

二连盆地铀矿成矿规律与勘查潜力评价

武杰 何少伟 冯苗苗

中陕核工业集团地质调查院有限公司 陕西 西安 710100

摘要: 二连盆地是中生代裂陷盆地群, 具独特地质背景。本文阐述其构造演化、地层沉积及铀源条件, 剖析铀矿在构造、沉积、气候与氧化还原等方面的成矿规律, 提出复合潜水流氧化成矿模式。分析区域与矿区勘查技术适配性, 明确优化创新方向。构建潜力评价指标体系与评价方法, 划分勘查潜力区, 圈定优先靶区, 为二连盆地铀矿勘查提供理论与技术支持。

关键词: 二连盆地; 铀矿成矿规律; 资源评价

引言: 铀矿作为重要的战略资源, 对国家能源安全意义重大。二连盆地是我国重要的砂岩型铀矿基地, 其独特的构造演化、复杂的地层沉积以及充足的铀源条件, 为铀矿成矿提供了有利环境。深入探究二连盆地铀矿成矿规律, 准确评价其勘查潜力, 不仅有助于提高该地区铀矿勘查效率与成功率, 还能为我国铀矿资源的可持续供应提供重要保障, 推动铀矿勘查事业的进一步发展。

1 二连盆地成矿区域地质背景

1.1 盆地构造演化

二连盆地是在内蒙古-大兴安岭海西褶皱带基础上发育的中生代裂陷盆地群, 整体呈现“5坳3隆”的二级构造-沉积单元格局, 由多个深而狭长的地堑、半地堑复合形成复式断陷系统。其构造演化大致经历三大阶段: 早期裂陷阶段以强烈断陷作用为主, 控盆断裂活动剧烈, 奠定盆地基本构造格架; 中期断坳转换阶段, 断陷强度显著减弱, 沉积速率超过沉降速率, 盆地进入填平补齐阶段; 晚期整体坳陷阶段, 构造活动趋于平缓, 形成广泛的区域性盖层^[1]。晚白垩世-古新世的区域挤压背景引发构造反转, 造成长时间沉积间断, 形成关键的不整合面, 同时造就构造天窗或砂体剥露区, 为铀矿氧化成矿提供了有利构造条件。

1.2 地层与沉积环境

二连盆地沉积盖层主体为侏罗系、白垩系陆相地层, 其中下白垩统是铀矿成矿的核心地层, 自下而上划分为阿尔善组、腾格尔组及赛汉组。阿尔善组为裂陷早期粗碎屑岩沉积, 胶结致密, 无铀矿化; 腾格尔组以湖相泥岩为主, 属主要烃源岩层, 断陷边缘扇三角洲粗碎屑岩可发生后期氧化铀成矿; 赛汉组形成于断坳转换及坳陷期, 发育河流、三角洲、湖沼等多种沉积相, 岩石胶结疏松, 为铀矿主要富集层。沉积环境呈现明显的时空分异特征, 横向受同生正断层控制, 岩相和厚度差异显著, 其

中三角洲平原分流间湾、沼泽相及古河谷河道沉积带, 因具备良好的砂体储集条件, 成为铀矿化集中发育区域。

1.3 区域铀源条件

二连盆地区域铀源供给充足, 形成“基底-盖层”双重铀源体系。盆地基底由元古界、古生界海相碎屑岩-碳酸盐岩、火山岩及加里东-燕山期侵入岩组成, 铀含量高达2.5~7.3g/t, 为铀矿成矿提供稳定的原生铀源。盖层沉积阶段, 古河谷搬运体系从周边隆起区携带大量花岗质碎屑岩, 这类碎屑岩铀丰度较高, 实现铀元素的沉积期预富集, 使赛汉组等含矿地层砂体铀含量普遍增高, 部分可达工业品级。此外, 烃源岩演化过程中释放的还原流体, 可促进基底及围岩中铀的活化迁移, 进一步提升局部区域铀丰度, 为铀矿大规模富集奠定物质基础。

2 二连盆地铀矿成矿规律

2.1 构造控矿规律

二连盆地的铀矿成矿过程深受构造格局、断裂活动以及构造反转等多重因素的复杂控制, 呈现出极为显著的构造控矿特征。在盆地中央的次级构造单元——马尼特-乌兰察布正向裂陷带中部, 存在着三级凹陷, 这里成为了铀矿床的集中分布区域, 著名的“巴-赛-齐”铀矿带就发育于此。主干断裂及其派生的次级断裂, 在铀矿成矿过程中扮演着关键角色, 它们不仅严格地控制着含矿地层和砂体的空间展布方向与范围, 而且构造反转所形成的不整合面, 为氧化流体的渗透提供了天然通道, 加速了铀元素的迁移。另外, 断裂弯曲褶皱与逆牵引背斜叠加的部位, 由于特殊的构造应力条件, 容易形成铀矿富集的空间。构造坡折带、古河谷转折端以及河道交汇部位, 因砂体厚度大、渗透性好, 成为氧化还原界面发育的理想场所, 铀矿化往往集中出现在这些区域。同时, 成矿后断裂不发育的区域, 上覆的厚层泥岩盖层能够得以完好保存, 有效保护了已形成的铀矿体, 防止其

