

## 煤与煤系气地质与勘查

煤与煤系战略性金属矿产协同勘查理论与技术体系  
框架探讨曹代勇<sup>1,2</sup>, 魏迎春<sup>1,2</sup>, 李新<sup>1</sup>, 张昀<sup>1</sup>, 徐来鑫<sup>1</sup>, 位金昊<sup>1</sup>, 董博<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学(北京) 地球科学与测绘工程学院, 北京 100083; 2. 中国矿业大学(北京) 煤炭精细勘探与智能开发全国重点实验室, 北京 100083)

**摘要:**煤与煤系战略性金属矿产协同勘查模型的建立,是实现煤系战略性金属元素向金属矿产转变的前提条件,煤与煤系战略性金属矿产协同勘查基础理论与关键技术研究,则是建立协同勘查模型的核心任务。从煤系战略性金属元素的基本特点分析入手,论证了实施煤与煤系战略性金属矿产协同勘查的必要性;通过对协同勘查概念演变历史的梳理,阐明了煤炭综合勘查与协同勘查的关系,认为协同勘查是综合勘查的继承和发展,强调2种或多种矿产综合勘查过程中的协调有序和科学组织,其核心是协同组织勘查工程、协同实施关键技术。在论述煤与煤系战略性金属矿产协同勘查原则的基础上,初步提出煤与煤系战略性金属矿产协同勘查理论与技术方法体系框架,作为建立煤与煤系战略性金属矿产协同勘查模型的基础。煤与煤系战略性金属矿产协同勘查应以煤系战略性金属元素富集成矿机制、组合类型与赋存规律研究为前提条件,以煤地质学、矿床学、地球化学、地球物理学、勘查工程学等多学科理论为基础,以精准钻探、精细物探和精细化探等关键技术构成的协同勘查技术体系为支撑,以固体矿产勘查规范等标准为工作依据,遵循固体矿产资源勘查和综合勘查及单矿种勘查的一般性原则,以及研究先行、技术有效、精细勘查、动态调整、分区施策、协调同步等原则,协同组织勘查工程、协同实施关键技术,实现煤与煤系战略性金属矿产协同勘查的最佳技术效益和最佳经济效益的平衡,在完成煤炭地质勘查任务的基础上,查明共伴生战略性金属矿产的地质特征和开发地质条件,获得相应的资源量或元素分布特征,为煤系矿产资源综合开发利用提供地质依据。煤与煤系战略性金属矿产协同勘查值得关注并深入研究的核心问题包括:协同勘查对象的确定,勘查技术的选择和协同实施,勘查工程的协同部署,资源量的科学估算。

**关键词:**煤系;战略性金属矿产;协同勘查;勘查原则;理论与技术体系**中图分类号:**P618.11;P624 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9993(2024)01-0479-16Discussion on the theory and technical system framework of cooperative  
exploration of coal and strategic metal resources in coal-bearing strataCAO Daiyong<sup>1,2</sup>, WEI Yingchun<sup>1,2</sup>, LI Xin<sup>1</sup>, ZHANG Yun<sup>1</sup>, XU Laixin<sup>1</sup>, WEI Jinhao<sup>1</sup>, DONG Bo<sup>1</sup>

(1. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory

收稿日期: 2023-11-23 修回日期: 2023-12-21 责任编辑: 钱小静 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.YH23.1598

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2021YFC2902004); 国家自然科学基金资助项目(42372187); 宁夏2023年地质事业发展专项资金资助项目(640000233000000011005)

作者简介: 曹代勇(1955—),男,重庆人,教授,博士生导师。E-mail: cdy@cumtb.edu.cn

通讯作者: 魏迎春(1977—),女,山东巨野人,教授,博士生导师。E-mail: wyc@cumtb.edu.cn

引用格式: 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 Daiyong, WEI Yingchun, LI Xin, 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.



移动阅读

for Fine Exploration and Intelligent Development of Coal Resources, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The establishment of cooperative exploration model between coal and strategic metal resources in coal-bearing strata is the precondition for the transformation from strategic metal elements in coal-bearing strata to metal resources. The research on the basic theory and key technology of cooperative exploration of coal and strategic metal resources in coal-bearing strata is the core task of establishing cooperative exploration model. Based on the analysis of the basic characteristics of strategic metal elements in coal-bearing strata, the necessity of implementing the cooperative exploration of coal and strategic metal resources in coal-bearing strata is demonstrated. Through review on the evolution history of the concept of cooperative exploration, the relationship between comprehensive coal exploration and cooperative exploration is revealed, and considered that the cooperative exploration is the inheritance and development of comprehensive exploration, emphasizes the coordination and orderly and scientific organization in the process of comprehensive exploration of two or more mineral resources, and its core is the cooperative organization of exploration projects and cooperative implementation of key technologies. Based on the discussion on the principle of cooperative exploration of coal and strategic metal resources in coal-bearing strata, the theory and technical method system framework of cooperative exploration of coal and strategic metal resources in coal-bearing strata is put forward, which is the basis of establishing the model of cooperative exploration of coal and strategic metal resources in coal-bearing strata. The cooperative exploration of coal and strategic metal resources in coal-bearing strata should be based on the study of the enrichment and mineralization mechanism, combination types and occurrence rules of the strategic metal elements in coal-bearing strata, based on the multi-disciplinary theories of coal geology, ore deposit, geochemistry, geophysics and exploration engineering, and supported by the cooperative exploration technology system composed of key technologies such as precision drilling, fine geophysical exploration and fine geochemical exploration. Also, it should be based on the solid mineral exploration norms and other standards, follow the general principles of solid mineral resources exploration, comprehensive exploration and single mineral resource exploration, as well as the principles of research first, technical effectiveness, fine exploration, dynamic adjustment, zoning policy implementation, coordination and synchronization, and cooperate in the organization of exploration projects and implementation of key technologies, in order to achieve the balance of the best technical benefits and the best economic benefits of the cooperative exploration of coal and strategic metal resources in coal-bearing strata. On the basis of the completion of coal geological exploration tasks, it is expected to find out the geological characteristics and development geological conditions of the associated strategic metal resources, to obtain the corresponding resources or distribution characteristics of strategic metal elements, and to provide geological basis for the comprehensive development and utilization of mineral resources in coal-bearing strata. The core issues of cooperative exploration of coal and strategic metal resources in coal-bearing strata are as follows: determination of cooperative exploration objects, selection and cooperative implementation of exploration technologies, cooperative deployment of exploration projects, and scientific estimation of resources.

**Key words:** coal-bearing strata; strategic metal resources; cooperative exploration; principles of exploration; theory and technology system

含煤岩系的主要特点是沉积物源丰富、岩性类型多样、有机质含量高,从而为各类成矿作用奠定了良好物质基础,构成多种矿产赋存的有利载体。含煤岩系中除煤之外,还赋存或共、伴生了不同相态的多种矿产资源,包括煤层气、镓、锗、锂、铀等战略性矿产<sup>[1-2]</sup>。这些有机和无机、金属与非金属矿产或同源共生、或同盆共存,构成一个类型多样、资源丰富、相对独立、又具有不同程度成因联系与耦合关系的成矿环境和矿产赋存单元。

以有机质为主要物质组成的特征决定了煤的构

成具有吸附性和还原性能,在特定地质和地球化学条件下可富集多种战略性金属元素,例如锂、镓、铀、钍、钽、钒、锗、硒、锆、铋、钨、钼、稀土等“三稀”(稀散、稀有、稀土)元素,形成煤系金属矿产或煤型金属矿产<sup>[3-11]</sup>。煤系战略性金属矿产属于煤系矿产的重要组成部分,由于历史原因,过去完成的煤炭地质勘查多以煤为单一工作对象,对煤系其他矿产重视不够。当前新一轮找矿突破战略行动把“三稀”矿产作为主要工作目标之一<sup>[12]</sup>,从而也对煤炭地质勘查提出新要求、带来新的发展机遇。近年来,煤系战略性金属元素的

成因和赋存等基础理论研究方面取得了显著的进展,但缺乏地质勘查工程实践,从而构成实现煤系金属元素向金属矿产转变的重要制约因素。笔者从煤系战略性金属矿产的基本特点分析入手,论证实施煤与煤系战略性金属矿产协同勘查的必要性,探讨煤与煤系战略性金属矿产协同勘查的内涵和核心问题,初步提出煤与煤系战略性金属矿产协同勘查理论与技术方法体系框架,作为建立煤与煤系战略性金属矿产协同勘查模型的基础。

## 1 煤系战略性金属的基本特点

### 1.1 煤系战略性金属元素的微量性

与其他战略性金属矿产具有“稀”“伴”“细”的特点<sup>[13]</sup>相似,煤系战略性金属矿产属于微量元素富集成矿,煤和煤系岩层中战略性金属质量分数多数为 $0.1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-6}$ 量级<sup>[3,9,14-17]</sup>,圈定矿体的边界品位也仅 $10 \times 10^{-6}$ 量级。

长期以来,煤中微量元素的研究和评价工作主要聚焦于潜在的有害元素在煤炭开发和加工利用过程中的环境影响效应,进入21世纪以后,随着当代科学技术的发展,对包括镓、锗、锂、稀土等战略性金属在内的战略性矿产的需求迅速增加,煤中微量元素的资源效应日趋受到关注<sup>[3-7,10,18-21]</sup>,成为当前国内外煤地质学最富活力的研究热点和前沿方向之一。“十四五”国家重点研发计划“战略性矿产资源开发利用”于2021年启动“煤系战略性金属矿产资源赋存规律与精细勘探技术”“煤与伴生战略性金属矿产协调开采理论与技术”和“煤系战略性金属矿产协同分离回收理论与技术”3个项目,加快了我国煤系战略性金属矿产实施工业性开发的步伐。然而,煤系战略性金属矿产的“微量性”特征,导致地球物理和地球化学异常微弱,低于大多数物探和化探方法的检测门限,给煤系战略性金属矿产勘查带来极大的挑战。将煤系战略性金属矿产的微量性转化为可探测的宏观性,是地球物理与地球化学精细勘查技术方法实施的前提条件和主要任务。

### 1.2 赋存状态的复杂性

包括战略性金属在内的煤中微量元素赋存状态复杂,既可以是有有机结合态、也可以是无机结合态<sup>[15,22-24]</sup>(图1)。微量元素的有机亲和性是煤系战略性金属元素不同于矿物岩石成矿机制的一个显著特点,任德贻等<sup>[15]</sup>指出煤中微量元素都可以与煤有机质结合,只是结合的程度不同而已,由于元素赋存状态的复杂性和测定的困难性,煤中有机结合态元素种类尚未形成共识。多数学者认为,煤中的锗、铀、镓、稀

土、铍、硼等微量元素具有不同程度的有机亲和关系<sup>[6,15,24-26]</sup>,其中战略性金属元素Ge被认为是典型的有机亲和元素<sup>[4,27-29]</sup>,Ga、Li、U、REE等金属元素的赋存状态则存在不同观点<sup>[15,20,23-24,26-27,30-38]</sup>。

