

# 砂岩型铀矿成矿地质条件与控矿因素综合分析

权军明 冯苗苗 谢贤胜

中陕核工业集团地质调查院有限公司 陕西 西安 710100

**摘要:** 文章聚焦砂岩型铀矿, 综合分析其成矿地质条件与控矿因素。阐述构造、地层岩性、铀源、水文地质、古气候与古地理等成矿基础条件, 识别构造、岩性-岩相、流体、氧化还原、有机质等核心控矿因素。介绍“多学科融合、多尺度联动”的综合分析方法体系, 并说明其在找矿预测中的应用, 旨在为砂岩型铀矿勘查提供理论依据与技术支持, 推动找矿工作精准化。

**关键词:** 砂岩型铀矿; 成矿地质条件; 控矿因素

**引言:** 砂岩型铀矿作为重要的铀资源类型, 其成矿机制复杂, 受多种地质条件与因素控制。准确把握成矿地质条件与控矿因素, 对找矿预测和资源开发意义重大。当前, 对砂岩型铀矿的研究虽取得一定进展, 但综合系统的分析仍有待深化。本文旨在全面剖析砂岩型铀矿成矿地质条件与控矿因素, 构建综合分析方法体系, 为该类型铀矿的勘查开发提供科学指导。

## 1 砂岩型铀矿成矿基础地质条件

### 1.1 构造地质条件

构造地质条件是砂岩型铀矿成矿的基础框架, 其核心作用体现在对含矿盆地形成、演化及流体运移的调控。含矿盆地多发育于板块边缘或陆内构造活动带, 盆地边界断裂与内部次级断裂构成关键构造体系。边界断裂控制盆地的基底格局与沉积充填厚度, 为铀源物质的活化迁移提供通道; 内部次级断裂(如正断层、逆冲断层)则分割盆地为不同构造单元, 影响砂岩储层的发育分布与连通性。另外, 构造隆升与拗陷的周期性演化, 主导了盆地内沉积间断与剥蚀作用, 促使富铀流体在构造转折部位聚集<sup>[1]</sup>。同时, 构造活动引发的地层变形, 可形成背斜、向斜、断块等构造圈闭, 为铀矿物的沉淀富集提供有利空间, 因此构造的多期次活动性与空间组合形态直接决定成矿潜力。

### 1.2 地层与岩性条件

地层与岩性条件是砂岩型铀矿成矿的物质载体, 核心在于发育一套“储-盖-运”匹配的地层岩性组合。含矿地层以中生代陆相砂岩为主, 多属于河流、三角洲、湖泊等沉积体系的产物, 其中细砂岩、中砂岩因孔隙度(15%~30%)与渗透率适中, 成为优质储矿层。岩性上, 长石石英砂岩、岩屑砂岩因富含长石、岩屑等易蚀变矿物, 经风化淋滤可释放铀元素, 同时其发育的粒间孔、溶蚀孔为流体储存与铀矿物沉淀提供空间。盖层多为泥岩、页

岩或膏盐层, 具备低渗透性特征, 可阻挡富铀流体向上逸散, 形成封闭的成矿环境。另外, 地层的横向连续性与纵向厚度稳定性至关重要, 厚层连续的砂岩储层可延长流体运移路径, 提升铀矿化规模, 而岩性的突变界面往往是铀矿化富集的关键部位。

### 1.3 铀源条件

铀源条件是砂岩型铀矿成矿的物质基础, 铀元素的供给强度与持续性直接决定成矿规模。砂岩型铀矿的铀源具有多元性, 主要包括基底古老花岗岩、变质岩系, 以及盆地周边的铀矿化岩体、富铀地层。基底岩石经长期风化剥蚀, 铀元素以铀酰离子( $UO_2^{2+}$ )等可溶性形式进入地表水体, 随水流汇入含矿盆地; 盆地周边富铀地层通过断裂渗透或地下水淋滤作用, 向盆地内补给铀源。沉积过程中吸附铀的黏土矿物、有机质在后期成岩作用中, 可通过热演化或流体作用再次释放铀元素, 形成“二次铀源”。铀源的供给效率与流体的迁移能力密切相关, 富铀流体的持续补给的同时, 需具备适宜的地球化学环境, 才能确保铀元素不被提前固定, 为后续成矿提供充足物质保障。

### 1.4 水文地质条件

水文地质条件是砂岩型铀矿成矿的关键动力, 控制着铀元素的迁移、富集与沉淀全过程。含矿盆地内通常发育多套地下水系统, 其中氧化型潜水与还原型承压水的交互作用最为核心。氧化型潜水通过大气降水补给, 携带游离氧与二氧化碳, 在运移过程中淋滤砂岩中的铀元素, 形成富铀含矿流体; 还原型承压水多为封存的古地下水, 富含硫化氢、甲烷等还原性物质, 为铀元素的还原沉淀提供地球化学环境。地下水的流动速度与方向决定了含矿流体的运移范围, 缓流区或滞流区(如地下水排泄带、构造转折处)易导致铀元素聚集。含水层的连通性、隔水层的封闭性直接影响地下水系统的稳定性, 优

