



煤与煤系铀矿产协同勘查技术方法

魏迎春 张昀 李新 曹代勇 王安民 靳亮亮 宁树正

引用本文:

魏迎春, 张昀, 李新, 等. 煤与煤系铀矿产协同勘查技术方法[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(1): 216–224.

WEI Yingchun, ZHANG Yun, LI Xin. Cooperative exploration methods of coal and uranium deposits in coal-bearing strata[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(1): 216–224.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2024-1615>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

煤与煤系战略性金属矿产协同勘查技术方法

Cooperative exploration methods of coal and strategic metal resources in coal-bearing strata

煤炭科学技术. 2023, 51(12): 27–41 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1115>

准噶尔盆地中生代“下煤上铀”地层结构的沉积机理

Sedimentary mechanism analysis of “Lower Coal and Upper Uranium” strata structure in Junggar Basin, Northern China

煤炭科学技术. 2023, 51(12): 52–64 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0786>

深部矿井煤炭地热协同开采系统研究

Research on coal-geothermal collaborative exploration system in deep mines

煤炭科学技术. 2024, 52(3): 87–94 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0650>

煤与天然气协同开采理论与技术构想

Theoretical and technological concepts of synergistic coal and natural gas extraction

煤炭科学技术. 2024, 52(4): 50–68 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1720>

薄煤层智能开采工作面煤层透明化地质勘查技术

Transparent geological exploration technology of coal seam on the working surface of intelligent mining of thin coal seam

煤炭科学技术. 2022, 50(7): 67–74 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/4115181f-fba2-4a87-84d1-3cc2f05bb6ac>

地质构造隐蔽致灾因素透明化勘查技术

Transparent exploration technology for hidden disaster-causing factors of geological structure: taking Tunbao Coal Mine in Xinjiang as an example

煤炭科学技术. 2024, 52(9): 173–188 <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0559>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

魏迎春, 张 昀, 李 新, 等. 煤与煤系铀矿产协同勘查技术方法[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(1): 216–224.

WEI Yingchun, ZHANG Yun, LI Xin, *et al.* Cooperative exploration methods of coal and uranium deposits in coal-bearing strata[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(1): 216–224.

煤与煤系铀矿产协同勘查技术方法

魏迎春^{1,2}, 张 昀¹, 李 新¹, 曹代勇^{1,2}, 王安民¹, 靳亮亮¹, 宁树正³

(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; 3. 中国煤炭地质总局勘查研究总院, 北京 100039)

摘 要: 煤与煤系铀矿产协同勘查已成为矿产资源勘查的重要方向, 为提高找矿效率和节约勘查成本, 基于煤与煤系铀矿产的基本特征、勘查技术方法的有效性和勘查工程布置的经济性, 分析了煤与煤系铀矿产赋存的基本特征。研究表明: ① 分析了煤系铀矿产的基本特征, 煤系中煤层和铀矿产表现为下煤上铀(煤系砂岩型铀矿)或铀煤同层产出(煤型铀矿)的空间分布关系, 煤中铀主要的赋存方式为有机质整合或束缚, 砂岩中的铀主要的赋存方式为铀矿物、吸附铀和含铀矿物。② 基于煤系铀矿产勘查技术手段的有效性, 提出了煤炭勘查工作已完成区和煤与煤系铀矿产勘查新区2种情况下的煤与煤系铀矿产协同勘查技术手段: 在煤炭勘查工作已完成区, 充分利用煤炭勘查资料, 筛选自然伽马测井曲线高异常层段和区域, 利用 γ 能谱测井验证煤系铀矿化信息, 圈定煤系铀矿的普查区, 按照煤系铀矿勘查技术手段分阶段选择相应的技术手段; 在煤与煤系铀矿产勘查新区, 煤与煤系铀矿产协同勘查技术手段在煤炭勘查技术手段的基础上, 增加对煤系铀矿有效响应的放射性技术手段(γ 能谱测井、氡及其子体测量)、岩心编录、穿透性地球化学等技术手段。③ 探讨了煤与煤系铀矿产协同勘查工程布置, 按照煤、铀矿勘查规范, 遵循“协同设计、协同部署、协同施工”的原则, 分2种情况开展煤与煤系铀矿产的协同勘查布置: 在煤炭勘查工作已完成区, 筛选自然伽马测井曲线高异常层段和区域部署施工验证孔, 圈定煤系铀矿的普查区, 按照煤系铀矿勘查规范分阶段进行勘查工程布置; 在煤与煤系铀矿产勘查新区, 开展煤与煤系铀矿协同勘查, 首先在整个勘查区内寻找煤炭资源, 布置煤炭勘查工程, 在自然伽马测井曲线高异常层段和区域圈出煤系铀矿靶区, 在煤系铀矿靶区以寻找煤系铀矿为主, 开展煤系铀矿勘查工程实施。④ 基于协同勘查技术手段的有效性和协同勘查成本的经济性, 从煤与煤系铀矿产的协同勘查技术手段和协同勘查工程布置方面构建了煤与煤系铀矿产协同勘查模型, 为煤与煤系铀矿产协同勘查工作提供理论基础和方法依据。

关键词: 煤; 煤系铀矿产; 协同勘查技术; 协同勘查工程; 协同勘查模型

中图分类号: P618

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2025)01-0216-09

Cooperative exploration methods of coal and uranium deposits in coal-bearing strata

WEI Yingchun^{1,2}, ZHANG Yun¹, LI Xin¹, CAO Daiyong^{1,2}, WANG Anmin¹, JIN Liangliang¹, NING Shuzheng³

(1. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory for Fine Exploration and Intelligent Development of Coal Resources, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 3. General Prospecting Institute of China National Administration of Coal Geology, Beijing 100039, China)

Abstract: The cooperative exploration of coal and uranium deposits in coal-bearing strata has become a significant direction in the research for mineral resources, in order to improve the exploration efficiency, and save the exploration cost, the basic characteristics of coal

收稿日期: 2024-11-07

策划编辑: 朱恩光

责任编辑: 钱小静

DOI: 10.12438/cst.2024-1615

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, 42472231)