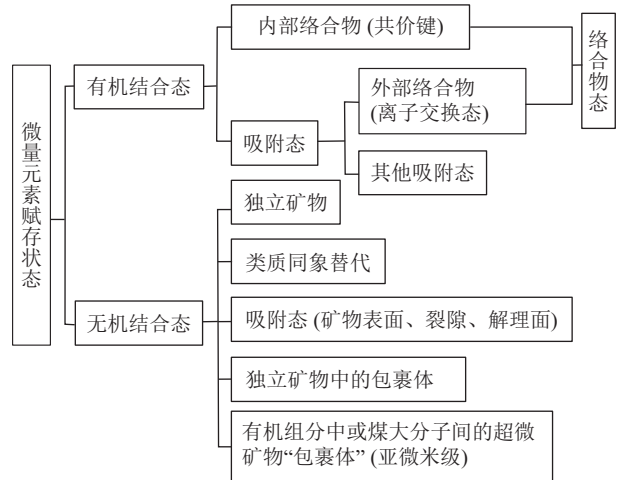


图1 煤中微量元素的赋存状态分类<sup>[15]</sup>

Fig.1 Occurrence of minor and trace elements in coal<sup>[15]</sup>

煤系战略性金属元素赋存状态的复杂性,是决定其宏观上富集成矿及其矿体(层)分布规律的重要因素,从而对资源评价和矿产勘查产生影响。

### 1.3 组合类型的多样性

煤系金属矿产成矿作用经历了“蚀源区供给(和蚀源区形成)—物质迁移—金属富集—后期改造保存”4个过程<sup>[6]</sup>,是多因素、多阶段、多层次综合作用的结果<sup>[8,15,39-40]</sup>。我国煤田地质条件时空差异显著,不同赋煤区和不同含煤岩系在剥蚀区物源性质、沉积环境和泥炭沼泽类型、火山和岩浆热液活动、构造格局和构造—热演化等成矿条件方面的差异,决定了煤系金属元素的成矿专属性和与煤共伴生组合类型的多样性(表1)。例如,有机亲和元素Ge主要与羧基(—COOH)、酚羟基(—OH)、巯基(—SH)、氨基(—NH)等结合<sup>[41]</sup>,趋向于在低煤阶中富集。典型实例如内蒙古二连盆地群乌兰图嘎褐煤盆地煤—锗共生矿床和云南西部临沧褐煤盆地煤—锗共生矿床<sup>[42-44]</sup>。晚古生代华北克拉通拗陷盆地北缘长期缓慢的构造隆升,为物源区母岩遭受彻底的剥蚀、风化和淋滤分解提供了良好条件,有利于亲石元素Al、Ga等搬运富集成矿,形成鄂尔多斯盆地北部准格尔煤田的煤—镓和山西北部煤—锂共生组合<sup>[31-32,45-47]</sup>。与碱性岩浆有关的战略性金属矿床通常包括很多超大型的高场强元素和稀土元素矿床<sup>[48]</sup>,华南西部晚古生代“峨眉地幔热柱”活动,构成康滇古陆以东川滇黔地区煤系多金属组合成矿带的主要构造控制因素<sup>[49-52]</sup>,煤中铈—铅—镓—稀土矿床



表 1 我国煤与煤系战略性金属矿产典型组合类型 (据文献[54]修改)

Table 1 Typical combination types of coal and strategic metal resources in coal-bearing strata in China

(Modified from Reference [54])

组合类型	赋煤区	煤系	典型地区
煤-锆	滇藏	新近系帮卖组	云南临沧地区 <sup>[44,55]</sup>
	东北	白垩系大磨拐河组、赛汉塔拉组	乌兰图嘎矿区 <sup>[42]</sup> 伊敏五牧场矿区 <sup>[56-57]</sup>
煤-镓	华北	石炭—二叠系太原组、山西组	准格尔煤田黑岱沟煤矿 <sup>[58]</sup> 大青山煤田 <sup>[59]</sup>
	西北	侏罗系八道湾组、西山窑组	准东煤田 <sup>[60]</sup>
煤-锂	华北	石炭—二叠系山西组、太原组	宁武煤田安太堡矿区 <sup>[46]</sup> 准格尔煤田哈尔乌素矿 <sup>[45]</sup>
			山西晋城矿区 <sup>[61]</sup>
煤-锂-镓	华南	二叠系合山组	广西上林万福矿区 <sup>[62]</sup>
煤-铀	华北	侏罗系延安组	鄂尔多斯盆地东胜矿区 <sup>[63]</sup>
	西北	侏罗系西山窑组	伊犁库捷尔泰 <sup>[64]</sup> 准东大庆沟煤矿 <sup>[65]</sup>
煤-稀土	华北	二叠系山西组、太原组	鄂尔多斯盆地北缘 <sup>[60]</sup> 贵州月亮田煤矿 <sup>[66]</sup>
			四川华蓥山 <sup>[67]</sup> 川南煤田 <sup>[68]</sup> 云南宣威地区 <sup>[69]</sup>
煤-铋、锑、镓、稀土	华南	二叠系龙潭组、宣威组	

均含有碱性火山灰夹矸<sup>[6,53]</sup>。

煤与煤系战略性金属矿产组合类型的多样性及其地质、地物和地化特征差异,必将会影响协同勘查对象的确定和勘查技术手段的选择。

**1.4 富集层位的差异性**

由特定的成矿条件和元素地球化学性质所决定,煤系战略性金属成矿层位也存在差异,不仅在煤层中富集,而且也可以在煤层夹矸和顶底板,以及煤系其他黏土岩(镓、锂、锆、钨等)或砂岩(铀)等层位富集成矿。图 2 为广西上林万福矿区二叠系上统合山组煤系战略性金属矿体垂向分布示意,发育 4 层矿层:Ⅰ矿层分布于 K<sub>5</sub> 煤层及其顶底板的炭质泥岩、含炭泥岩、铝土岩、铁铝岩中,底部茅口组灰岩古风化壳锂、镓和稀土高度矿化。Ⅱ矿层分布于 K<sub>5</sub> 与 K<sub>4</sub> 煤层之间的铝土岩、铁铝岩中,下距Ⅰ矿层 20~100 m。Ⅲ矿层分布于 K<sub>4</sub> 煤层及其顶底板的炭质泥岩、含炭泥岩中,下距Ⅱ矿层 0~40 m。Ⅳ矿层分布于 K<sub>2</sub> 煤层及其顶底板的炭质泥岩、含炭泥岩中,下距Ⅲ矿层 15~30 m<sup>[62]</sup>。

不同于以煤层为单一目标的煤炭地质勘查,煤与煤系战略性金属矿产协同勘查属于多目标勘查工程,不仅体现在煤与战略性金属不同组合类型决定的多种勘查对象,还体现在金属成矿层位的多样性和差异性,决定了勘查目标不能仅限于煤层本身,还需要关

注煤系的其他特定层位。

**1.5 空间分布的不均匀性**

煤系战略性金属矿产的另一个显著特点,是空间分布不均匀性和突变性显著,同一勘查区相邻钻孔、乃至同一钻孔煤层不同分层的元素质量分数差异可达数倍至数十倍(图 3)。这种空间分布特征就对查明煤系战略性金属矿产提出了更高的要求,因此,控制煤系战略性金属矿产的勘查工程量要远大于相应级别的煤炭资源勘查,换句话说,同一勘查阶段的勘查工程布置不能得到相同级别的煤炭资源和煤系战略性金属矿产,后者通常需要根据战略性金属元素的分布特征针对特定块段增加勘查工程量。

**1.6 由微量元素到金属矿产**

煤系战略性金属元素的微量性、复杂性、不均匀性,以及与煤和含煤岩层共生共存性等特点,决定其难以作为独立矿种进行勘查开发,在煤炭资源勘查同时实施煤系战略性金属矿产勘查,则是实现煤系金属元素向金属矿产转变的必由途径,其基本要求是:理论有据、技术有效、经济合理。

**2 协同勘查概念的形成与发展**

**2.1 演变历史**

“协同”一词来自古希腊语,是指协调 2 个或者 2 个以上的不同资源或者个体,协同一致地完成某一任务的过程或能力。“协同勘查”则用以指在勘查主要

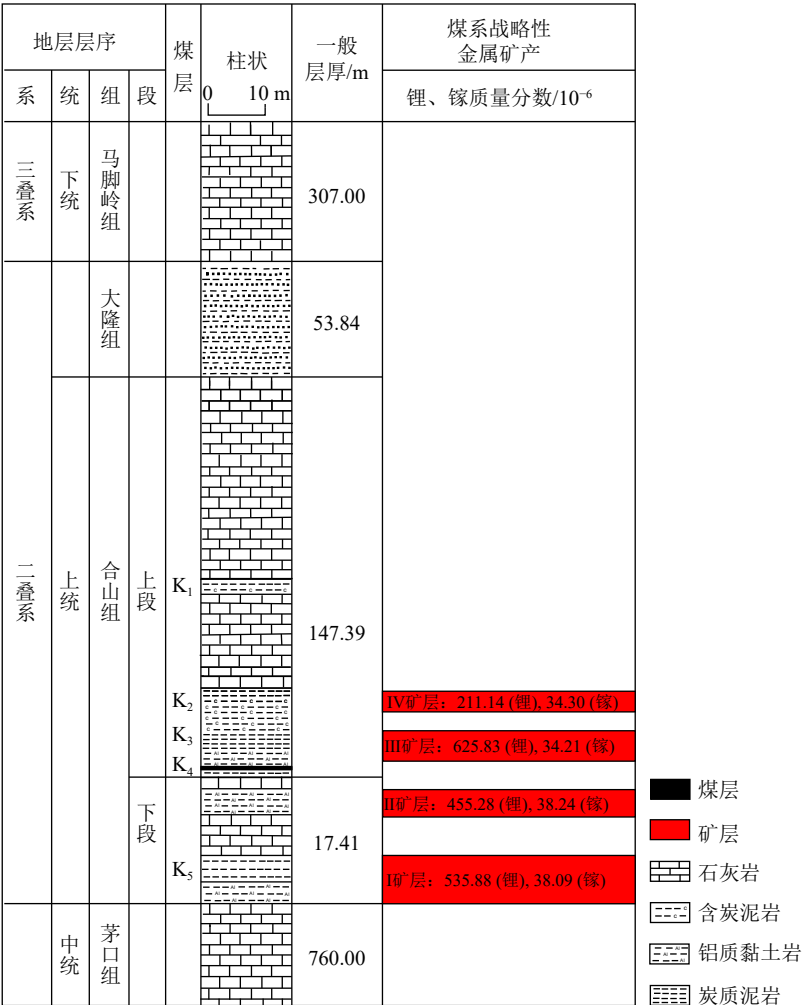


图 2 广西万福矿区煤-锂-镓组合层位分布 (据文献[62]修改)

Fig.2 Distribution of coal-lithium-gallium assemblage strata in Wanfu mining area, Guangxi Province (Modified from reference [62])

