矿产资源开发布局与规模，推进各类矿产资源协同开发。推进煤炭资源勘查“一孔多用”，分析与煤炭共伴生矿产资源的矿种及含量。编制综合勘查实施方案，并按照相应矿种勘查规范实施勘查。

2. 推进矿区系统规划

煤炭与共伴生矿产资源的开发时序和资源空间赋存相匹配，充分考虑各类矿产资源的赋存条件、资源量等因素，系统规划资源重叠区域的开发布局与技术，兼顾矿区设计创新矿区资源技术和经济评价方式，统筹总体资源合理布局生产系统与采掘接替，合理制定开发时序、开采方法和选矿工艺，确保各类矿产充分利用。

3. 推进绿色协同开发

协调煤炭与不同共伴生资源共采技术，重点突破不同开采条件下煤炭资源高效绿色开发技术、煤炭与共伴生资源协同开发技术等，配套建设煤系伴生矿产资源的提取工艺生产系统，综合利用煤炭共伴生矿产资源，推动绿色矿山建设。

4. 推进建设与运营协同

推动投资与建设相结合、矿区设计与建设施工相结合、项目建设与项目经营相结合，通过合作发挥专业特长，实现核心产业链的协同发展。

5. 探索新机制与新模式

探索煤炭与共伴生矿产资源综合评价、开发、利用新机制和新模式。采取合作、合资、产业链对接等新方式，进一步提高煤矿企业在煤炭共伴生矿产资源方面的开发能力和开发效益。建立和健全综合开发利用减免出让收益、税收等激励机制。

六、推动煤炭与共伴生矿产资源一体化绿色开发的对策建议

（一）完善矿权管理制度

参照《中华人民共和国矿产资源法》，明确煤炭与共伴生矿产资源的矿业权设置等，矿业权冲突按照相邻权和地役权原则进行处理，为一体化绿色开发提供法治保障。完善煤炭与共伴生矿产资源的矿权管理制度，明确矿权划分原则和程序，避免矿权交叉和重叠。参照澳大利亚、印度尼西亚等国家的共伴生矿管理经验，保障原矿业权人的优先权益，以主矿体为主优先将资源叠置区共伴生矿产探矿权和采矿权颁发给同一企业，推进综合勘查和开发。制定煤系共伴生矿产资源在地质勘查、安全开采和采后修复等方面的评价标准及综合评价指标体系。

（二）形成共探共采机制

建立协调机构或领导小组，负责煤系共伴生矿产资源叠置区的矿产综合勘查，打破体制壁垒，通过多种探矿手段，实现一次勘查查明多种煤炭共伴生矿产资源，降低资源勘查的成本投入。同时依据综合勘查形成的地质信息和数据，建立地质信息数据库，实现综合勘查数据共享。加大推进1500~2000 m以浅煤层气与煤炭协调开发模式的应用，稳定煤炭资源的安全供应。

（三）加大科技创新投入

以“企业投入为主、多元资金参与、国家财政支持”的资金投入方式，建设煤炭与共伴生矿产资源一体化绿色开发重点实验室、工程中心等国家级研发平台，加强对煤系共伴生矿产资源的精准探查、共采、综合利用方法及工艺的科技攻关。引导企业加强“产学研”合作，通过技术创新实现煤炭与共伴生矿产资源一体化绿色开发的实际应用。加大科技人才的培养，建设煤炭与共伴生矿产资源科技人才教育培养基地，培养与引进以煤为主的多种矿产资源开发复合型科技人才。

（四）建立协同勘查开发激励机制

根据资源情况，给予勘查共伴生矿产资源的企

业一定直接奖励、税费优惠和矿权激励等。配套煤系共伴生矿产资源一体化绿色开发项目融资、税收减免等优惠政策，建议参考煤层气相关政策，给予煤系共伴生矿产资源产品市场价格10%~20%的补贴。对资源压覆量较大或已实施资源开发的矿业权人，充分考虑先期投入以及延期投产造成的经济损失等，在矿业权价款评估、清产核资、企业年度考核等方面实行差别化政策，给予一定补偿。