遭受后期地质作用的破坏^[2]。

2.2 沉积控矿规律

沉积相类型、砂体结构以及地层组合是控制二连盆地铀矿分布的核心要素,形成了鲜明且独特的沉积控矿规律。铀矿化主要赋存于下白垩统赛汉组的河流-三角洲-湖沼相沉积体系中。其中,三角洲平原分流间湾、沼泽相以及古河谷河道亚相是最为有利的成矿微相。含矿砂体需要具备“泥-砂-泥”的理想地层结构,上部泥岩作为隔水层,能够有效阻挡氧化流体的外泄,防止铀元素被过度氧化而流失;下部泥岩则提供还原环境,为铀元素的沉淀提供有利条件;中部砂岩则作为铀矿的储集空间,当砂体胶结疏松、渗透性良好时,更有利于铀元素的迁移和富集。在平面上,铀矿化沿着古河谷呈带状分布,主干河道与侧向补给河道交汇的部位,由于水流汇聚、物质交换频繁,矿化规模往往更大;在剖面上,矿体多位于河道充填组合的中下部以及氧化还原界面附近,这些位置为铀矿的形成提供了适宜的物理化学环境。

2.3 气候与氧化还原条件

古气候的演变与氧化还原环境的分异共同对二连盆地铀矿的形成与富集起着关键的调控作用。在赛汉组沉积期,盆地处于潮湿的气候环境,充沛的降水为铀元素的活化迁移提供了充足的水源,潮湿的气候也促进植物的生长,使得地层中的有机质和黄铁矿含量升高,为铀矿的形成提供丰富的还原物质基础。到成矿期,气候逐渐转向干旱-半干旱,这种气候条件有利于形成区域性的潜水-层间氧化带,氧化流体沿着砂体渗透迁移,将预富集的铀元素活化并搬运至还原环境区沉淀成矿。盆地内发育有黄色潜水氧化和绿色潜水-层间氧化两种类型,其中铀矿化主要受绿色潜水-层间氧化带控制。矿体多位于“绿-灰绿-灰”分带的偏“灰”部位,即氧化还原界面以下的灰色未蚀变砂体中。氧化还原界面的空间展布直接决定了铀矿体的形态和分布范围,界面的位置、形态以及变化情况都会对铀矿的富集程度产生重要影响。

2.4 成矿模式创新

基于二连盆地独特的铀矿成矿地质条件,在传统潜水氧化成矿理论的基础上,创新性地提出了复合潜水流氧化成矿模式,这一模式突破典型古河谷型铀矿成矿的传统认知。该模式明确指出铀矿成矿经历了“沉积预富集-构造活化-氧化搬运-还原沉淀-后期保存”五个关键阶段。在沉积期,古河谷搬运体系实现了铀元素的预富集,为后续的成矿奠定物质基础;构造反转形成的不整合面和断裂为流体活动提供了通道,使得氧化流体能够顺利地在地层中迁移;氧化流体沿着砂体呈单向或双向

渗透,活化搬运铀酰阳离子,使其在地层中不断迁移;在还原界面处,铀酰阳离子与有机质、黄铁矿发生还原反应,从而沉淀成矿;成矿后,厚层的古近系泥岩盖层沉积,阻止矿体遭受后期的改造和破坏。与典型基底古河谷型铀矿不同,二连盆地为建造间古河谷成矿,赛汉组下段煤系地层为成矿提供额外的还原条件,形成了独特的煤铀共生成矿格局,为铀矿的勘探和开发提供新的思路 and 方向。

3 二连盆地铀矿勘查技术适配性分析

3.1 区域勘查技术组合

针对二连盆地砂岩型铀矿埋藏浅、古河谷近源成矿、带状集中分布的特征,构建“重磁寻隆凹、电井震找断砂、氡伽圈异常”的分层次区域勘查技术组合。区域尺度上,采用重力、航磁测量技术,快速探寻隐伏岩体和基底隆凹展布形态,圈定区域成矿有利构造单元;中期开展高密度电阻法和音频大地电磁测量,识别铀储层高阻背景中的相对低阻异常,结合二维地震剖面精细刻画含矿地层结构、断裂展布及砂体空间分布;后期通过氡气测量和伽马总量(能谱)测量,圈定放射性异常晕,分析其与深部铀矿体的空间关系,为后续勘查部署提供靶区范围。该技术组合实现从区域概查至靶区优选的无缝衔接,大幅提升勘查效率。

3.2 矿区精细勘查技术

进入矿区精细勘查阶段,构建以钻井验证为核心,测井解释与地球化学勘查相结合的综合技术体系。钻井工程采用定向钻探技术,精准揭露含矿砂体和矿体,获取岩芯样品用于岩性鉴定、铀含量测试等分析;测井技术组合包括自然伽马、伽马能谱、电阻率、声波时差等系列测井方法,通过多参数联合解释,精准划分含矿层位、确定矿体厚度和品位^[3]。同时,应用深穿透地球化学技术,通过土壤微细粒分离技术富集富含活动性铀的粘土矿物,捕捉深部铀矿体垂向迁移形成的地表地球化学异常,实现对深部矿体的精细定位。在玄武岩覆盖区,音频大地电磁法可有效穿透覆盖层,清晰反映基底起伏和砂体分布,为钻井部署提供精准依据。