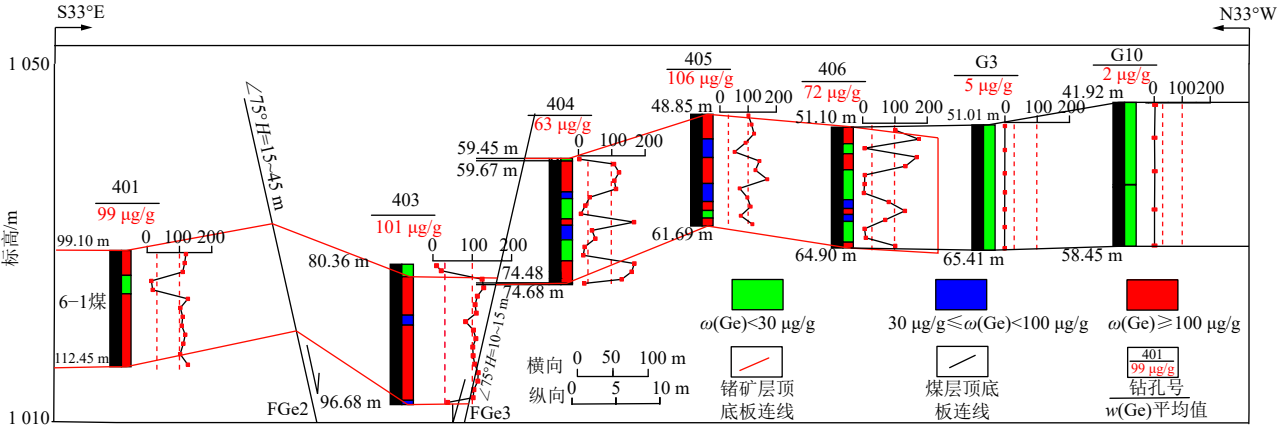


图 3 内蒙古乌兰图嘎褐煤-锗矿 4—4'探线剖面

Fig.3 Section of 4—4' exploration line of lignite-germanium mine in Wulantuga, Inner Mongolia

矿产时对共伴生矿产同时进行勘查的工作,或同时进行 2 个或多个矿种的勘查工作。“协同勘查”的同义词或近义词有:“综合勘查”<sup>[70-71]</sup>、“多矿种兼探”<sup>[72-73]</sup>、“多矿种共探”<sup>[74]</sup>等。

多矿种共生共存现象早已被人们所认识,1986 年颁布的《中华人民共和国矿产资源法》就明确规定“国

家对矿产资源的勘查、开发实行统一规划、合理布局、综合勘查、合理开采和综合利用”。在各类矿产地质勘查规范中,“综合勘查”均作为一条基本原则(表 2)。

由上述可知,综合勘查是指勘查主要矿产时对共伴生矿产同时进行勘查。20 世纪 60 年代之后,随着物探、遥感等勘查技术的普及和发展,综合勘查又被

表 2 矿产地质勘查规范中对于综合勘查 (综合评价) 的表述

规范名称	发布时间	内容
《中华人民共和国矿产资源法》	1986-03-19通过， 2009-08-27第2次修正	第7条 国家对矿产资源的勘查、开发实行统一规划、合理布局、综合勘查、合理开采和综合利用
GB/T 13908—2020 《固体矿产勘查规范总则》	2002年首次发布，2020- 04-28修订	3.1 依法勘查、绿色勘查、综合勘查，合理利用和保护矿产资源 6.1.5.1 各勘查阶段均应对矿床进行综合勘查综合评价，具体要求按相关综合勘查综合评价规范、矿种(组)规范执行
GB/T 25283—2023 《矿产资源综合勘查评价规范》	2010年首次发布，2023- 05-23修订	3.6 综合勘查在勘查主要矿产的同时，对共生伴生矿产一并进行勘查的工作
《煤炭资源地质勘探规范(试行)》	1980-03-25煤炭 工业部发布	第5条 根据资源条件和实际需要开展石煤、泥炭、油页岩等低热值燃料的地质勘探工作，扩大燃料资源。做好煤矸石和其他有益矿产的综合评价
《煤炭资源地质勘探规范》 (储发[1986]147号)	全国矿产储量委员会 1986年12月颁布	第1.5条 按以煤为主、综合勘探、综合评价的原则，做好其他有益矿产的勘探评价
DZ/T 0215—2002 《煤、泥炭地质勘查规范》	2002-12-17	4.3 煤炭地质勘查必须坚持“以煤为主、综合勘查、综合评价”的原则，做到充分利用、合理保护矿产资源，做好与煤共伴生的其他矿产的勘查评价工作
DZ/T 0215—2020 《矿产地质勘查规范 煤》	2020-04-30	3.4 坚持综合勘查、综合评价

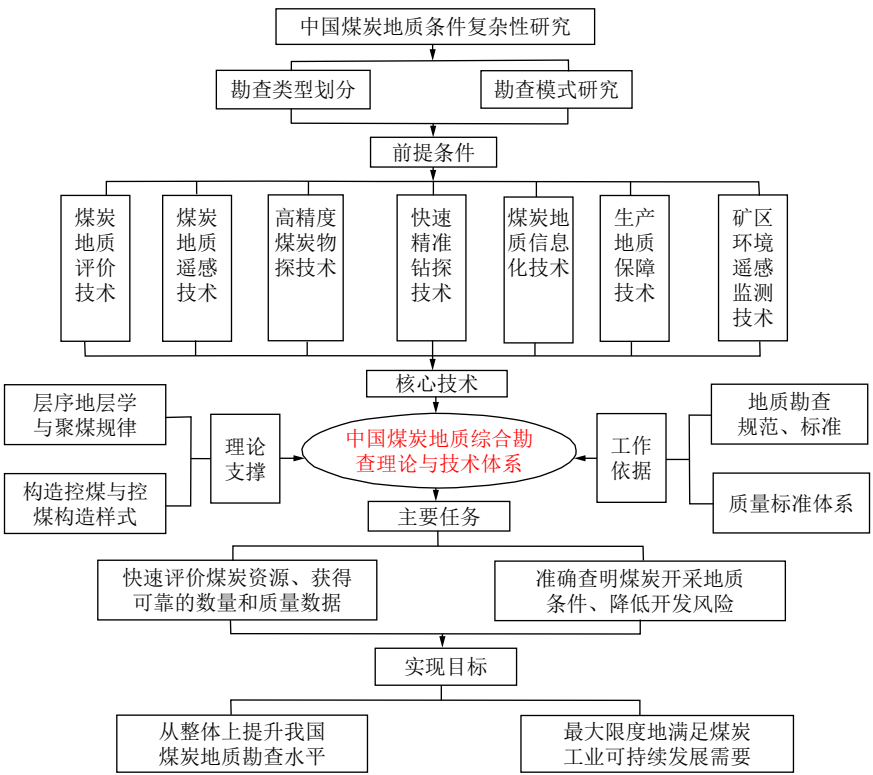


图 4 煤炭地质综合勘查理论与技术体系 (据文献[70,75]修改)

Fig.4 Comprehensive exploration theory and technical system of coal resources (Modified from Reference[70,75])

赋予多种勘查技术手段综合运用内容。经过 50 余年的实践,逐渐形成了以中国煤田地质理论新进展为支撑、新形势下煤炭地质勘查规范和标准体系为依据,由煤炭资源遥感技术、高精度地球物理勘探技术等核心技术构成的当代煤炭地质综合勘查理论与技术体系<sup>[70,75]</sup>(图 4)。

“协同勘查”一词自 21 世纪初开始出现在专业文

献中。伍天洪等<sup>[76]</sup>、杨利伟等<sup>[77]</sup>、王毅等<sup>[78]</sup>、李增学等<sup>[79-80]</sup>、王怀洪等<sup>[81]</sup>、韩效忠等<sup>[82]</sup>、黄旭钊等<sup>[83]</sup>、孙杰等<sup>[84]</sup>分别讨论了多能源矿产协同勘查、煤铀协同勘查、岩浆型铜镍矿协同勘查、煤炭与煤层气协同勘查等多矿种协同勘查理论与技术体系。

煤系多种矿产共生共存使得多目标协同勘查成为必需,地质地球物理和地球化学勘查技术的发展及

其综合运用使协同勘查成为可能;多矿产的协同勘探基本原则体现在勘探方法最优化和经济效益最大化。李增学等<sup>[79-80]</sup>认为协同勘查是在综合勘查的基础上发展而来的多矿产科学勘查系统,主要包括多种矿产共存共聚协同勘查基本思路、多种矿产协同勘探理论、协同勘查模式构建等(图5)。王佟等<sup>[85]</sup>将煤炭地质勘

查发展脉络划分为从找煤勘查→为合理开发服务的综合勘查→多种矿产共生共存的协同勘查→与环境和谐共进的生态地质勘查等阶段。认为煤系矿产资源协同勘查的基本理念是将以煤层为主要勘查对象扩展为煤系为勘查对象,勘查目标不仅限于煤,而且包括煤层和煤系中的其他矿产<sup>[86]</sup>。

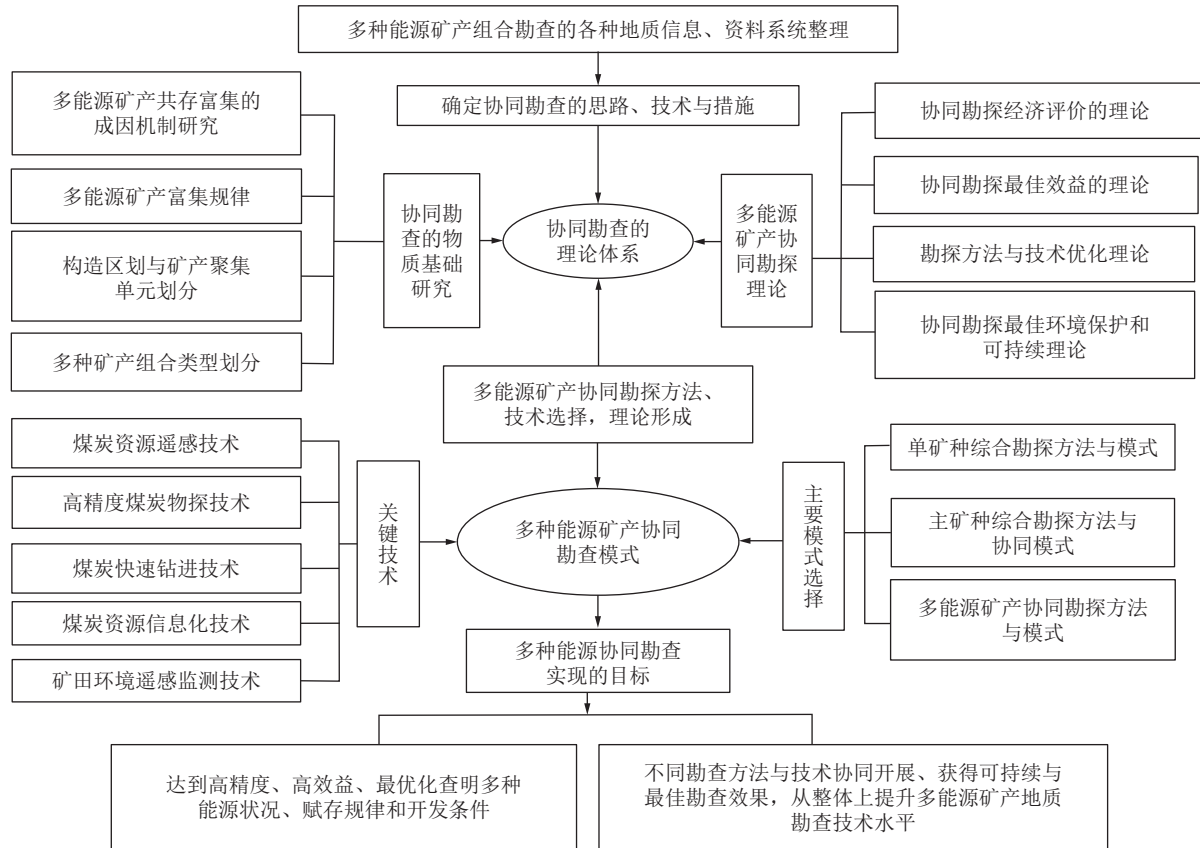


图5 以煤炭资源为主的多种矿产协同勘查体系<sup>[79]</sup>

Fig.5 Block diagram of coal priority multiple mineral resources "exploration in coordination" system<sup>[79]</sup>