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: December 23, 2024; **Revised date:** January 14, 2025

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

Funding project: National Key R&D Program of China (2023YFC2907600); Chinese Academy of Engineering project “Research on the Strategy of Energy Utilization and Low-Carbon Utilization of Three-Dimensional Space in Mines” (2024-XZ-30), “Research on the Integrated Green Development Strategy of Coal and Co-associated Energy Resources” (2023-XZ-19)

参考文献

[1] 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 F, Guo L F, Zhao L Z. Research on 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.

[2] 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.

[3] 张继勇. 不仅要找好矿, 更要用好矿 [N]. 中国矿业报, 2024-05-31(01).
Zhang J Y. Not only do we need to find good mines, but we also need to make good use of them [N]. China Mining News, 2024-05-31(01).

[4] 中华人民共和国自然资源部. 中国矿产资源报告 2024 [R]. 北京: 中华人民共和国自然资源部, 2024.
Ministry of Natural Resources of the People’s Republic of China. China mineral resources 2024 [R]. Beijing: Ministry of Natural Resources of the People’s Republic of China, 2024.

[5] 宁树正, 邓小利, 李聪聪, 等. 中国煤中金属元素矿产资源研究现状与展望 [J]. 煤炭学报, 2017, 42(9): 2214–2225.
Ning S Z, Deng X L, Li C C, et al. Research status and prospect of metal element mineral resources in China [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(9): 2214–2225.

[6] 宁树正, 黄少青, 张莉, 等. 中国北方不同成煤时代煤中金属矿点(床)分布及资源前景 [J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(2): 42–48.
Ning S Z, Huang S Q, Zhang L, et al. Distribution and resource prospect of metal ore spots (deposits) in coal of different coal-forming ages in northern China [J]. Coal Geology & Exploration, 2020, 48(2): 42–48.

[7] Seredin V V, Finkelman R B. Metalliferous coals: A review of the main genetic and geochemical types [J]. International Journal of Coal Geology, 2008, 76(4): 253–289.

[8] 代世峰, 赵蕾, 魏强, 等. 中国煤系中关键金属资源: 富集类型与分布 [J]. 科学通报, 2020, 65(33): 3715–3729.
Dai S F, Zhao L, Wei Q, et al. Resources of critical metals in coal-bearing sequences in China: Enrichment types and distribution [J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(33): 3715–3729.

[9] Dai S F, Finkelman R B. Coal as a promising source of critical elements: Progress and future prospects [J]. International Journal of Coal Geology, 2018, 186: 155–164.

[10] 孙莉, 肖克炎, 娄德波. 中国铝土矿资源潜力预测评价 [J]. 地学前缘, 2018, 25(3): 82–94.
Sun L, Xiao K Y, Lou D B. Mineral prospectivity of bauxite resources in China [J]. Earth Science Frontiers, 2018, 25(3): 82–94.

[11] Chen J, Chen P, Yao D X, et al. Abundance, distribution, and modes of occurrence of uranium in Chinese coals [J]. Minerals, 2017, 7(12): 239.

[12] 赵汀, 王登红, 刘超, 等. 中国锗矿成矿规律与开发利用现状 [J]. 地质学报, 2019, 93(6): 1245–1251.
Zhao T, Wang D H, Liu C, et al. Metallogenic and utilization status of Ge deposit in China [J]. Acta Geologica Sinica, 2019, 93(6): 1245–1251.

[13] 代世峰, 刘池洋, 赵蕾, 等. 煤系中战略性金属矿产资源: 意义和挑战 [J]. 煤炭学报, 2022, 47(5): 1743–1749.
Dai S F, Liu C Y, Zhao L, et al. Strategic metal resources in coal-bearing strata: Significance and challenges [J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(5): 1743–1749.