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

通讯作者: 李 新(1997—), 女, 河南开封人, 博士研究生。E-mail: 15226103275@163.com

and uranium deposits in coal-bearing strata production and occurrence are analyzed, the selection of technical means and the layout of cooperative exploration are discussed, and the cooperative exploration model of coal and uranium deposits in coal-bearing strata is constructed. The research indicates that: ① The basic characteristics of uranium deposits in coal-bearing strata are analyzed, in coal-bearing strata, the spatial distribution of coal seams and uranium deposits is characterized by uranium deposits overlying coal seams (sandstone-type uranium deposits in coal-bearing strata) or alternating coal and uranium deposits (coal-rock type uranium deposits). The primary form of uranium occurrence in coal is through organic chelation or binding, whereas in sandstone, uranium mainly exists as uranium minerals, adsorbed uranium, or uranium-containing minerals. ② According to the effectiveness of coal-bearing strata uranium deposits exploration technology means, coal and uranium deposits in coal-bearing strata exploration technology means can be divided into two situations. In the completed coal exploration area, utilize the coal exploration data effectively to identify high-anomaly strata and regions based on the natural gamma logging curve, verify the uranium mineralization information of the coal measures using γ energy spectrum logging, delineate the survey area for coal measures uranium deposits, and select appropriate technical methods in phases in accordance with the technical requirements for coal measures uranium exploration. In the new area of coal and uranium deposits in coal-bearing strata exploration, the cooperative exploration technology of coal and uranium deposits in coal-bearing strata has added the effective response of radioactive technology (γ -energy spectrum logging, radon and its daughter measurement), core cataloging, penetrating geochemistry and other technical methods. ③ The layout of cooperative exploration of coal and uranium deposits in coal-bearing strata is discussed, in accordance with the standards of coal and uranium deposits in coal-bearing strata exploration and the principle of “cooperative design, cooperative deployment and cooperative construction”, the cooperative exploration of coal and uranium deposits is carried out in two situations. In the area where the coal exploration work has been completed, the high abnormal strata of natural gamma logging curves and the regional deployment of construction verification holes are selected, the survey areas of coal measure uranium deposits are delineated, and the exploration engineering is arranged in stages according to the coal measure uranium exploration standard. In the new exploration area of coal and uranium deposits in coal-bearing strata, cooperative exploration of coal and coal-bearing uranium deposits should be carried out. First, coal resources should be sought in the whole exploration area, coal exploration engineering should be arranged, and coal bearing uranium targets should be delineated in the high abnormal intervals and regions of natural gamma logging curves. Secondly, in the target area of uranium deposits in coal-bearing strata, the exploration project of uranium deposits in coal-bearing strata is mainly carried out to find uranium deposits in coal-bearing strata. ④ Based on the effectiveness of cooperative exploration technical means and the economy of cooperative exploration cost, a cooperative exploration model of coal and uranium deposits in coal-bearing strata is constructed from the aspects of cooperative exploration technical means and cooperative exploration engineering layout, which provides theoretical and methodological basis for cooperative exploration of coal and coal-measure uranium ore production.

Key words: coal; uranium deposits in coal-bearing strata; cooperative exploration techniques; cooperative exploration engineering; cooperative exploration model

0 引 言

铀矿产是支撑国家社会经济发展和能源安全的重要战略资源,在能源、医疗、科研、工业以及国防领域中发挥关键作用^[1-3]。由于铀矿产在自然界的稀缺性和不均匀性,面临较高的供应受限风险,积极寻找和开发铀矿资源对维护国家资源安全具有重要意义^[3]。煤系作为一种含有煤层的特殊沉积岩系,其煤层具有还原性和吸附性,在特定地质和地球化学条件下可富集成煤系铀矿产,在规模上可形成大型或超大型铀矿产^[2-3],因此,煤系铀矿产已成为铀矿产资源勘查的重要方向。

我国铀矿产赋存特征及成矿模式复杂,在我国北方中生代聚煤盆地中发现了大量煤系铀矿,盆地内铀矿床或铀矿化现象一般处于盆地边缘地带^[4]。煤系铀矿与含煤地层关系密切,在空间分布上有一

定的内在联系,煤系地层和铀矿层表现为下煤上铀和铀煤同层产出的空间叠置关系^[5-6],煤炭和铀矿赋存在同一盆地或盆地内同一地区,常常由不同的行业勘查单位各自独立进行勘探工作,多种能源矿产信息无法共享,大大增加勘查开发和研究经费。随着对煤系铀矿产富集成矿的研究,煤层与铀矿产在成因和空间的分布模式为煤、铀综合勘查和综合评价提供可能,煤与煤系铀矿产协同勘查可以有效的降低勘查投资,缩短找矿周期,提高勘查效率。近年来,针对多能源矿产(如煤炭、石油和铀矿等)开展了技术手段的协同勘探研究^[7-8],建立了多能源矿产的协同勘查模式^[9-10],提出了煤与煤系战略性金属矿产的技术方法体系框架^[11-12],基于不同勘查区资料分析,初步建立了煤与煤系不同战略性金属矿产的协同勘查模型^[13-16]。“煤铀兼探”战略理念源于2007—2012年中央地勘基金在鄂尔多斯盆地6个区

域进行的煤炭资源勘查^[17-18]。大营铀矿勘查取得重大突破,并提出了铀矿找矿突破的新模板:“大营范式”^[19],目前已经在鄂尔多斯盆地、松辽盆地、川北、滇西等地有了初步应用^[19-21]。

煤铀兼探,特别是“大营范式”为煤与煤系铀矿产协同勘查模型的建立奠定了基础。笔者分析了煤与煤系铀矿床的赋存特征,探讨了煤与煤系铀矿产协同勘查技术手段选择和协同勘查工程布置,构建了煤与煤系铀矿产协同勘查模型,为煤与煤系铀矿产协同勘查工作提供理论基础和方法依据。

1 煤与煤系铀矿产的基本特征

根据铀元素的赋存特征将煤系铀矿分为煤型铀矿和煤系砂岩型铀矿。煤型铀矿床中的铀赋存于煤层内,且载体煤储层以低阶褐煤和长焰煤为主^[22-23];煤系砂岩型铀矿与含煤地层关系密切,在空间分布上有一定的内在联系,煤层和铀矿层通常表现为下煤上铀的空间叠置关系^[5-6],煤与煤系铀矿产的空间赋存关系为煤与煤系铀矿产的协同勘查提供了科学依据。我国煤型铀主要赋存于石炭-二叠纪、新生代及侏罗纪煤系中^[22],煤型铀矿床主要包括新疆伊犁盆地洪海沟铀矿^[24]、达拉地铀矿床^[25]、塔里木盆地萨瓦布其铀矿床^[26]等。我国大部分煤系砂岩铀矿主