## 2.2 对协同勘查的理解

现有的部分协同勘查文献中,煤炭地质综合勘查被表述为多种勘查技术手段的综合运用,协同勘查则包括勘查技术的综合运用和煤系多种矿产的综合勘查。然而,回顾历史(表2),综合勘查的基本涵义是强调多矿种勘查,即“在勘查主要矿产的同时,对共生伴生矿产一并进行勘查”。因此,可以将协同勘查视为综合勘查的继承和发展,“综合勘查”术语在各类地质勘查规范中已经普遍使用,“协同勘查”的涵义尚在探索、完善过程中。

从煤炭地质勘查实践看,综合勘查具有多种矿产的综合勘查和多种技术手段的综合运用等2方面的理解;协同勘查则更加强调2种或多种矿产综合勘查过程中的协调有序、科学组织。也有观点认为综合勘查是指勘查主矿种的同时,对共伴生矿产的兼探;协同勘查指2种或多种不分主次的矿产同时进行勘查。

## 3 协同勘查理论与技术方法

### 3.1 煤与煤系战略性金属协同勘查的原则

勘查原则是勘查的指导思想和工作指南。煤与煤系战略性金属协同勘查作为一类矿产勘查活动既要遵循矿产勘查的一般性原则,又要体现煤系战略性金属元素赋存特征,确定相应的具体原则(图6)。包括2个层次的原则,基础层次协同勘查原则即固体矿产勘查的一般性原则,专属层次协同勘查原则为煤与煤系战略性金属矿产协同勘查专属原则。

其中,协同勘查原则的基础层次是固体矿产勘查的一般性原则,指导和服务于矿产勘查的全过程,是开展勘查工作的基本遵循,包括:绿色勘查原则、实际出发原则、经济合理原则、全面综合原则、循序渐进原则和先进性原则。

协同勘查原则的专属层次是在遵循基础层次协



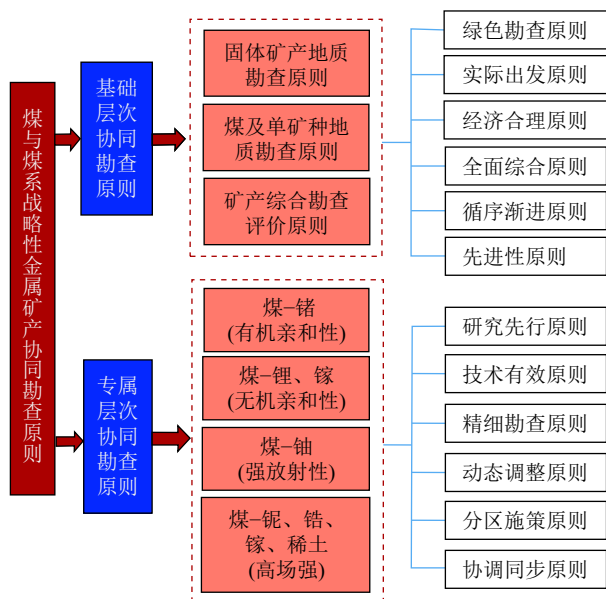


图 6 煤与煤系战略性金属协同勘查的原则

Fig.6 Principles of coordinated exploration of coal and strategic metal resources in coal-bearing strata

同勘查原则的基础上,针对煤与煤系战略性金属矿产协同勘查的特殊性,提出的针对性勘查原则,包括:研究先行原则、技术有效原则、精细勘查原则、动态调整原则、分区施策原则、协调同步原则。

### 3.2 协同勘查模型与协同勘查理论与技术方法框架

煤矿床勘查模型(勘查模式)是指针对不同煤矿床勘查类型,在赋煤规律研究的基础上,针对查明某类煤矿床所必须具备的有利地质条件、有效勘查技术手段、合理勘查程序和勘查工程布置方案的高度概括和总结,可以给类似煤矿床勘查工程提供借鉴和指导<sup>[87-88]</sup>。煤与煤系战略性金属矿产协同勘查尚处于起步和探索阶段,缺乏赖以建立协同勘查模型的工程实践经验。因而,从煤系战略性金属元素的基本特征和协同勘查基本需求分析入手,探讨煤与煤系战略性金属矿产协同勘查理论和技术方法,是建立煤与煤系战略性金属矿产协同勘查模型的基础工作。

在现有研究成果基础上,笔者初步提出煤与煤系战略性金属矿产协同勘查理论与技术方法体系框架(图 7)。煤与煤系战略性金属矿产协同勘查应以煤系战略性金属元素富集成矿机制、组合类型与赋存规律研究为前提,以煤地质学、矿床学、地球化学、地球物理学、勘查工程学等多学科理论为基础,以精准钻探、精细物探和精细化探等关键技术构成的协同勘查技术体系为支撑,以《固体矿产地质勘查规范总则》《矿产资源综合勘查评价规范》,以及《矿产地质勘查规范煤》等单矿种勘查规范等标准为依据,遵循固体矿产资源勘查和综合勘查及单矿种勘查的一般性原

则,以及研究先行、技术有效、精细勘查、动态调整、分区施策、协调同步等原则,协同组织勘查工程、协同实施关键技术,实现煤与煤系战略性金属矿产协同勘查的最佳技术效益和最佳经济效益的平衡。在完成煤炭地质勘查任务的基础上,查明共伴生战略性金属矿产的地质特征和开发地质条件,获得相应的资源量或元素分布特征,为煤系矿产资源综合开发利用提供地质依据。

在这一体系框架中值得关注并深入探讨的核心问题包括协同勘查对象的确定、协同勘查技术手段的选择、协同勘查工程的布置、资源类型划分与资源量估算等 4 方面。

## 4 协同勘查的核心问题

### 4.1 协同勘查对象的确定

煤系矿产资源可以从经济性角度、赋存特征角度、成因角度、工业分类角度以及相态角度 5 个方面进行分类<sup>[1-2]</sup>。

煤与煤系战略性金属矿产协同勘查对象的确定,需要综合考虑战略性金属元素赋存状态(图 1)、组合类型(表 1)、地球物理和地球化学响应<sup>[54]</sup>、富集程度或经济性等因素,进行综合分类(图 8)。其中,煤系战略性金属元素的经济性是决定勘查策略的基本因素,根据其富集程度划分为共生矿产和伴生矿产 2 种类型。前人对共生和伴生矿产的含义具有不同的理解<sup>[2]</sup>,本文采用 GB/T 13908—2020《固体矿产勘查规范总则》定义:共生矿产指同一矿区内赋存 2 种及以上均达到其矿床工业指标要求的有用组分,其资源量规模能满足预期可经济开采的要求,且在开采主要矿产是会受到影响的矿产;伴生矿产则是指随主要矿产赋存的、未达到该矿种矿床工业指标要求,或虽达到工业指标要求但资源量规模不具单独开采价值,在开采主要矿产是可经济回收利用的矿产<sup>[89]</sup>。煤系矿产资源分类与协同勘查对象分类有密切关系,但侧重点不同,前者偏重于成因和分布规律研究,可以服务于煤与煤系战略性金属成矿模式和找矿模型,后者则侧重于矿产勘查工程实施,服务于协同勘查模型的建立。

### 4.2 协同勘查技术手段的选择

煤与煤系战略性金属协同勘查技术选择的核心,在于地质-地球化学-地球物理-钻探等关键技术协同实施的合理性、有效性和可行性。21 世纪初形成的煤炭地质综合勘查核心技术<sup>[70,75]</sup>,构成煤与煤系战略性金属协同勘查技术体系的基础,研发针对煤系战略性金属矿产的精细地球物理与精细地球化学勘查技术,则是协同勘查亟待攻克的技术瓶颈(图 9)。



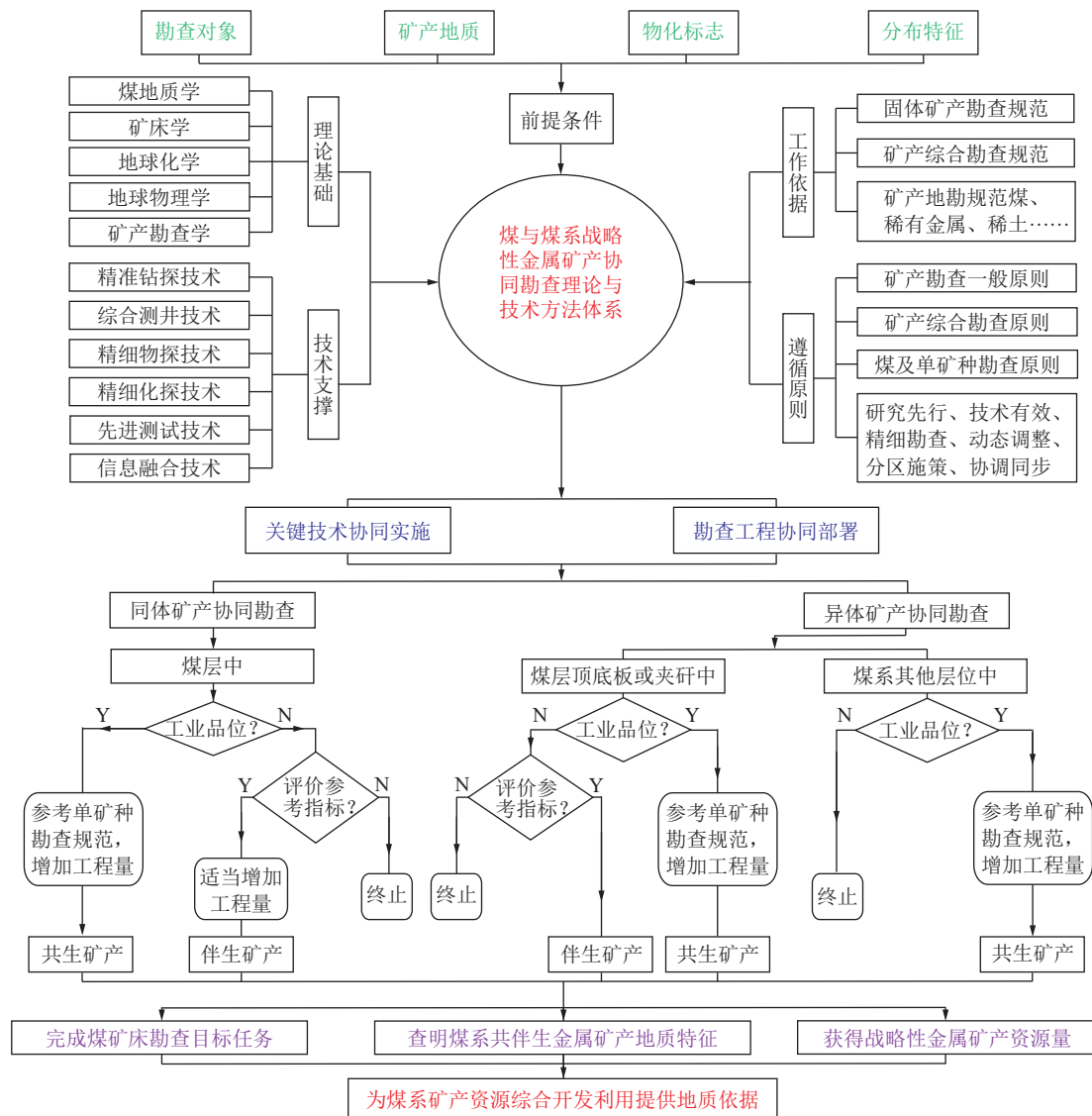


图 7 煤与煤系战略性金属矿产协同勘查理论与技术体系框架

Fig.7 Theory and technical system framework of cooperative exploration of coal and strategic metal resources in coal-bearing strata