[14] 中国矿业大学. 准格尔超大型缘矿床镓的分布规律、赋存状态与提取技术研究报告 [R]. 北京: 中国矿业大学, 2008.
China University of Mining and Technology. Research report on the distribution law, occurrence state, and extraction technology of gallium in the Zhungeer ultra large margin deposit [R]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2008.

[15] 栾飞. 古交煤层气田压裂技术研究与应用 [J]. 石化技术, 2020, 27(8): 81–82.
Luan F. Application and research of fracturing technology in Gujiao coalbed gas field [J]. Petrochemical Industry Technology, 2020, 27(8): 81–82.

[16] Dai S F, Jiang Y F, Ward C R, et al. Mineralogical and geochemical compositions of the coal in the Guanbanwusu mine, Inner Mongolia, China: Further evidence for the existence of an Al (Ga and REE) ore deposit in the jungar coalfield [J]. International Journal of Coal Geology, 2012, 98: 10–40.

[17] 康红普, 谢和平, 任世华, 等. 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 [J]. 中国工程科学, 2022, 24(6): 26–37.
Kang H P, Xie H P, Ren S H, et al. Development strategy of China’s coal industry under the reconstruction of global industrial

chain and energy supply chain [J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(6): 26–37.

[18] 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.

[19] 康红普, 任世华, 王保强, 等. 煤炭工业数字化发展战略研究 [J]. 中国工程科学, 2023, 25(6): 170–178.
Kang H P, Ren S H, Wang B Q, et al. Digital development strategy of coal industry [J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(6): 170–178.

[20] 秦勇. 中国煤系矿产近现代地质研究进展与走向 [J/OL]. 煤田地质与勘探, 1–24[2024-12-10]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1155.P.20241104.1645.002.html.
Qin Y. Modern and contemporary geological research progress and trends of minerals in coal measures of China [J/OL]. Coal Geology & Exploration, 1–24[2024-12-10]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1155.P.20241104.1645.002.html.

[21] 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 Z W, Huang B X, Zhao X L, 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.

[22] 赵蕾, 王西勃, 代世峰. 煤系中的锂矿产: 赋存分布、成矿与资源潜力 [J]. 煤炭学报, 2022, 47(5): 1750–1760.
Zhao L, Wang X B, Dai S F. Lithium resources in coal-bearing strata: Occurrence, mineralization, and resource potential [J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(5): 1750–1760.

[23] 宁树正, 黄少青, 朱士飞, 等. 中国煤中金属元素成矿区带 [J]. 科学通报, 2019, 64(24): 2501–2513.
Ning S Z, Huang S Q, Zhu S F, et al. Mineralization zoning of coal-metal deposits in China [J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(24): 2501–2513.

[24] 魏迎春, 李新, 曹代勇, 等. 煤与煤系战略性金属矿产协同勘查技术方法 [J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(12): 27–41.
Wei Y C, Li X, Cao D Y, et al. Cooperative exploration methods of coal and strategic metal resources in coal-bearing strata [J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(12): 27–41.

[25] 曹代勇, 魏迎春, 李新, 等. 煤与煤系战略性金属矿产协同勘查理论与技术体系框架探讨 [J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 479–494.
Cao D Y, Wei Y C, Li X, et al. Discussion on the theory and technical system framework of cooperative exploration of coal and strategic metal resources in coal-bearing strata [J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 479–494.

[26] 黄炳香, 赵兴龙, 余斌, 等. 煤与共伴生战略性金属矿产协调开采理论与技术构想 [J]. 煤炭学报, 2022, 47(7): 2516–2533.
Huang B X, Zhao X L, Yu B, et al. Research framework of theory and technology for coordinated mining of coal and its co-existed and associated strategic metal minerals [J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(7): 2516–2533.