要分布在北方中生代沉积盆地内^[27-29],典型的煤系砂岩型铀矿包括鄂尔多斯盆地的大营铀矿床^[30]、皂火壕铀矿^[31]及纳岭沟铀矿床^[31],松辽盆地内的钱家店铀矿床^[30]等。煤中铀主要的赋存方式为有机质螯合或束缚^[29],部分铀以类质同象形式赋存于矿物晶格中以及被黏土矿物吸附^[19],少部分以铀矿物或含铀矿物的形式存在^[32-33]。砂岩中的铀主要的赋存方式为铀矿物、吸附铀和含铀矿物^[34]。

2 煤与煤系铀矿产勘查技术方法

2.1 煤炭勘查技术方法

煤炭地质勘查通常划分为普查、详查、勘探阶段,不同阶段的勘查任务与要求不同,其采用的技术手段也不尽相同(图 1)。依据研究区地形、地质和地物条件,按照 DZ/T 0215-2020《矿产地质勘查规范 煤》,选择合适技术手段以满足不同勘查阶段的需求。遥感技术通常应用于普查阶段,在此阶段地质填图(1:50 000~1:25 000)精度较低且通常使用二维地震勘探技术;详查阶段地质填图精度提升至 1:25 000~1:10 000,依据地质条件采用二维/三维地震勘探技术;勘探阶段地质填图精度提升至 1:10 000 或 1:5 000,主要采用三维地震勘探技术。

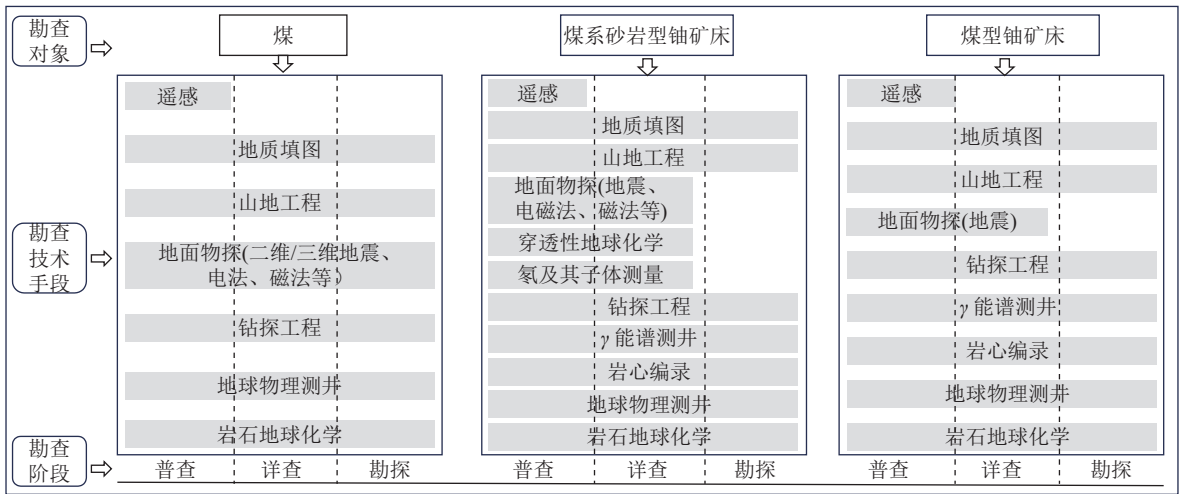


图 1 煤和煤系铀矿勘查技术手段

Fig.1 Exploration techniques for coal and coal-bearing uranium deposits

2.2 煤系铀矿勘查技术方法

2.2.1 煤系铀矿勘查技术方法响应原理及特征

煤系铀矿有效响应的勘查技术手段(电磁法勘探、高精度磁法勘探、地震勘探、γ测井、氡及其子体测量及穿透性地球化学等)主要用来识别成矿地质环境信息和矿化信息,不同的技术方法各有其特

定的响应原理和特征。

电磁法:电磁测深技术通过测量地层的电性特征粗略划分砂、泥岩结构,划分出不同时代的地层,从而推断解译目标层的埋藏深度及厚度变化^[35-36]。砂体是煤系砂岩型铀矿赋存的主要空间,是砂岩铀矿成矿的必要条件,砂体的快速识别及空间定位技

术对于预测砂岩型铀矿成矿有利远景区段和指导钻探生产具有重要作用。

高精度磁法:煤系砂岩型铀矿在形成中含氧含铀水迁移会发生氧化还原反应,铀在氧化还原界面周围沉淀,岩石中磁性矿物含量改变形成磁性差异^[37-39]。层间氧化带砂岩型铀矿通常位于氧化-还原过渡带内,通过磁场异常的测量和分析,能够快速识别并定位氧化还原过渡带的位置及大体分布范围。

地震勘探技术:基于声波在地层中传播的特性,利用人工激发的地震波通过地下岩层时发生反射、折射和散射的原理查明成矿环境,推断解释断裂构造发育、划分地层界限、目标层埋藏深度及厚度变化等,为铀矿的成矿环境分析提供初步地质信息。通过引入岩石属性反演技术^[40-41],实现了精细划分砂泥岩结构,揭示了岩石的密度、孔隙度、渗透性等关键属性,从而有效识别最有利于成矿的砂体位置。地震勘探与岩石属性反演技术的综合应用为成矿远景预测和铀矿靶区的筛选提供了重要依据。

γ 测井:通过钻孔对地下岩层的物理和化学性质进行测量和分析,对不同的物性曲线进行综合解释,由于煤系铀矿具有高放射性,在测井曲线上表现为高值异常。 γ 测井反映地层中放射性核素的总含量,通过 γ 测井测定镭-氡放射性平衡系数,查明铀矿层的起止深度、品位和厚度^[42-45]。地层中的放射性核素为钍系、铀系和锕铀系,在研究地层中的自然伽马能谱主要是 ^{238}U 、 ^{232}Th 、 ^{40}K 放射的 γ 射线能谱,在自然伽马能谱测井中通常选用铀系中的 ^{214}Bi 发射的1.76 MeV的伽马射线来识别铀,对铀的矿化信息进行提取^[45]。