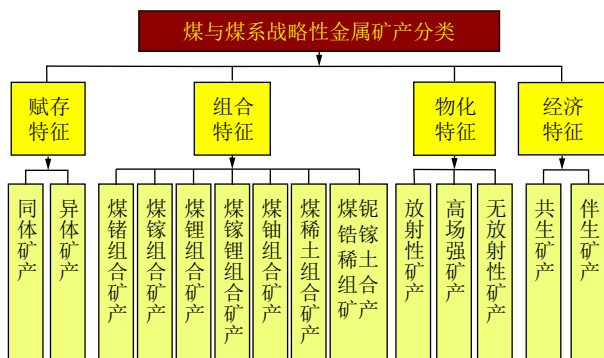


图 8 协同勘查对象分类

Fig.8 Classification of cooperative exploration objects

基于前述煤系战略性金属元素的赋存特征,从技术有效原则和精细勘查原则出发,煤与煤系战略性金属协同勘查地球物理与精细地球化学勘查技术包括两大类:①直接探测技术,包括岩石地球化学方法即

钻孔岩心采样测试,以及根据战略性金属矿产的地球物理响应和地球化学响应采用的物探和化探方法。例如放射性勘探(伽马能谱、氡及子体测量)和自然伽马测井技术,穿透性地球化学方法(纳米地球化学探测/地气测量)。②间接探测技术,针对金属元素赋存环境或载体的物探和化探技术。如南方晚二叠世煤系铀-钍-镭赋存的火山灰蚀变层自然伽马异常探测(图 10),利用声波测井和高精度地震解释煤中镭元素载体勃姆石质量分数间接寻找煤-镭矿床<sup>[90]</sup>,煤系砂岩型铀矿氧化还原带的高精度磁法<sup>[91]</sup>,以及地震电法等物探技术对煤层和其他关键层位的探测。

魏迎春等<sup>[54]</sup>基于针对煤与煤系战略性金属矿产组合的地质条件、地球化学条件和地球物理条件,遵循经济效益最大化和勘查方法最优化原则,初步提出煤-铀矿床、煤-锂-镓矿床、煤-锗矿床和煤-铋-铅-

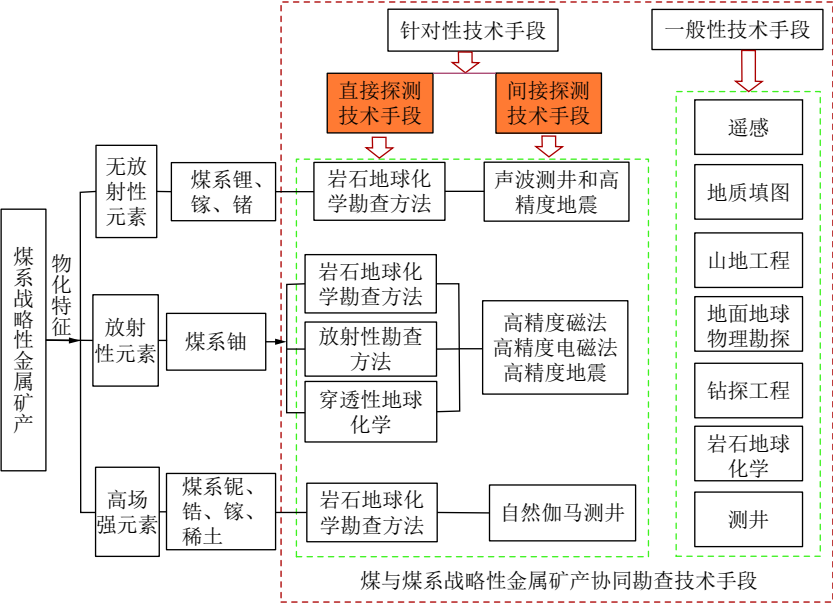


图 9 协同勘查技术手段组合

Fig.9 Combination of cooperative exploration technology and means

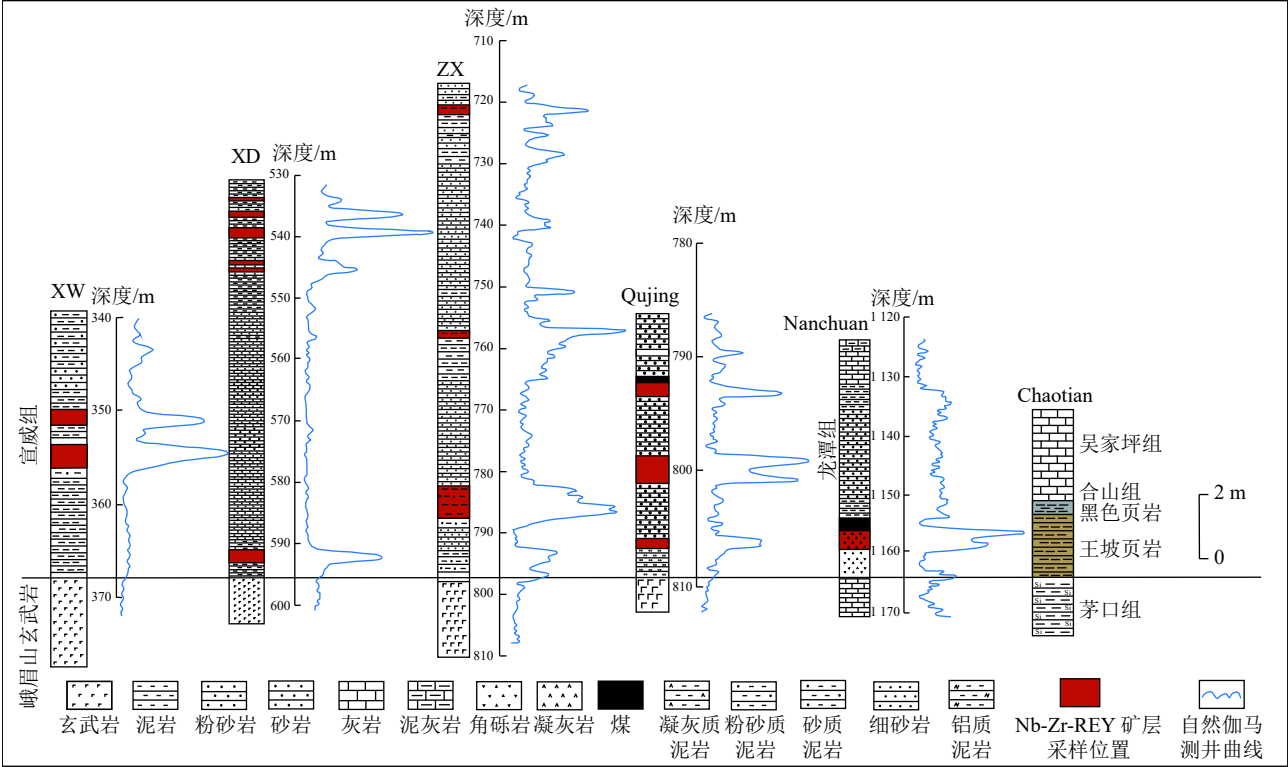


图 10 滇东等高场强战略性金属 (Nb-Zr) 矿层的自然伽马响应 (据文献[67]修改)

Fig.10 Natural gamma response of Nb-Zr deposits in eastern Yunnan province (Modified from Reference[67])

镓-稀土矿床等典型共生组合矿产协同勘查技术方法。

4.3 勘查工程布置与控制程度

煤与煤系战略性金属矿产协同勘查工程布置遵循研究先行、动态调整、分区施策等原则，其核心，在于针对不同勘查对象类型和不同勘查阶段，勘查工程布置系统和控制程度等方面的协同部署、协调有序开展，以适当的工程投入获得最佳的综合勘查效果。

勘查工程布置原则上以煤炭资源地质勘查阶段的要求为基础展开，对勘查过程中获得的数据即使进行分析研究。对于战略性金属元素质量分数高于该矿种工业品位或边界品位的块段，采取适宜的技术手段和加密工程布置，提高工程控制程度。例如，内蒙古胜利煤田乌兰图嘎煤-锆勘探区，煤炭勘查类型为二类一型，基本勘查网度 800 m×800 m 圈定控制资源

量;参照 DZ/T 0203—2020《矿产地地质勘查规范 稀有金属类》,根据矿体规模、矿体形态复杂程度、主要有用组分分布均匀程度、厚度稳定程度、构造影响程度 5 个主要地质因素来确定煤中锗勘查类型为 I 型,获得控制资源量的基本网度为 200 m×200 m 网度。煤

炭勘探阶段最高网度仅能圈定锗矿推断资源量,根据详查阶段数据,对超过锗矿工业品位的勘探区西部(图 11(a)),加密 200 m×200 m 网度和中心加密 100 m×100 m(图 11(b)),达到锗矿勘探阶段,实现煤与锗矿协同勘查的最佳效益。