3.3 勘查技术优化与创新方向

结合二连盆地勘查实践,铀矿勘查技术优化与创新需聚焦三个方向:一是多源地质数据融合技术创新,将重磁、电法、地震、测井等数据与地质建模相结合,构建三维地质-地球物理模型,提升含矿砂体和矿体的预测精度;二是深部勘查技术升级,针对深部隐伏矿体,研发高精度可控源音频大地电磁法和三维地震勘查技术,突破浅部勘查局限;三是绿色高效勘查技术推广,优化钻

井工艺减少环境扰动,发展无人机搭载伽马能谱测量技术实现快速低成本勘查,同时深化煤田钻孔资料“二次开发”技术,通过对既有煤田测井数据的重新解读,圈定铀异常区,降低勘查成本。此外,智能化数据解释系统研发可提升勘查数据处理效率,为快速决策提供支撑。

4 二连盆地铀矿勘查潜力评价

4.1 潜力评价指标体系构建

基于二连盆地铀矿成矿条件,构建包含4大类12项指标的勘查潜力评价指标体系。基础地质指标涵盖盆地构造类型、三级凹陷发育程度及断裂发育密度,表征区域构造控矿潜力;成矿条件指标包括含矿地层厚度、有利沉积相发育范围、砂体孔隙度与渗透率,反映储集空间条件;铀源与还原条件指标包含基底铀含量、盖层铀预富集程度、有机质及黄铁矿含量,评估铀源供给与还原成矿能力;勘查工程指标涵盖地球化学异常强度、伽马异常连续性、钻孔见矿率,体现已有勘查工作的验证成果。各指标采用层次分析法确定权重,通过量化评分实现对区域成矿潜力的客观评价,为后续潜力分区提供依据。

4.2 潜力评价方法与流程

二连盆地铀矿勘查潜力评价采用“资料收集-指标量化-综合评价-成果验证”的标准化流程,结合定性定量评价方法。首先系统收集区域地质、地球物理、地球化学及钻井勘查资料,建立综合数据库;其次对构建的评价指标进行量化处理,采用隶属度函数将各指标转化为0-1区间的标准化评分;随后运用综合指数法计算各评价单元的综合潜力得分,结合GIS空间分析技术实现评价结果的空间可视化;最后通过典型矿区验证和钻孔工程验证,修正评价参数与权重,提升评价结果的可靠性。该流程既保障评价的系统性和科学性,又通过实地验证确保评价成果能有效指导勘查部署,避免盲目勘查。

4.3 勘查潜力分区与靶区圈定

依据综合潜力评价结果,将二连盆地划分为高潜力区、中潜力区和低潜力区三个等级。高潜力区主要集中在

在马尼特-乌兰察布正向裂陷带“巴-赛-齐”铀矿带延伸区域及呼仁布其凹陷中部,该区域构造条件优越、含矿砂体发育、铀源充足且地球化学异常显著,已发现多个工业铀矿体;中潜力区包括腾格尔坳陷东部和乌尼特坳陷南部,具备基本成矿条件,但砂体连续性和铀富集程度稍逊于高潜力区;低潜力区为盆地边缘隆起区及砂体不发育的凹陷区^[4]。基于潜力分区,圈定12处优先勘查靶区,其中6处位于高潜力区,重点围绕古河谷交汇部位和氧化还原界面发育区部署勘查工作,同时提出“煤铀共探”勘查思路,在煤田勘查区同步开展铀矿异常排查,提升靶区勘查效率与成功率。

结束语

二连盆地铀矿研究在成矿规律与勘查潜力评价方面取得一定成果。明确其成矿受多重因素控制,创新提出成矿模式,构建适配的勘查技术体系并规划优化方向。潜力评价划分了潜力区,圈定优先靶区。然而,二连盆地铀矿勘查仍面临诸多挑战,未来需持续深入研究,不断完善理论与技术,以实现铀矿资源的高效勘查与开发,保障国家能源需求。

参考文献

- [1]孙涛,庞康,罗宁,等.二连盆地脑木更地区砂岩型铀矿元素地球化学特征及与铀成矿的关系[J].铀矿地质,2025,41(1):44-61.
- [2]李彤,俞初安,荣辉,等.内蒙古二连盆地西部白彦花地区砂岩型铀矿地质特征及成矿作用浅析[J].中国地质,2025,52(5):1823-1839.
- [3]樊松浩,王达,李成元,等.二连盆地川井准噶顺地区镭-铀平衡系数在砂岩型铀矿找矿勘查中的应用[J].矿产勘查,2025,16(6):1369-1383.
- [4]李曙光,吕永华,王果,等.二连盆地巴彦乌拉铀矿床氧化带发育样式与岩石地球化学特征[J].铀矿地质,2024,40(6):1064-1074.