氡及其子体测量:氡(^{222}Rn)是铀(^{238}U)的第6代衰变子体,通过检测氡及其衰变产物释放的 α 、 β 或 γ 射线确定氡的浓度或辐射强度,从而追溯到其母体 ^{238}U 的存在信息^[46]。氡及其子体测量在砂岩型铀矿勘查中用于追踪铀矿体的位置、空间分布和富集状态,铀矿体可能位于高氡浓度异常的侧翼或外围低值区,因此氡浓度找矿标志通常包括高氡异常区及外围的低值异常区,特别是关注2个高值异常区间的低值区(两高夹一低)^[46-47]。

穿透性地球化学:探测被覆盖的隐伏砂体,通过研究成矿元素(如铀)或伴生元素(如镭、钍、氡等)的垂直迁移和分散模式,可以从覆盖层中提取出矿化体的异常信息^[48-49]。

2.2.2 煤系铀矿勘查技术方法

煤系砂岩型铀矿和煤岩型铀矿由于成矿环境和

矿体赋存状态的差异,勘查的侧重点不同。因此,其所使用的技术手段也各有区别。煤系砂岩型铀矿强调对砂岩层的识别和分析,侧重于研究沉积环境和构造背景,煤岩型铀矿重点分析煤层分布范围和成煤环境,关注煤的形成和演化过程中对铀矿化的影响。

1) 煤系砂岩型铀矿

普查阶段:收集各类地质资料,利用高分辨率遥感技术,定位地质构造、矿化带及潜在铀矿区域,开展1:25 000~1:10 000的地质填图,进行一定的钻探工程控制,对钻孔进行 γ 测井、地球物理测井、岩矿心物探编录及矿心取样分析,根据需要选择有效的地面物探(电磁法、高精度磁法及地震勘探等)、氡及其子体测量、穿透性地球化学及岩石地球化学等勘探技术,初步进行勘查类型划分,圈出铀矿详查范围。

详查阶段:通过多源遥感数据结合地质资料,分析地质构造、断层等地质特征,开展1:10 000~1:5 000比例尺地质填图,系统进行钻探工程布置,对钻探工程开展岩心物探编录、 γ 测井和地球物理测井,开展适当的地面物探(电磁法、高精度磁法及地震)、岩石地球化学勘探等技术,圈出勘探区范围,为勘探提供依据。

勘探阶段:将遥感数据与地面勘查数据进行整合,开展1:5 000地质填图,在圈出的勘探区范围内按照勘查类型系统加密钻探工程,系统开展岩心物探编录、 γ 测井、地球物理测井及岩石地球化学勘探等技术,准确确定铀矿体的空间位置、品位及厚度。

2) 煤岩型铀矿

普查阶段:在普查区利用高分辨率遥感技术,开展1:25 000~1:5 000铀矿地质填图,地面物探(地震)、氡及其子体测量、穿透性地球化学及岩石地球化学等技术手段,进行系统的槽、井探工程揭露,并开展稀疏钻探工程揭露,通过 γ 测井和地球物理测井、岩心物探编录及岩心取样分析测试等工作,对已知矿化区做出初步评价,圈出详查范围。

详查阶段:在详查区通过多源遥感数据结合地质资料,开展1:5 000~1:2 000的铀矿地质填图,对详查区进行系统钻探工程,通过地面物探(地震)、 γ 测井、地球物理测井、岩心物探编录及岩石地球化学等工作,准确测定铀矿体品位、厚度及空间位置等。

勘探阶段:遥感技术提供多维度数据支持,在圈出勘探区范围内进行1:2 000~1:1 000铀矿地质填图,采用系统的钻探、坑探工程,对矿体进行加密控

制和取样分析测试,通过 γ 测井和地球物理测井、岩心物探编录及岩石地球化学等工作,详细查明矿床开采技术条件,进行预可行性研究或可行性研究(图 1)。

3 煤与煤系铀矿产勘查工程布置

3.1 煤炭勘查工程布置

在煤炭勘查工程的布置中,按照 DZ/T 0215—2020《矿产地质勘查规范 煤》中规定的勘查类型确定勘查区钻探工程的基本线距(控制资源量线距)(表 1)。勘查类型依据构造复杂程度(类)和煤层稳定程度(型)划分为四“类”和Ⅳ“型”。其中,四类(极复杂

构造)或Ⅳ型(极不稳定煤层)的勘查区线距不作具体规定。

3.2 煤系铀矿勘查工程布置

煤系铀矿勘查工程布置根据煤系铀矿产的矿体地质特征和开采技术条件,煤系砂岩型铀矿与煤型铀矿的勘查工程布置要求不同。煤系砂岩型铀矿勘查工程的布置一般按照 EJ/T 1157—2018《地浸砂岩型铀矿地质勘查规范》,煤型铀矿勘查工程的布置一般按照 DZ/T 0199—2015《铀矿地质勘查规范》。煤系铀矿产勘查类型主要依据 5 个地质因素综合划分 3 种勘查类型,根据勘查类型确定勘查区钻探工程的基本线距(控制资源量线距)(表 1)。

表 1 煤和煤系铀矿床勘查工程间距(控制资源量线距)

Table 1 Spacing of exploration projects for coal and coal-bearing uranium deposits (Indicated resources line spacing)									m
煤					煤系铀矿床				
勘查类型	I	II	III		勘查类型	煤系砂岩型铀矿床		煤型铀矿床	
			全区及大部分可采煤层	局部可采煤层		走向	倾向	走向	倾向
一	1 000 ~ 2 000	500 ~ 1 000			I	800 ~ 400	200 ~ 100	100 ~ 200	100 ~ 200
二	500 ~ 1 000	500 ~ 1 000	375	250	II	200	100 ~ 50	100	100
三	250 ~ 500	250 ~ 500			III	200	50 ~ 25	50 ~ 100	50 ~ 100

4 煤与煤系铀矿产协同勘查模型

基于前人对煤系铀矿产赋存特征和成矿模式的研究^[21-29],煤与煤系铀矿在成因和时空分布上存在密切联系,煤层与铀矿层存在资源的共存性。赋存在同一盆地或盆地内同一地区的煤、铀矿产在实际勘查中常常由不同的行业勘查单位各自独立勘探,煤、铀矿产信息无法共享,大大增加了勘查开发和研究经费。因此,为了减少重复勘查、提高勘查效率、缩短找矿周期,亟需建立煤与煤系铀矿产协同勘查模型,整合煤与煤系铀矿产有效的协同勘查技术手段及部署合理的协同勘查工程布置方案。