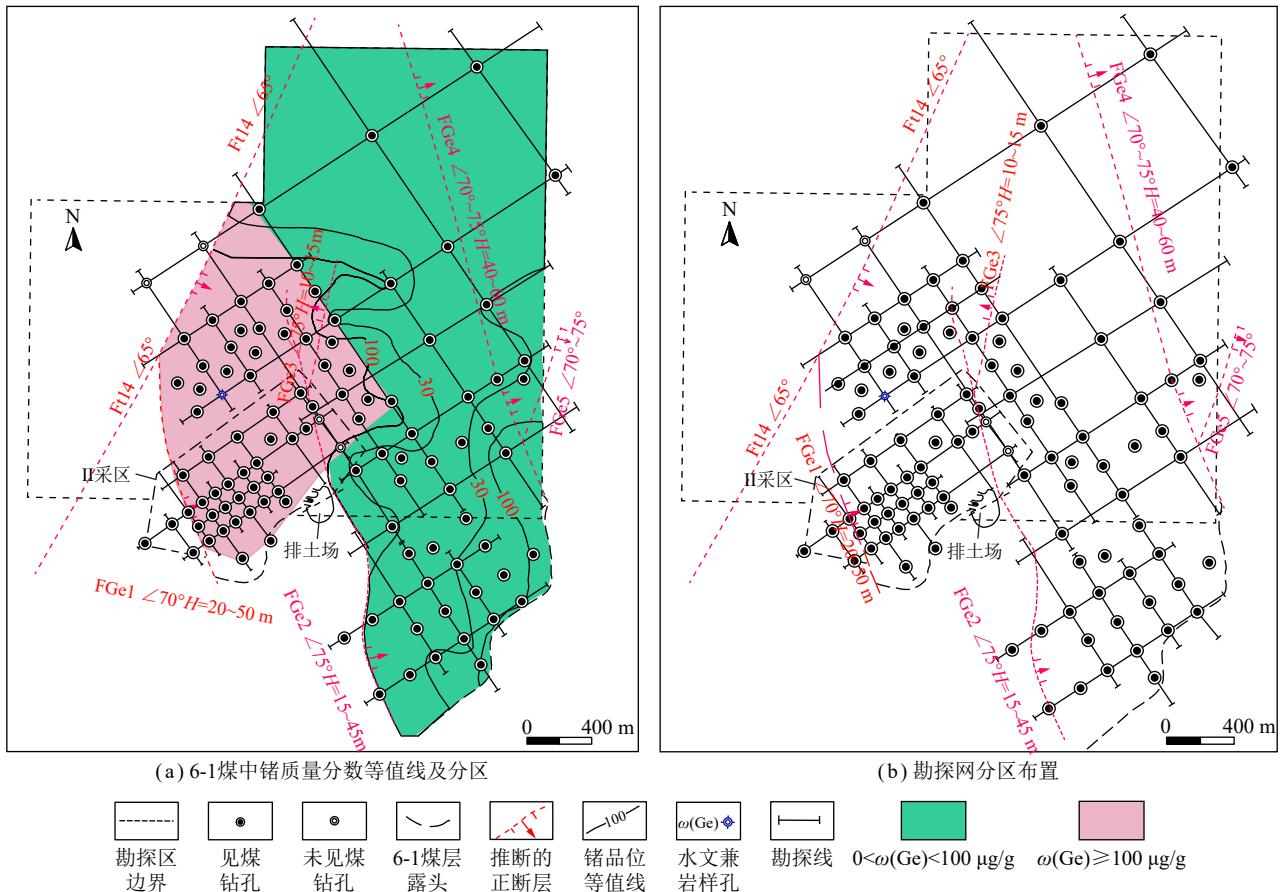


图 11 乌兰图嘎煤-锗协同勘查项目勘探工程布置

Fig.11 Layout of coal-germanium cooperative exploration in Wulantuga

对战略性金属超过该矿种工业品位并达中型规模以上的区域,则应按该矿种勘查规范布置勘查工程实施专门勘查。

#### 4.4 资源量的科学估算

如前所述,煤系战略性金属矿产各级资源量的勘查工程控制程度要求远高于对应级别的煤资源量,因此,根据协同勘查矿种协调、分区施策的原则,煤炭资源量与战略性金属资源量需要分别划分区域估算。此外,煤作为典型的层状矿床,资源量估算通常采用地质块段法,煤系战略性金属矿产属于“三稀”(稀疏、稀有、稀土)元素成矿,其共同特点是空间变异性显著,资源量估算除地质块段法之外,往往采用地质统计学法和 SD 法的估算方法。

煤与战略性金属矿产资源量估算指标也存在很大差异,不同于前者采用煤炭密度乘以煤层体积的简

单方法,金属矿产资源量估算的基本参数为品位(金属质量分数)。以边界品位划分矿体、以工业品位估算资源量,后者采用盈亏平衡原则论证确定,具有一定程度的可变性。前人对煤(煤系)战略性金属元素评价指标开展了相关研究工作(表 3),但是,由于煤(煤系)战略性金属元素开发利用尚处于起步探索阶段,现有指标缺乏工业利用实例支撑。煤系战略性金属元素赋存状态的多样性进一步增加了确定评价指标的复杂性,例如,无机亲和元素的灰基(煤灰中质量分数)指标<sup>[10]</sup>较为真实地反映其可利用性,而对于有机亲和元素言,采用可燃基(有机组分中质量分数)可能更为合理。因此,合理确定煤系共生伴生战略性金属矿产的工业指标,是科学地估算资源量亟待解决的核心问题。

乌兰图嘎煤-锗矿是目前我国开发利用程度最高

表 3 煤系战略性金属元素评价指标

Table 3 Identification index of coal measure graphite $\mu\text{g/g}$				
元素	边界品位(灰基)	边界品位(煤基)	工业品位(煤基)	文献来源
Ge	300	10~100 (一般工业要求)		[92]
		30	100	#
		20	100	[71]
				[11]
Ga	100	30~50 (一般工业要求)		[92]
				[11]
		30	50	[71]
Li				120 [93]
		80	120	[71]
U	1 000	40 (回收利用指标)		[93]
				[11]
		300 (回收利用指标)		[93]
REY	1 000			[11]
		20	100	[71]
				[11]
Nb	300			[11]
Zr	2 000			[11]

注：#为1998年《关于内蒙古自治区锡林郭勒盟乌兰图嘎煤矿Ⅱ采区详查工业指标的批复》。

的煤中战略性金属矿床,原国土资源部 1998 年《关于内蒙古自治区锡林郭勒盟乌兰图嘎煤矿Ⅱ采区锆矿详查工业指标的批复》确定锆的边界品位为 0.003% (30  $\mu\text{g/g}$ ),最低工业品位为 0.01%(100  $\mu\text{g/g}$ );以最低工业品位确定锆矿最低可采边界,大于边界品位的样品均参与单工程加权平均品位估算锆资源量。GB/T 41042—2021《煤中有价元素含量分级及应用导则》提出煤中有价元素的概念,将其定义为“有较高的经济价值,且在煤中富集程度较高,达到或接近工业品位,具有作为工业矿床开发或综合利用潜力的元素”[94],进行了煤中有价金属元素(铝、镓、锆、锂)的质量分数分级,提出生产中适宜利用煤中镓、锆、锂的质量分数指标大致相当于表 3 对应的边界品位。

为了全面反映煤系战略性金属元素的分布特征和经济性,本文根据战略性金属富集程度和分布位置划分为 3 种类型(表 4)。富集程度 $\geq$ 工业品位的共生矿产根据勘查工程控制程度可分别估算探明、控制和推断资源量;富集程度 $\geq$ 边界品位(或评价参考指标)的伴生矿产估算资源量建议称为伴生或综合利用资源量(具有潜在资源的涵义);富集程度 $<$ 评价参考指标的金属元素作为有益或有害组分,不估算资源量,以元素质量分数(最大~最小)/平均值表示。

表 4 煤系战略型战略性金属元素矿产资源量分类  
Table 4 Identification index of coal measure graphite

富集程度	类别	位置	资源类型
$\geq$ 工业品位	共生矿产	煤层、顶底板、其他层位	探明、控制、推断资源量
$<$ 工业品位且 $\geq$ 边界品位	伴生矿产	煤层、煤层顶底板	探明、控制、推断伴生资源量
$<$ 边界品位	有益或有害组分	煤层	以元素质量分数表述

5 结 论

(1) 煤系中战略性金属元素的微量性和分散性、以及与煤或煤系其他岩层共存性等特点,决定其难以作为独立矿种进行勘查开发,在煤矿产勘查同时实施煤系战略性金属矿产勘查则是一条理论有据、技术有效、经济合理的必由途径。

(2) “协同勘查”是“综合勘查”的继承和发展,综合勘查具有多种矿产综合勘查和多种技术手段综合运用等 2 方面的理解。协同勘查则更加强调多种矿产综合勘查过程中的协调有序、科学组织。

(3) 煤与煤系战略性金属矿产协同勘查应以战略性金属元素富集成矿机制研究为前提,以基础学科和应用学科理论为基础,以适宜的勘查技术为支撑,以矿产勘查规范体系为依据,遵循协同勘查原则,协同

组织勘查工程、协同实施关键技术,实现最佳技术效益和最佳经济效益的平衡。在完成煤炭地质勘查任务的基础上,查明共伴生战略性金属矿产的地质特征和开发地质条件,获得相应的资源量或元素分布特征,为煤系矿产资源综合开发利用提供地质依据。

(4) 煤与煤系战略性金属矿产协同勘查值得关注并深入探讨的核心问题包括:勘查对象类型划分和综合评价指标的制定,勘查技术的协同实施,勘查工程的协同部署,资源量的科学估算。

参考文献(References):

[1] 孙升林, 吴国强, 曹代勇, 等. 煤系矿产资源及其发展趋势[J]. 中国煤炭地质, 2014, 26(11): 1-11.  
SUN Shenglin, WU Guoqiang, CAO Daiyong, et al. Mineral resources in coal measures and development trend[J]. Coal Geology of China, 2014, 26(11): 1-11.



- [2] 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 Daiyong, QIN Guohong, ZHANG Yan, et al. Classification and combination relationship of mineral resources in coal measures[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(9): 2150–2155.
- [3] 任德贻, 代世峰. 煤和含煤岩系中潜在的共伴生矿产资源一个值得重视的问题[J]. 中国煤炭地质, 2009, 21(10): 1–4.  
REN Deyi, DAI Shifeng. Potential coexisting and associated mineral resources in coal and coal-bearing strata—An issue should pay close attention to[J]. Coal Geology of China, 2009, 21(10): 1–4.
- [4] 代世峰, 任德贻, 周义平, 等. 煤型稀有金属矿床: 成因类型、赋存状态和利用评价[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1707–1715.  
DAI Shifeng, REN Deyi, ZHOU Yiping, et al. Coal-hosted rare metal deposits: Genetic types, modes of occurrence, and utilization evaluation[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1707–1715.
- [5] 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 Shifeng, ZHAO Lei, WEI Qiang, 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.
- [6] 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 Shifeng, LIU Chiyang, ZHAO Lei, et al. Strategic metal resources in coal-bearing strata: Significance and challenges[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(5): 1743–1749.
- [7] SEREDIN V V. From coal science to metal production and environmental protection: A new story of success[J]. International Journal of Coal Geology, 2012, 90–91: 1–3.
- [8] SEREDIN V V, DAI Shifeng, SUN Yuzhuang, et al. Coal deposits as promising sources of rare metals for alternative power and energy-efficient technologies[J]. Appl Geochem, 2013, 31: 1–11.
- [9] DAI Shifeng, REN Deyi, CHOU Chenlin, et al. Geochemistry of trace elements in Chinese coals: A review of abundances, genetic types, impacts on human health, and industrial utilization[J]. International Journal of Coal Geology, 2012, 94(1): 3–21.
- [10] DAI Shifeng, 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.
- [11] DAI Shifeng, ARBUZOV S I, CHEKRYZHOV I Y, et al. Metalliferous coals of Cretaceous age: A review[J]. Minerals, 2022, 12: 1–51.
- [12] 王登红, 刘善宝, 王成辉, 等. 我国三稀矿产找矿进展述评与新一轮找矿建议[J]. 中国地质调查, 2023, 10(5): 1–8.  
WANG Denghong, LIU Shanbao, WANG Chenghui, et al. Review on the progress of prospecting for three types of rare mineral resources in China and suggestions for the new round of prospecting[J]. Geological Survey of China, 2023, 10(5): 1–8.
- [13] 翟明国, 吴福元, 胡瑞忠, 等. 战略性关键金属矿产资源: 现状与问题[J]. 中国科学基金, 2019, 30(2): 106–111.  
ZHAI Mingguo, WU Fuyuan, HU Ruizhong, et al. Critical metal mineral resources: Current research status and scientific issues[J]. China Science Foundation, 2019, 30(2): 106–111.
- [14] 唐修义, 黄文辉. 中国煤中微量元素[M]. 北京: 商务印书馆, 2004.
- [15] 任德贻, 赵峰华, 代世峰, 等. 煤的微量元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [16] KETRIS M P, YUDOVICH Y E. Estimations of clarkes for carbonaceous biolithes: World averages for trace element contents in black shales and coals[J]. International Journal of Coal Geology, 2009, 78(2): 135–148.
- [17] FINKELMAN R B, PALMER C A, WANG P. Quantification of the modes of occurrence of 42 elements in coal[J]. International Journal of Coal Geology, 2018, 185: 138–160.
- [18] DAI Shifeng, YAN Xiaoyun, WARD C R, et al. Valuable elements in Chinese coals: A review[J]. International Journal of Coal Geology, 2016, 60(5–6): 590–620.
- [19] 代俊峰, 李增华, 许德如, 等. 煤型关键金属矿产研究进展[J]. 大地构造与成矿学, 2021, 45(5): 963–982.  
DAI Junfeng, LI Zenghua, XU Deru, et al. Coal-hosted critical metal deposits: A review[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2021, 45(5): 963–982.
- [20] 秦身钧, 徐飞, 崔莉, 等. 煤型战略关键微量元素的地球化学特征及资源化利用[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(3): 1–38.  
QIN Shenjun, XU Fei, CUI Li, et al. Geochemistry characteristics and resource utilization of strategically critical trace elements from coal-related resources[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(3): 1–38.
- [21] 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 Lei, WANG Xibo, DAI Shifeng. Lithium resources in coal-bearing strata: Occurrence, mineralization, and resource potential[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(5): 1750–1760.
- [22] FINKELMAN R B. Trace elements in coal[J]. Biological Trace Element Research, 1999, 67(3): 197–204.
- [23] DAI Shifeng, FINKELMAN R B, FRENCH D, et al. Modes of occurrence of elements in coal: A critical evaluation[J]. Earth-Science Reviews, 2021, 222: 103815.
- [24] QIN Shenjun, LU Qingfeng, LI Yanheng, et al. Relationships between trace elements and organic matter in coals[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2018, 188: 101–110.
- [25] PATEL M, KARAMALIDIS A K. Germanium: A review of its US demand, uses, resources, chemistry, and separation technologies[J]. Separation and Purification Technology, 2021, 275: 1–20.
- [26] JIU Bo, HUANG Wenhui, SPIRO B, et al. Distribution of Li, Ga, Nb, and REEs in coal as determined by LA-ICP-MS imaging: A case study from Jungar coalfield, Ordos Basin, China[J]. International Journal of Coal Geology, 2023, 267: 1–14.
- [27] 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: 253–289.
- [28] 黄文辉, 万欢, 杜刚, 等. 内蒙古自治区胜利煤田煤—锆矿床元素地球化学性质研究[J]. 地学前缘, 2008, 15(4): 56–64.  
HUANG Wenhui, WAN Huan, DU Gang, et al. Research on elemental geochemical characteristics of coal-Ge deposit in Shengli coalfield, Inner Mongolia, China[J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(4): 56–64.
- [29] WEI Qiang, CUI Chaonan, DAI Shifeng. Organic-association of Ge in the coal-hosted ore deposits: An experimental and theoretical approach[J]. Ore Geology Reviews, 2020, 117: 103291.