[27] 魏迎春, 李新, 曹代勇, 等. 煤与煤系战略性金属矿产协同勘查模型 [J]. 地质学报, 2024, 98(8): 2517–2530.
Wei Y C, Li X, Cao D Y, et al. Cooperative exploration model of coal and strategic metal resourcesin coal-bearing strata [J]. Acta Geologica Sinica, 2024, 98(8): 2517–2530.

[28] Zhang Y, Wei Y C, Cao D Y, et al. Cooperative exploration model of coal-gallium deposit: A case study of the Heidaigou coal-gallium deposit in the jungar coalfield, Inner Mongolia, China [J]. Minerals, 2024, 14(2): 156.

[29] Li X, Wei Y C, Cao D Y, et al. Cooperative exploration model of coal-Ge deposit: A case study of the Wulantuga coal-Ge deposit in Shengli coalfield, Inner Mongolia, China [J]. Energy Exploration & Exploitation, 2024, 42(5): 1666–1683.

[30] Li X, Wei Y C, Cao D Y, et al. Cooperative exploration model of coal-lithium deposit: A case study of the haerwusu coal-lithium deposit in the jungar coalfield, Inner Mongolia, Northern China [J]. Minerals, 2024, 14(2): 179.

[31] Wang T, Sun J, Lin Z Y, et al. Coordinated exploration model and its application to coal and coal-associated deposits in coal basins of China [J]. Acta Geologica Sinica-English Edition, 2021, 95(4): 1346–1356.

[32] 袁亮. 煤炭精准开采科学构想 [J]. 煤炭学报, 2017, 42(1): 1–7.
Yuan L. Scientific conception of precision coal mining [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1): 1–7.

[33] 黄炳香, 赵兴龙, 韩晓克, 等. 煤系共伴生矿产协同开发 [J]. 采矿与安全工程学报, 2024, 41(1): 1–14.
Huang B X, Zhao X L, Han X K, et al. Collaborative development of co-existed and associated minerals in the coal series [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2024, 41(1): 1–14.

[34] 崔艳. 我国煤系共伴生矿产资源分布与开发现状 [J]. 洁净煤技术, 2018, 24(S1): 27–32.
Cui Y. Distribution and exploration of associated resources occurred in Chinese coal-bearing series [J]. Clean Coal Technology, 2018, 24(S1): 27–32.

[35] 袁亮, 张通, 赵毅鑫, 等. 煤与共伴生资源精准协调开采——以鄂尔多斯盆地煤与伴生特种稀有金属精准协调开采为例 [J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(3): 449–459.
Yuan L, Zhang T, Zhao Y X, et al. Precise coordinated mining of coal and associated resources: A case of environmental coordinated mining of coal and associated rare metal in Ordos basin [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017, 46(3): 449–459.

[36] 黄炳香, 赵兴龙, 张权. 煤与煤系伴生资源共采的理论与技术框架 [J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(4): 653–662.
Huang B X, Zhao X L, Zhang Q. Framework of the theory and technology for simultaneous mining of coal and its associated resources [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016, 45(4): 653–662.

[37] 郭子一, 刘建荣, 郭志宾, 等. 我国煤系共伴生矿产资源综合利用研究进展 [J]. 矿产保护与利用, 2022, 42(6): 1–9.
Guo Z Y, Liu J R, Guo Z B, et al. Research progress on comprehensive utilization of associated mineral resources in coal-bearing strata in China [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2022, 42(6): 1–9.

[38] Talan D, Huang Q Q. A review study of rare earth, cobalt, lithium, and manganese in Coal-based sources and process development

for their recovery [J]. Minerals Engineering, 2022, 189: 107897.

[39] 黄炳香, 赵兴龙, 韩晓克, 等. 协调开采诱导岩层反对称沉降叠加平衡调控方法: CN115263301A [P]. 2022-11-01.
Huang B X, Zhao X L, Han X K, et al. Coordinated mining induced rock strata anti symmetric subsidence superposi-tion balance control method: CN202210842442.5 [P]. 2022-07-18.