4.1 协同勘查技术手段

基于煤与煤系铀矿产的基本特征及煤系铀矿产勘查技术手段的有效性,煤与煤系铀矿产协同勘查技术手段的选择在煤炭勘查技术手段的基础上,增加对煤系铀矿有效响应的放射性技术手段(γ 能谱测井、 α 及其子体测量)、岩心编录及穿透性地球化学等技术手段。

煤与煤系铀矿产协同勘查通常分 2 种情况进行,其对应的协同勘查技术手段有所不同。① 煤炭勘查工作已完成区,煤与煤系铀矿产协同勘查技术手段

是在前期煤炭勘查工作的基础上选择与实施的,在前期煤炭勘查工作已经实施的勘查技术手段满足铀矿勘查需要的地质信息的前提下,铀矿勘查可减少相关勘查技术手段的使用。协同勘查技术手段选择的核心在于充分利用煤炭勘查钻孔测井资料,筛分出自然伽马测井曲线高异常层段和区域,利用 γ 能谱测井验证煤系铀矿化信息,圈定煤系铀矿的普查区,然后按照煤系铀矿勘查技术手段分阶段选择相应的技术手段,所收集的相关数据资料重点在于煤炭勘查的钻孔物探测井资料以识别铀矿化异常区段。② 煤与煤系铀矿产勘查新区,煤与煤系铀矿产同时开展勘查,所收集数据资料是煤炭勘查需要的基础地质资料。在整个勘查区内按照煤炭勘查工程的施工要求(普查阶段),采用遥感、地质填图、地面物探、钻探工程、测井和岩石地球化学等技术手段进行勘查,寻找煤炭资源,然后筛分出钻孔自然伽马测井曲线高异常层段和区域,在高异常区利用煤炭勘查钻孔和岩心利用放射性测井和编录验证铀矿化信息,圈出煤系铀矿靶区,在煤系铀矿靶区以寻找煤系铀矿为主,增加穿透性地球化学、 α 及其子体测量、 γ 能谱测井及岩心编录等技术手段。

基于煤与煤系铀矿产的赋存特征,煤型铀矿和

煤系砂岩型铀矿协同勘查技术的差异在于勘查重点不同。煤型铀矿产煤与铀同体共生,且具有煤与铀同层产出的特征,实施煤型铀矿协同勘查技术手段的核心在于精细圈定铀矿体,地面物探选择地震勘探技术划分地层界线,控制构造发育情况。煤与煤型铀矿一般采用遥感、地质填图、地震、钻探、放射性技术手段(γ 能谱测井)、岩心编录、地球物理测井及岩石地球化学勘探等技术手段。煤系砂岩型铀矿,在聚煤盆地中煤系砂岩型铀矿一般都位于煤层上部,呈下煤上铀特征,实施煤系砂岩型铀矿协同勘查技术手段的核心在于寻找有利成矿砂体,煤与煤系砂岩型铀矿协同技术手段一般采用遥感、地质填图、地面物探(地震、电磁法、高精度磁法等)、穿透性地球化学、钻探、放射性技术手段(γ 能谱测井、氡及其子体测量)、岩心编录、地球物理测井及岩石地球化学勘探等技术手段。

4.2 协同勘查工程布置

按照煤、铀矿产勘查规范,遵循“协同设计、协同部署、协同施工”的原则,分2种情况开展煤与煤系铀矿产的协同勘查布置。①煤炭勘查工作已完成区,在自然伽马测井曲线高异常层段和区域,部署施工验证孔,圈定煤系铀矿的普查区,然后按照煤系铀矿勘查规范分阶段进行勘查工程布置。针对煤系铀矿赋存特征,煤系砂岩型铀矿钻探工程终孔层位以控制铀矿成矿砂岩层底界,煤型铀矿钻探工程终孔层位应在煤层下15~20 m。②煤与煤系铀矿产勘查新区,开展煤与煤系铀矿产协同勘查(普查阶段),协同勘查工程布置分2步开展。第1,在整个勘查区内寻找煤炭资源,布置煤炭勘查工程,在自然伽马测井曲线高异常层段和区域圈出煤系铀矿靶区。第2,在煤系铀矿靶区以寻找煤系铀矿为主,按照勘查规范实施煤系铀矿勘查工程布置。根据煤系铀含量水平不同协同勘查工程的布置不同,铀含量低于工业品位且高于评价参考指标/边界品位时,在煤炭勘查工程布置的基础上,适当加密煤系铀矿产的勘查工程布置;铀含量高于工业品位且达到中型规模以上,按照铀矿产勘查规范实施煤系铀矿产的勘查工程布置。

基于煤与煤系铀矿产的赋存特征,煤与煤系铀矿产协同勘查技术手段选择的重点在于依据煤与煤系铀矿产的物化特征,在煤炭勘查技术手段的基础上,根据煤系铀矿产的分布特征增加对煤系铀矿产有效响应的技术手段。煤与煤系铀矿产的协同勘查工程布置按照煤、铀矿产勘查规范,合理布置协

同勘查工程,以实现最佳的经济效益和地质效果。根据煤与煤系铀矿产协同勘查的2种情况,从煤与煤系铀矿产有效的协同勘查技术手段和合理的协同勘查工程布置方面,构建了煤与煤系铀矿产协同勘查模型(图2)。煤与煤系铀矿产协同勘查模型包括2个方面的协同,一是煤炭与煤系铀矿2个矿种之间的协同,二是不同勘查技术手段与工程布置之间的协同,煤与煤系铀矿产协同勘查模型的建立不仅能够整合与优化资源和提高勘查效率,而且为实现矿产资源的综合勘查开发提供了理论基础和方法依据。

5 结 论

1)煤层和煤系铀矿产下煤上铀或铀煤同层产出的空间分布关系为煤与煤系铀矿产协同勘查提供了科学依据,决定了煤与煤系铀矿产协同勘查是一种理论有据和经济合理协同勘查策略。