- [30] ESKENAZY G M. Aspects of the geochemistry of rare earth elements in coal: An experimental approach[J]. *International Journal of Coal Geology*, 1999, 38(3-4): 285-295.
- [31] 王文峰, 秦勇, 刘新花, 等. 内蒙古准格尔煤田煤中镓的分布赋存与富集成因[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 14(2): 181-196.  
WANG Wenfeng, QIN Yong, LIU Xinhua, et al. Distribution, occurrence and enrichment genesis of gallium in Zhungeer coalfield, Inner Mongolia[J]. *Science China Earth Sciences*, 2011, 14(2): 181-196.
- [32] SUN Yuzhuang, ZHAO Cunliang, LI Yanheng, et al. Li distribution and mode of occurrences in Li-bearing coal seam#6 from the Guanbanwusu Mine, Inner Mongolia, Northern China[J]. *Energy Exploration & Exploitation*, 2012, 30(1): 109-130.
- [33] 黄文辉, 久博, 李媛. 煤中稀土元素分布特征及其开发利用前景[J]. 煤炭学报, 2019, 44(1): 287-294.  
HUANG Wenhui, JIU Bo, LI Yuan. Distribution characteristics of rare earth elements in coal and its prospects on development and exploitation[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(1): 287-294.
- [34] ZHAO Lei, DAI Shifeng, NECHAEV V P, et al. Enrichment origin of critical elements (Li and rare earth elements) and a Mo-U-Se-Re assemblage in Pennsylvanian anthracite from the Jincheng Coalfield, southeastern Qinshui Basin, northern China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2019, 115: 103184.
- [35] LIU Zhifei, WEI Yingchun, NING Shuzheng, et al. The differences of element geochemical characteristics of the main coal seams in the Ningdong coalfield, Ordos Basin[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2019, 202: 77-91.
- [36] 魏迎春, 华芳辉, 何文博, 等. 峰峰矿区 2 号煤中微量元素富集特征差异性研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(4): 1473-1487.  
WEI Yingchun, HUA Fanghui, HE Wenbo, et al. Difference of trace elements characteristics of No. 2 coal in Fengfeng mining area[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(4): 1473-1487.
- [37] WEI Yingchun, HE Wenbo, QIN Guohong, et al. Lithium enrichment in the No. 21 Coal of the Hebi No. 6 Mine, Anhe Coalfield, Henan Province, China[J]. *Minerals*, 2020, 10: 521.
- [38] WEI Yingchun, HE Wenbo, QIN Guohong, et al. Mineralogy and geochemistry of the lower Cretaceous coals in the Junde Mine, Hegang Coalfield, Northeastern China[J]. *Energies*, 2022, 15: 5078.
- [39] 刘桂建, 彭子成, 杨萍玥, 等. 煤中微量元素富集的主要因素分析[J]. 煤田地质与勘探, 2001, 29(4): 1-4.  
LIU Guijian, PENG Zicheng, YANG Pingyue, et al. Main factors controlling concentration of trace element in coal[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2001, 29(4): 1-4.
- [40] 曹代勇, 魏迎春, 秦国红, 等. 煤系战略性金属元素富集成矿的构造控制[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(1): 66-85.  
CAO Daiyong, WEI Yingchun, QIN Guohong, et al. Tectonic control on enrichment and metallogenesis of strategic metal elements in coal measures[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2023, 51(1): 66-85.
- [41] SWAINE D J. The organic association of elements in coals[J]. *Org Geochem*, 1992, 18(3): 259-261.
- [42] 黄文辉, 孙磊, 马延英, 等. 内蒙古自治区胜利煤田镓矿地质及分布规律[J]. 煤炭学报, 2007, 32(11): 1147-1151.  
HUANG Wenhui, SUN Lei, MA Yanying, et al. Distribution and geological feature of the Coal-Ge deposit of Shengli coalfield in Inner Mongolia of China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2007, 32(11): 1147-1151.
- [43] DAI Shifeng, WANG Xibo, SEREDIN V V, et al. Petrology, mineralogy, and geochemistry of the Ge-rich coal from the Wulantuga Ge ore deposit, Inner Mongolia, China: New data and genetic implications[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2012, 105: 141.
- [44] 王婷灏, 黄文辉, 闫德宇, 等. 中国大型煤-锆矿床成矿模式研究进展: 以云南临沧和内蒙古乌兰图嘎煤-锆矿床为例[J]. 地学前缘, 2016, 23(3): 113-123.  
WANG Tinghao, HUANG Wenhui, YAN Deyu, et al. Progress of research on mineralization mode of large coal-Ge deposits in China: Coal-Ge deposit in Wulantuga of Inner Mongolia and Lincang of Yunnan[J]. *Geoscience Frontiers*, 2016, 23(3): 113-123.
- [45] DAI Shifeng, REN Deyi, CHOU Chenlin, et al. Mineralogy and geochemistry of the No.6 Coal (Pennsylvanian) in the Junger Coalfield, Ordos Basin, China[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2006, 66(4): 253-270.
- [46] SUN Yuzhuang, ZHAO Cunliang, QIN Shenjun, et al. Occurrence of some valuable elements in the unique 'high-aluminium coals' from the Jungar Coalfield, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2016, 72: 659-668.
- [47] QIN Guohong, CAO Daiyong, WEI Yingchun, et al. Geochemical characteristics of the Permian coals in the Junger-Hebaopian mining district, northeastern Ordos Basin, China: Key role of paleopeat-forming environments in Ga-Li-REY enrichment[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2020, 213: 106494.
- [48] SOKÓL K, ADRIAN A, FINCH A A, et al. Quantifying metasomatic high-field-strength and rare-earth element transport from alkaline magmas[J]. *Geology*, 2021, 50(3): 305-310.
- [49] DAI Shifeng, NECHAEV V P, CHEKRYZHOV I Y, et al. A model for Nb-Zr-REE-Ga enrichment in Lopingian altered alkaline volcanic ashes: Key evidence of H-O isotopes[J]. *Lithos*, 2018, 302-303: 359-369.
- [50] 刘晶晶, 韩秋婷, 赵书茂, 等. 贵州西部晚二叠世煤中关键金属异常富集的物质来源[J]. 煤炭学报, 2022, 47(5): 1782-1794.  
LIU Jingjing, HAN Qiuchan, ZHAO Shumao, et al. The sources of abnormally enriched critical metals in the Late Permian coals of Western Guizhou Province[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(5): 1782-1794.
- [51] 李宝庆, 庄新国, 宁树正, 等. 稀土-锆(铪)-铌(钽)-镓的活化、迁移和富集机理——以务正道地区上二叠统吴家坪组煤系为例[J]. 煤炭学报, 2022, 47(5): 1822-1839.  
LI Baoqing, ZHUANG Xinguo, NING Shuzheng, et al. Mobilization, migration, and enrichment mechanism of rare earth elements-Zr(Hf)-Nb(Ta)-Ga: A case study of coal-bearing strata within Upper Permian Wujiaping Formation in Wuzhengdao region[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(5): 1822-1839.
- [52] SHEN Minglian, DAI Shifeng, VICTOR P, et al. Provenance changes for mineral matter in the latest Permian coals from western Guizhou, southwestern China, relative to tectonic and volcanic activity in the Emeishan Large Igneous Province and Paleo-Tethys region[J]. *Gondwana Research*, 2023, 113: 71-88.
- [53] YANG Pan, DAI Shifeng, VICTOR P, et al. Modes of occurrence of critical metals (Nb-Ta-Zr-Hf-REY-Ga) in altered volcanic ashes in