[40] 张亚宁, 任世华, 郑德志, 等. 煤炭行业向地热能资源开发拓展转型的路径分析 [J]. 煤炭经济研究, 2022, 42(1): 39–46.
Zhang Y N, Ren S H, Zheng D Z, et al. Path analysis of the transformation and expansion of the coal industry to the development and expansion of geothermal energy resources [J]. Coal Economic Research, 2022, 42(1): 39–46.

[41] 袁亮. 煤及共伴生资源精准开采科学问题与对策 [J]. 煤炭学报, 2019, 44(1): 1–9.
Yuan L. Scientific problem and countermeasure for precision mining of coal and associated resources [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1): 1–9.

[42] 曹代勇, 秦国红, 张岩, 等. 含煤岩系矿产资源类型划分及组合关系探讨 [J]. 煤炭学报, 2016, 41(9): 2150–2155.
Cao D Y, Qin G H, Zhang Y, et al. Classification and combination relationship of mineral resources in coal measures [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(9): 2150–2155.

[43] 曹代勇, 秦国红, 魏迎春, 等. 煤系矿产资源赋存的盆地动力学控制——研究现状与展望 [J]. 中国煤炭地质, 2020, 32(9): 38–46.
Cao D Y, Qin G H, Wei Y C, et al. Basin dynamics controlling of coal measures mineral resources hosting—Research status and expectation [J]. Coal Geology of China, 2020, 32(9): 38–46.

[44] 郑秀娟, 杜远生, 朱筱敏, 等. 中国古地理学近十年主要进展 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2021, 40(1): 4, 94–114.
Zheng X J, Du Y S, Zhu X M, et al. The main progresses of Chinese Palaeogeography in the past decade [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2021, 40(1): 4, 94–114.

[45] 乔军伟, 宁树正, 宋时雨, 等. 西藏煤炭地质工作进展及前景 [J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(2): 36–43.
Qiao J W, Ning S Z, Song S Y, et al. Progress and prospects of coal geological work in Xizang [J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(2): 36–43.

[46] 矿区煤层开发项目组. 煤层气与煤炭协调开发理论与技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2021.
Coalbed Methane Development Project Team in the Mining Area. Theory and technology of coordinated development of coalbed methane and coal [M]. Beijing: Science Press, 2021.

[47] 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.

[48] 宁树正, 黄少青, 严晓云, 等. 我国煤系锗镓资源前景及研究方向 [J]. 中国矿业, 2023, 32(11): 1–11.
Ning S Z, Huang S Q, Yan X Y, et al. Prospect and research direction of germanium and gallium resources in coal-bearing strata in China [J]. China Mining Magazine, 2023, 32(11): 1–11.

[49] 吴兆剑, 韩效忠, 李紫楠, 等. 准噶尔盆地中生代“下煤上铀”地层结构的沉积机理 [J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(12): 52–64.
Wu Z J, Han X Z, Li Z N, et al. Sedimentary mechanism analysis of “lower coal and upper uranium” strata structure in Junggar Basin, Northern China [J]. Coal Science and Technology, 2023, 51 (12): 52–64.

[50] 张磊, 陈航超, 潘金禾, 等. 煤系锂和稀土的赋存特征与富集提取研究进展 [J]. 矿产保护与利用, 2023, 43(6): 1–13.
Zhang L, Chen H C, Pan J H, et al. Research progress on occurrence characteristics, enrichment and extraction of coal-based lithium and rare earth [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2023, 43(6): 1–13.

[51] 王国法, 庞义辉, 任怀伟, 等. 矿山智能化建设的挑战与思考 [J]. 智能矿山, 2022, 3(10): 2–15.
Wang G F, Pang Y H, Ren H W, et al. Challenges and thinking of mine intelligent construction [J]. Journal of Intelligent Mine, 2022, 3(10): 2–15.