2)基于煤系铀矿产勘查技术手段的有效性,煤与煤系铀矿产协同勘查技术手段选择分2种情况,在煤炭勘查工作已完成区,充分利用煤炭勘查资料,筛分出自然伽马测井曲线高异常层段和区域,圈定煤系铀矿的普查区,按照煤系铀矿勘查技术手段分阶段选择相应的技术手段;在煤与煤系铀矿产勘查新区,煤与煤系铀矿产协同勘查技术手段在煤炭勘查技术手段的基础上,跟据煤系铀矿产的分布特征增加对煤系铀矿有效响应的放射性技术手段(γ 能谱测井、氡及其子体测量)、岩心编录及穿透性地球化学等技术手段。

3)煤与煤系铀矿协同勘查工程布置按照煤、铀矿勘查规范,遵循“协同设计、协同部署、协同施工”的原则,分2种情况开展煤与煤系铀矿产的协同勘查布置,在煤炭勘查工作已完成区,在自然伽马测井曲线高异常层段和区域,部署施工验证孔,圈定煤系铀矿的普查区,然后按照煤系铀矿勘查规范分阶段进行勘查工程布置;在煤与煤系铀矿产勘查新区,开展煤与煤系铀矿协同勘查,在勘查区布置煤炭勘查工程寻找煤炭资源,筛选自然伽马测井曲线高异常层段和区域圈出煤系铀矿靶区,在煤系铀矿靶区以寻找煤系铀矿为主,开展煤系铀矿勘查工程实施。

4)基于煤与煤系铀矿产有效的协同勘查技术手段和合理的协同勘查工程布置方面,构建了煤与煤系铀矿产协同勘查模型,为煤与煤系铀矿产协同勘查工作提供理论基础和方法依据。

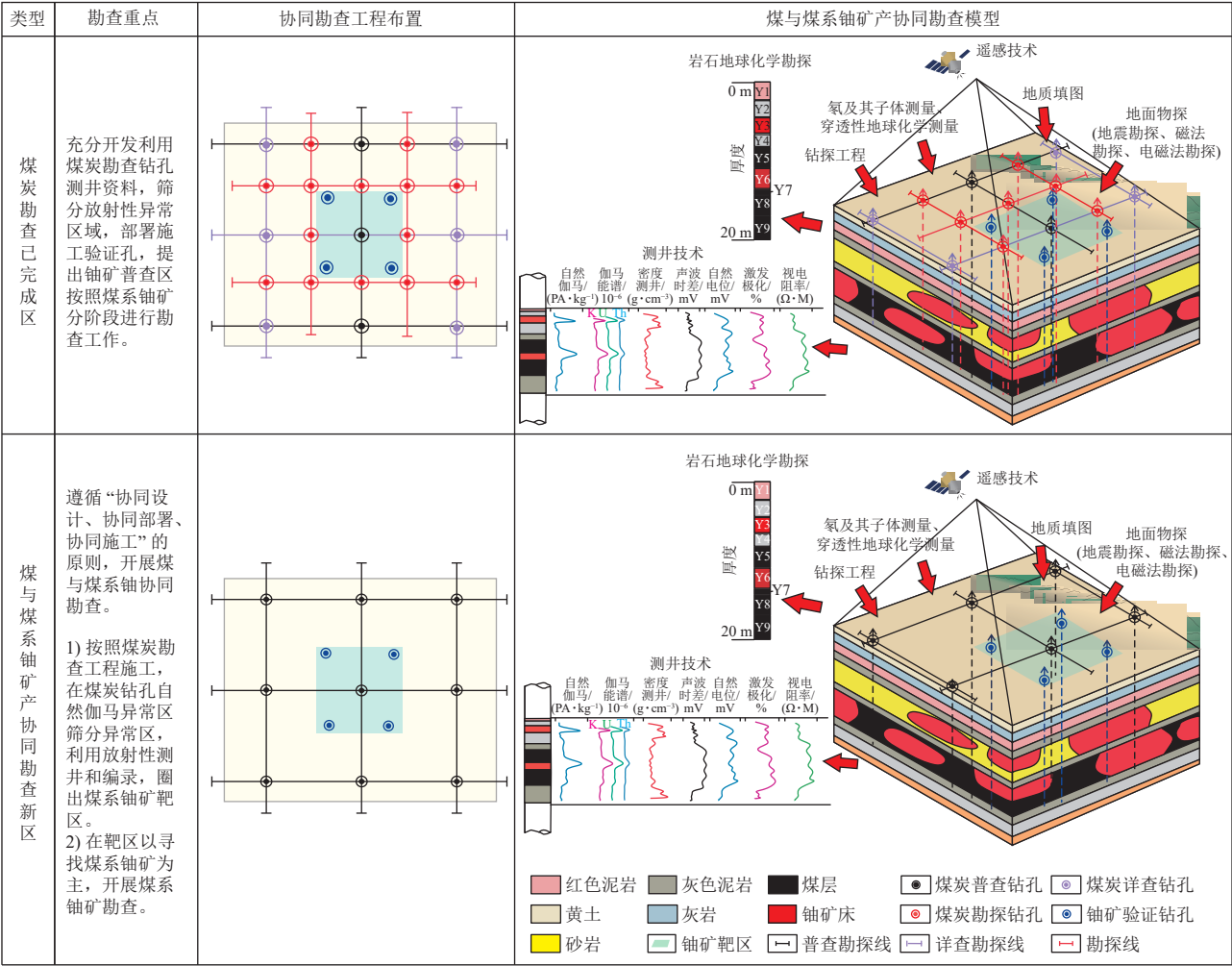


图 2 煤与煤系铀矿产协同勘查模型
Fig.2 Cooperative exploration model of coal and uranium deposits in coal-bearing strata

参考文献(References):

[1] 王大钊,冷成彪,秦朝建,等. 铀的地球化学性质与成矿作用[J]. 大地构造与成矿学, 2022, 46(2): 282-302.
WANG Dazhao, LENG Chengbiao, QIN Chaojian, et al. Geochemical characteristics and mineralization of uranium[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2022, 46(2): 282-302.

[2] SEREDIN V V, DAI S F, SUN Y Z, et al. Coal deposits as promising sources of rare metals for alternative power and energy-efficient technologies[J]. Applied Geochemistry, 2013, 31: 1-11.

[3] 代世峰,赵蕾,王宁,等. 煤系中关键金属元素的成矿作用研究进展与展望[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2024, 43(1): 49-63, 5.
DAI Shifeng, ZHAO Lei, WANG Ning, et al. Advance and prospect of researches on the mineralization of critical elements in coal-bearing sequences[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2024, 43(1): 49-63, 5.