- the Xuanwei Formation, eastern Yunnan Province, SW China: A quantitative evaluation based on sequential chemical extraction[J]. *Ore Geology Reviews*, 2023, 106: 105617.
- [54] 魏迎春, 李新, 曹代勇, 等. 我国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 Yingchun, LI Xin, CAO Daiyong, et al. Cooperative exploration methods of coal and strategic metal resources in coal-bearing strata in China[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(12): 27–41.
- [55] 张淑苓, 王淑英, 尹金双. 云南帮卖盆地含铀煤中锗存在形式的研究[J]. *中国核科技报告*, 1988: 93–104.  
ZHANG Shuling, WANG Shuying, YIN Jinshuang. A study on the forms of existence of germanium in uranium-bearing coals Bangmai basin of Yunnan[J]. *China Nuclear Science and Technology Report*, 1988: 93–104.
- [56] 林堃琦, 黄文辉, 汪远征, 等. 伊敏煤田五牧场区富锗煤分布规律及成矿机理分析[J]. *中国煤炭地质*, 2016, 28(2): 1–6.  
LIN Kunqi, HUANG Wenhui, WANG Yuanzheng, et al. Germanium-rich coal distribution pattern and metallogenic mechanism analysis in Wumuchang District, Yimin Coalfield[J]. *Coal Geology of China*, 2016, 28(2): 1–6.
- [57] ZHUANG Xinguo, XAVIER Querol, Andrés Alastuey, et al. Geochemistry and mineralogy of the Cretaceous Wulantuga high-germanium coal deposit in Shengli coal field, Inner Mongolia, Northeastern China[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2006, 66(1/2): 119–136.
- [58] 代世峰, 任德贻, 李生盛. 内蒙古准格尔超大型镓矿床的发现[J]. *科学通报*, 2006, 51(2): 177–185.  
DAI Shifeng, REN Deyi, LI Shengsheng. Discovery of super large gallium deposit in Junge, Inner Mongolia[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(2): 177–185.
- [59] ZHAO Lei, SUN Jihua, GUO Wenmu, et al. Mineralogy of the Pennsylvanian coal seam in the Datanhao Mine, Daqingshan Coalfield, Inner Mongolia, China: Genetic implications for mineral matter in coal deposited in an intermontane basin[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2016, 167: 201–114.
- [60] 宁树正, 吴国强, 邓小利, 等. 中国煤中金属元素矿产资源[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- [61] ZHAO Lei, WARD C R, FRENCH D, et al. Origin of a kaolinite- $\text{NH}_4$ -illite-pyrophyllite-chlorite assemblage in a marine-influenced anthracite and associated strata from the Jincheng Coalfield, Qinshui Basin, Northern China[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2018, 185: 61–78.
- [62] ZHANG Fuqiang, LI Baoqing, ZHUANG Xinguo, et al. Geological controls on enrichment of rare earth elements and yttrium (REY) in late Permian coals and non-coal rocks in the Xian'an Coalfield, Guangxi Province[J]. *Minerals*, 2021, 11: 301.
- [63] 杨仁超, 韩作振, 柳益群, 等. 鄂尔多斯盆地东胜地区侏罗系煤与铀矿关系[J]. *地球科学与环境学报*, 2006, 28(4): 31–37.  
YANG Renchao, HAN Zuozhen, LIU Yiqun, et al. Relationship between Jurassic coal measures and uranium deposits in Dongsheng area, Ordos basin[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2006, 28(4): 31–37.
- [64] 王军, 耿树方. 伊犁盆地库捷尔太铀矿床层间氧化带与铀矿化特征研究[J]. *中国地质*, 2009, 36(3): 705–713.  
WANG Jun, GENG Shufang. Characteristics of the interlayer oxidation zone and the Kujieertai uranium deposit in Yili Basin[J]. *Geology in China*, 2009, 36(3): 705–713.
- [65] 杨龙泉, 李必红, 赵丹, 等. 铀矿体上方均匀覆盖层中氡迁移的数值模拟[J]. *铀矿地质*, 2020, 36(5): 441–452.  
YANG Longquan, LI Bihong, ZHAO Dan, et al. Numerical simulation for radon migration in the homogeneous overburden layer above uranium ore body[J]. *Uranium Geology*, 2020, 36(5): 441–452.
- [66] WANG Peipei, YAN Xiaoyun, GUO Wenmu, et al. Geochemistry of trace elements in coals from the Yueliangtian Mine, Western Guizhou, China: Abundances, Modes of Occurrence, and Potential Industrial Utilization[J]. *Energy & Fuels*, 2016, 30(12): 10268–10281.
- [67] ZHAO Lixin, DAI Shifeng, GRAHAM I T, et al. New insights into the lowest Xuanwei Formation in eastern Yunnan Province, SW China: Implications for Emeishan large igneous province felsic tuff deposition and the cause of the end-Guadalupian mass extinction[J]. *Lithos*, 2016, 264: 375–391.
- [68] LUO Yangbing. Regional distribution of hazardous elements in late Permian Coal Southern Sichuan, China[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 868: 370–373.
- [69] DAI Shifeng, LUO Yangbing, SEREDIN V V, et al. Revisiting the late Permian coal from the Huayingshan, Sichuan, southwestern China: Enrichment and occurrence modes of minerals and trace elements[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2014, 122: 110–128.
- [70] 徐水师, 王佟, 孙升林, 等. 中国煤炭资源综合勘查技术新体系架构[J]. *中国煤炭地质*, 2009, 21(6): 1–5.  
XU Shushi, WANG Tong, SUN Shenglin, et al. New architecture of integrated coal resource exploration technology in China[J]. *Coal Geology of China*, 2009, 21(6): 1–5.
- [71] 宁树正, 曹代勇, 朱士飞, 等. 煤系矿产资源综合评价技术方法探讨[J]. *中国矿业*, 2019, 28(1): 73–79.  
NING Shuzheng, CAO Daiyong, ZHU Shifei, et al. Discussion on comprehensive evaluation technical method of coal resources[J]. *China Mining Magazine*, 2019, 28(1): 73–79.
- [72] 张路锁, 常明华. 河北平原区煤炭勘查中的多矿种兼探[J]. *中国煤炭地质*, 2014, 26(5): 14–17.  
ZHANG Lusuo, CHANG Minghua. Joint Exploration of multiple minerals in Hebei Plain coal exploration[J]. *Coal Geology of China*, 2014, 26(5): 14–17.
- [73] 段中会, 徐高中, 贺晓浪. 论煤铀兼探中综合勘查与评价技术的基本原则[J]. *中国煤炭地质*, 2015, 27(9): 1–4, 17.  
DUAN Zhonghui, XU Gaozhong, HE Xiaolang, et al. On basic principles in integrated coal exploration in company with uranium and evaluation technology[J]. *Coal Geology of China*, 2015, 27(9): 1–4, 17.
- [74] 易同生, 高为. 六盘水煤田上二叠统煤系气成藏特征及其共探共采方向[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(6): 1553–1564.  
YI Tongsheng, GAO Wei. Reservoir formation characteristics as well as co-exploration and co-mining orientation of Upper Permian coalbearing gas in Liupanshui Coalfield[J]. *Journal of China Coal*

- Society, 2018, 43(6): 1553–1564.
- [75] 曹代勇, 魏迎春, 李焕同, 等. 煤炭地质勘查与评价[M]. 2版. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2021.
- [76] 伍天洪, 王毅, 王传刚. 多种能源矿产的地球物理识别标志及其在协同勘探上的应用[J]. *中国地质*, 2007, 34(3): 486–489.
- WU Tianhong, WANG Yi, WANG Chuangang. Geophysical indicators of oil, natural gas, coals, sandstone uranium and their applications in co-exploration of multiple energy minerals[J]. *Geology in China*, 2007, 34(3): 486–489.
- [77] 杨伟利, 王毅, 王传刚, 等. 鄂尔多斯盆地多种能源矿产分布特征与协同勘探[J]. *地质学报*, 2010, 84(4): 579–586.
- YANG Weili, WANG Yi, WANG Chuangang, et al. Distribution and co-exploration of multiple energy minerals in Ordos Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2010, 84(4): 579–586.
- [78] 王毅, 杨伟利, 邓军, 等. 多种能源矿产同盆共存富集成矿(藏)体系与协同勘探——以鄂尔多斯盆地为例[J]. *地质学报*, 2014, 88(5): 815–824.
- WANG Yi, YANG Weili, DENG Jun, et al. Accumulation system of cohabitating multi-energy minerals and their comprehensive exploration in sedimentary Basin-A case study of Ordos Basin, NW China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2014, 88(5): 815–824.
- [79] 李增学, 王佟, 王怀洪, 等. 多能源矿产协同勘查理论与技术体系研究[J]. *中国煤炭地质*, 2011, 23(4): 68–72.
- LI Zengxue, WANG Tong, WANG Huaihong, et al. Theory and technical system study on multiple energy mineral resources exploration in coordination[J]. *Coal Geology of China*, 2011, 23(4): 68–72.
- [80] 李增学, 王东东, 吕大伟, 等. 煤系矿产类型及协同勘查研究进展: 兼论煤地质学一些概念的规范化问题[J]. *煤炭科学技术*, 2018, 46(4): 164–176.
- LI Zengxue, WANG Dongdong, LÜ Dawei, et al. Study progress on coal measure mineral type and coordinated exploration: discussion on conception standardized issues of coal geology[J]. *Coal Science and Technology*, 2018, 46(4): 164–176, 201.
- [81] 王怀洪, 张心彬, 王勇军. 黄河北巨厚覆盖区多矿种协同勘查理论与技术体系研究进展[J]. *中国煤炭地质*, 2020, 32(9): 150–154, 166.
- WANG Huaihong, ZHANG Xinbin, WANG Yongjun, et al. Progress in research on multi-mineral co-exploration theory and technology system in mega thick overburden area to the north of Yellow River[J]. *Coal Geology of China*, 2020, 32(9): 150–154, 166.
- [82] 韩效忠, 林中湘, 吴兆剑, 等. 中—新生代盆地煤铀协同勘查及对策建议[J]. *地质论评*, 2022, 68(3): 945–954.
- HAN Xiaozhong, LIN Zhongxiang, WU Zhaojian, et al. Co-exploration of coal and uranium and related policy suggestions[J]. *Geological Review*, 2022, 68(3): 945–954.
- [83] 黄旭钊, 范正国, 何敬梓, 等. 隐伏岩漿型铜镍矿空—地—井协同勘查技术体系[J]. *物探与化探*, 2022, 46(3): 597–607.
- HUANG Xuzhao, FAN Zhengguo, HE Jingzi, et al. A collaborative airborne, ground, and borehole exploration technology system for concealed magmatic copper-nickel deposits[J]. *Geophysical and Geochemical exploration*, 2022, 46(3): 597–607.
- [84] 孙杰, 程爱国, 刘亢, 等. 中国煤炭与煤层气协同勘查开发现状与发展趋势[J]. *中国地质*, 2023, 50(3): 730–742.
- SUN Jie, CHENG Aiguo, LIU Kang. The current situation and development trend of coordinated exploration and development of coal and coalbed methane in China[J]. *Geology in China*, 2023, 50(3): 730–742.
- [85] 王佟, 孙杰, 江涛, 等. 煤炭生态地质勘查基本构架与科学问题[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(1): 276–284.
- WANG Tong, SUN Jie, JIANG Tao, et al. Basic configuration and scientific problems of coal eco-geological survey[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(1): 276–284.
- [86] WANG Tong, SUN Jie, LIN Zhongyue, 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.
- [87] CAO Daiyong, LIN Zhongyue, WEI Yingchun, et al. Types and models of coal-deposit exploration in China[J]. *Energy Exploration & Exploitation*, 2011, 29(4): 495–515.
- [88] 魏迎春, 曹代勇, 孙雨晴, 等. 煤系矿产资源综合勘查模式研究[C]//中国地球物理学会. 首届全国矿产勘查大会论文集. 2021: 239–242.
- [89] 中华人民共和国国家标准. 矿产资源综合勘查评价规范: GB/T 25283—2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
- [90] CHEN Tongjun, SONG Xiong. Are coal-hosted gallium-rich ores elastically detectable: A rock-physics modeling perspective[J]. *Minerals*, 2022, 12: 1619.
- [91] 陈聪, 喻翔, 陈涛. 巴彦乌拉铀矿床氧化还原过渡带磁异常产生机理研究[J]. *地质论评*, 2017, 63(S1): 55–56.
- CHEN Cong, YU Xiang, CHEN Tao. Study on the mechanism of magnetic Anomaly in the redox transitional zone of Bayan Ula uranium deposit[J]. *Geological Review*, 2017, 63(S1): 55–56.
- [92] 《矿产资源工业要求手册》编委会. 矿产资源工业要求手册[M]. 北京: 地质出版社, 2010.
- [93] 孙玉壮, 赵存良, 李彦恒, 等. 煤中某些伴生金属元素的综合利用指标探讨[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(4): 744–748.
- SUN Yuzhuang, ZHAO Cunliang, LI Yanheng. Minimum mining grade of the selected trace elements in Chinese coal[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(4): 744–748.
- [94] 中华人民共和国国家标准. 煤中有价元素含量分级及应用导则: GB/T 41042—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.