[4] CHENG Y H, WANG S Y, JIN R S, et al. Global Miocene tectonics and regional sandstone-style uranium mineralization[J]. Ore Geology Reviews, 2019, 106: 238-250.

[5] 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 Zhaojian, HAN Xiaozhong, LI Zinan, 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.

[6] 金若时,程银行,李建国,等. 中国北方晚中生代陆相盆地红-黑岩系耦合产出对砂岩型铀矿成矿环境的制约[J]. 中国地质, 2017, 44(2): 205-223.
JIN Ruoshi, CHENG Yinhang, LI Jianguo, et al. Late Mesozoic continental basin “Red and Black beds” coupling formation constraints on the sandstone uranium mineralization in Northern China[J]. Geology in China, 2017, 44(2): 205-223.

[7] 王佟,刘峰,赵欣,等. “双碳”背景下我国煤炭资源保障能力与勘查方向的思考[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(12): 1-8.
WANG Tong, LIU Feng, ZHAO Xin, et al. Reflection on China’s coal resource guarantee capacity and exploration work under the background of “double carbon” [J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(12): 1-8.

[8] 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.

[9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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 Yingchun, LI Xin, CAO Daiyong, 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.
- [13] 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 Yingchun, LI Xin, CAO Daiyong, et al. Cooperative exploration model of coal and strategic metal resources in coal-bearing strata[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2024, 98(8): 2517–2530.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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. 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.
- [18] 伍皓, 周恩恩, 陈小伟, 等. “煤铀兼探”验证孔部署优化建议[J]. 四川地质学报, 2017, 37(3): 525–528.
- WU Hao, ZHOU Kenken, CHEN Xiaowei, et al. Some suggestions on optimization of deployment of verifying holes for coal-uranium exploration[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 2017, 37(3): 525–528.
- [19] 伍皓, 江新胜, 余谦, 等. “煤铀兼探”找矿新思路在云南的初次应用——以滇西户撒盆地铀矿勘探为例[J]. 沉积与特提斯地质, 2016, 36(4): 106–110.
- WU Hao, JIANG Xinsheng, YU Qian, et al. Coal-uranium exploration in the Husa basin, Western Yunnan: A new approach[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2016, 36(4): 106–110.
- [20] 胡航. 煤田资料在松辽盆地绍根地区铀矿勘查中的二次应用及找矿远景预测[J]. 中国煤炭地质, 2024, 36(7): 18–24.
- HU Hang. Secondary development of coalfield data for uranium exploration and exploration prospect in Shaogen area of Songliao Basin[J]. *Coal Geology of China*, 2024, 36(7): 18–24.
- [21] 宋焕霞, 赵世煌, 赵桂军, 等. 大营铀矿勘查中实物地质资料的开发利用——找矿思维的转变与创新[J]. 地质通报, 2016, 35(11): 1895–1899.
- SONG Huanxia, ZHAO Shihuang, ZHAO Guijun, et al. Second-round development and utilization of the geological samples in the prospecting for Daying uranium deposit: Change and innovation of prospecting thinking[J]. *Geological Bulletin of China*, 2016, 35(11): 1895–1899.
- [22] 王文峰, 王文龙, 刘双双, 等. 煤中铀的赋存分布及其在利用过程中的迁移特征[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(1): 65–80.
- WANG Wenfeng, WANG Wenlong, LIU Shuangshuang, et al. Distribution and occurrence of uranium in coal and its migration behavior during the coal utilization[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2021, 49(1): 65–80.
- [23] 周贤青, 秦勇, 陆鹿. 中国煤型铀地质—地球化学研究进展[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(4): 45–53.
- ZHOU Xianqing, QIN Yong, LU Lu. Advances on geological-geochemical research of coal-type uranium in China[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2019, 47(4): 45–53.
- [24] 贾智勇, 张虎军, 陈文正, 等. 新疆伊犁盆地南缘洪海沟煤岩型铀矿控矿因素研究[J]. 矿产勘查, 2020, 11(11): 2417–2423.
- JIA Zhiyong, ZHANG Hujun, CHEN Wenzheng, et al. Ore-control factors of Honghaigou coal type uranium deposit in the Southern margin of Yili Basin, Xinjiang[J]. *Mineral Exploration*, 2020, 11(11): 2417–2423.
- [25] 刘武生, 贾立城. 达拉地含铀煤型矿床成矿作用[J]. 矿物学报, 2011, 31(S1): 271–272.
- LIU Wusheng, JIA Licheng. Mineralization of Daladi coal-type uranium deposit[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2011, 31(S1): 271–272.
- [26] 刘章月, 董文明, 刘红旭. 新疆萨瓦布其地区含铀煤成因分析[J]. 铀矿地质, 2011, 27(6): 345–351.
- LIU Zhangyue, DONG Wenming, LIU Hongxu. Analysis on genesis of uranium-bearing coal in Sawabuqi area, Xinjiang[J]. *Uranium Geology*, 2011, 27(6): 345–351.
- [27] 王飞飞, 刘池洋, 邱欣卫, 等. 世界砂岩型铀矿探明资源的分布及特征[J]. 地质学报, 2017, 91(9): 2021–2046.
- WANG Feifei, LIU Chiyang, QIU Xinwei, et al. Characteristics and distribution of world's identified sandstone-type uranium resources[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2017, 91(9): 2021–2046.
- [28] 程银行, 金若时, Michel CUNEY, 等. 中国北方盆地大规模铀成矿作用: 地层篇[J]. 地质学报, 2024, 98(7): 1953–1976.
- CHENG Yinhang, JIN Ruoshi, CUNEY M, et al. The strata constraint on large scale sandstone-type uranium mineralization in

- Meso-Cenozoic basins, Northern China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2024, 98(7): 1953–1976.
- [29] 李胜祥, 张宇龙, 刘红旭, 等. 中国含铀沉积盆地类型与铀成矿特征[J]. *铀矿地质*, 2023, 39(5): 727–742.
- LI Shengxiang, ZHANG Zilong, LIU Hongxu, et al. Uraniferous sedimentary basin type and metallogenic characteristics in China[J]. *Uranium Geology*, 2023, 39(5): 727–742.
- [30] 焦养泉, 吴立群, 荣辉. 砂岩型铀矿的双重还原介质模型及其联合控矿机理: 兼论大营和钱家店铀矿床[J]. *地球科学*, 2018, 43(2): 459–474.
- JIAO Yangquan, WU Liqun, RONG Hui. Model of inner and outer reductive media within uranium reservoir sandstone of sandstone-type uranium deposits and its ore-controlling mechanism: Case studies in Daying and Qianjiadian uranium deposits[J]. *Earth Science*, 2018, 43(2): 459–474.
- [31] 刘鑫扬, 贺锋, 剡鹏兵, 等. 鄂尔多斯盆地东北部铀成矿地质特征与区域成矿规律[J]. *铀矿地质*, 2022, 38(3): 373–393.
- LIU Xinyang, HE Feng, YAN Pengbing, et al. Geological characteristics and regional metallogenic pattern of uranium mineralization in Northeastern Ordos Basin[J]. *Uranium Geology*, 2022, 38(3): 373–393.
- [32] DAI S F, FINKELMAN R B, FRENCH D, et al. Modes of occurrence of elements in coal: A critical evaluation[J]. *Earth-Science Reviews*, 2021, 222: 103815.
- [33] 秦明宽, 何中波, 刘章月, 等. 准噶尔盆地砂岩型铀矿成矿环境与找矿方向研究[J]. *地质论评*, 2017, 63(5): 1255–1269.
- QIN Mingkuan, HE Zhongbo, LIU Zhangyue, et al. Study on metallogenic environments and prospective direction of sandstone type uranium deposits in Junggar Basin[J]. *Geological Review*, 2017, 63(5): 1255–1269.
- [34] 王志罡, 谢宏, 杨旭, 等. 贵州铜仁坝黄磷矿中铀赋存状态的逐级化学提取研究[J]. *岩矿测试*, 2018, 37(3): 256–265.
- WANG Zhigang, XIE Hong, YANG Xu, et al. Stepwise extraction study on the occurrence of uranium in Tongren bahuang phosphorite, Guizhou[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2018, 37(3): 256–265.
- [35] GUO Z W, XUE G Q, LIU J X, et al. Electromagnetic methods for mineral exploration in China: A review[J]. *Ore Geology Reviews*, 2020, 118: 103357.
- [36] DI Q Y, XUE G Q, YIN C C, et al. New methods of controlled-source electromagnetic detection in China[J]. *Science China Earth Sciences*, 2020, 63(9): 1268–1277.
- [37] 陈聪, 程纪星, 周俊杰, 等. 特拉敖包矿产地氧化还原过渡带磁异常特征及产生机理探讨[J]. *铀矿地质*, 2024, 40(2): 301–308.
- CHEN Cong, CHENG Jixing, ZHOU Junjie, et al. Discussion on magnetic anomaly characteristics and generation mechanism of redox transition zone in telaobao occurrence[J]. *Uranium Geology*, 2024, 40(2): 301–308.
- [38] EPPELBAUM L V. Review of processing and interpretation of self-potential anomalies: transfer of methodologies developed in magnetic prospecting[J]. *Geosciences*, 2021, 11(5): 194.
- [39] HAJNAL Z, TAKÁCS E, ANNESLEY I R, et al. Effective utilization of seismic reflection technique with moderate cost in uranium exploration[J]. *Geophysical Prospecting*, 2020, 68(1): 129–144.
- [40] 程纪星, 王德利, 李子伟. 地震勘探技术在地浸砂岩型铀矿勘探开发中的应用前景分析[J]. *铀矿地质*, 2022, 38(2): 317–326.
- CHENG Jixing, WANG Deli, LI Ziwei. Application prospect of seismic exploration technology in the exploration and development of in situ leachable sandstone uranium deposit[J]. *Uranium Geology*, 2022, 38(2): 317–326.
- [41] LI Z C, QU Y M. Research progress on seismic imaging technology[J]. *Petroleum Science*, 2022, 19(1): 128–146.
- [42] 王殿学, 余水泉, 黄笑. 我国 γ 测井技术发展的回顾与展望[J]. *铀矿地质*, 2023, 39(1): 124–132.
- WANG Dianxue, YU Shuiquan, HUANG Xiao. Review and prospect of gamma logging technology in China[J]. *Uranium Geology*, 2023, 39(1): 124–132.
- [43] 王海军, 郑三龙, 王相业, 等. 地质构造隐蔽致灾因素透明化勘查技术——以新疆屯宝煤矿为例[J]. *煤炭科学技术*, 2024, 52(9): 173–188.
- WANG Haijun, ZHENG Sanlong, WANG Xiangye, et al. Transparent exploration technology for hidden disaster-causing factors of geological structure: taking tunbao coal mine in Xinjiang as an example[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(9): 173–188.
- [44] RASOULI F S, MASOUDI S F. Effect of modeling porous media on the response of gamma-gamma well-logging tool[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 6823.
- [45] TIAN Y, XU J, LIU Y H, et al. Application of different logging techniques in uranium exploration[J]. *International Journal of Energy*, 2023, 3(3): 86–89.
- [46] 李必红, 刘庆成, 邓居智, 等. 砂岩型铀矿床上氦及其子体异常分析[J]. *铀矿地质*, 2007, 23(1): 49–54.
- LI Bihong, LIU Qingcheng, DENG Juzhi, et al. Analyses on anomaly of radon and its daughters above sandstone type uranium deposit[J]. *Uranium Geology*, 2007, 23(1): 49–54.
- [47] SUKANYA S, NOBLE J, JOSEPH S. Application of radon (^{222}Rn) as an environmental tracer in hydrogeological and geological investigations: an overview[J]. *Chemosphere*, 2022, 303: 135141.
- [48] 张必敏, 王学求, 徐善法, 等. 穿透性地球化学勘查技术在隐伏砂岩型铀矿调查中的应用研究[J]. *地球学报*, 2020, 41(6): 770–784.
- ZHANG Bimin, WANG Xueqiu, XU Shanfa, et al. The research and application of deep-penetrating geochemical exploration technology in the survey of concealed sandstone-type uranium deposits[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2020, 41(6): 770–784.
- [49] ZHANG B M, WANG X Q, ZHOU J, et al. Regional geochemical survey of concealed sandstone-type uranium deposits using fine-grained soil and groundwater in the Erlan basin, North-East China[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2020, 216: 106573.