质的水文地质结构需保障氧化-还原界面长期稳定,为铀矿物的持续沉淀提供条件。

### 1.5 古气候与古地理条件

古气候与古地理条件通过调控沉积环境与流体活动,间接控制砂岩型铀矿的成矿过程。古气候方面,温暖湿润与干旱半干旱的周期性交替最为有利:湿润期大气降水充沛,强化岩石风化淋滤,提升铀源供给效率,同时促进地表径流发育,为铀元素迁移提供动力;干旱半干旱早期蒸发作用强烈,促使地下水浓缩,提升含矿流体中铀元素浓度,同时利于氧化环境的形成。古地理方面,含矿盆地需处于相对开阔的陆相沉积环境,如河流三角洲、湖泊滨岸带等,这些区域地形平缓,利于厚层砂岩储层沉积,且水体动力条件适中,可保障砂岩颗粒分选性与磨圆度良好,发育优质孔隙空间。古地理格局控制盆地的物源供给方向与沉积中心分布,沉积中心附近的还原环境为铀矿化富集提供有利场所。

## 2 砂岩型铀矿核心控矿因素识别与分析

### 2.1 构造控矿因素

构造控矿是砂岩型铀矿成矿的主导因素,通过多维度调控成矿过程的关键环节。从宏观尺度看,板块构造背景决定含矿盆地的分布格局,陆内伸展带、克拉通边缘拗陷带等构造单元因地壳伸展减薄,易形成规模较大的沉积盆地,为成矿提供基础空间<sup>[2]</sup>。中观尺度上,盆地内部的断裂体系是控矿核心,边界断裂控制物源输入与流体通道,内部次级断裂分割形成的断块单元,可改变地下水动力条件,促使含矿流体在断块边界聚集。微观尺度下,构造活动引发的岩石裂隙(如构造节理、劈理)提升了砂岩储层的渗透性,为铀元素的迁移与沉淀提供微观空间。构造运动的多期次性决定了成矿的阶段性,构造隆升期促进铀源活化,拗陷期利于储层沉积与矿化保存,构造的叠加改造则可能强化矿化富集或破坏矿化体。

### 2.2 岩性-岩相控矿因素

岩性-岩相控矿在铀矿形成过程中起着关键作用,它通过决定储层的物质组成与空间分布,直接左右着铀矿化的发育位置与规模。在岩性层面,细-中粒长石石英砂岩、岩屑砂岩堪称最有利的储矿岩性。这类岩石颗粒分选和磨圆状况良好,粒间孔隙极为发育,为铀元素的赋存提供了充足空间。而且,它们富含长石、黑云母等易蚀变矿物,在自然条件下,经风化淋滤作用,这些矿物中的铀元素得以释放。岩石中的黏土矿物具有强大的吸附能力,能对释放出的铀元素进行初步富集。岩相方面,河流相(如河道砂坝、边滩)以及三角洲前缘相(如分流河道、河口坝)是优势成矿岩相。这些岩相具备砂体

厚度大、横向连续性好、渗透性均匀的显著特征,为含矿流体的顺畅运移创造了良好条件,使流体能够广泛接触岩石,促进铀元素的富集。另外,岩性-岩相在横向上的变化以及纵向上的组合,会形成岩性界面,像砂岩与泥岩接触面。这种界面易导致流体流速发生突变,地球化学环境也随之改变,进而促使铀元素在界面附近沉淀下来。

### 2.3 流体控矿因素

流体在砂岩型铀矿成矿过程中占据着核心地位,是成矿的关键载体与动力媒介。其物理化学性质、运移路径以及演化过程,对铀矿化的形成起着直接且决定性的控制作用。含矿流体主要可划分为氧化型成矿流体与还原型成矿流体。氧化型流体大多源于大气降水补给所形成的地下水,这类流体富含氧和二氧化碳,pH值偏酸性,拥有强大的淋滤能力。在流动过程中,它能够溶解岩石中的铀元素,进而形成富铀流体。而还原型流体则多为盆地内封存的古流体,其中富含硫化氢、有机质分解产物等还原性物质,pH值偏碱性。当它与富铀流体相遇时,可促使富铀流体中的铀酰离子发生还原反应,最终沉淀为铀矿物。流体的温度和压力条件对铀元素的溶解度有着显著影响。一般来说,中低温(20-80℃)、常压的环境更有利于铀元素的溶解与迁移。另外,流体的混合作用至关重要,尤其是氧化流体与还原流体的交汇,这是铀矿化富集的关键触发机制。同时,流体在运移过程中,通道的畅通性以及圈闭条件也不容忽视,它们直接决定了矿化体的规模大小和形态特征。

### 2.4 氧化还原控矿因素

氧化还原控矿是砂岩型铀矿成矿的核心地球化学机制,氧化还原界面是铀矿化富集的关键场所。含矿盆地内的氧化环境主要由大气降水携带的游离氧形成,氧化带的发育范围与深度受地下水动力条件、岩性渗透性控制,氧化过程中,岩石中的铀元素被氧化为可溶性铀酰离子进入流体;还原环境则由盆地内的有机质分解、黄铁矿等硫化物还原作用形成,还原带内的还原性物质(如H<sub>2</sub>S、CH<sub>4</sub>、有机质)可将铀酰离子还原为不溶性的铀矿物(如沥青铀矿、铀石)。氧化还原界面是氧化环境与还原环境的过渡带,此处流体的地球化学性质发生突变,铀元素的溶解度急剧降低,快速沉淀富集形成矿化体<sup>[3]</sup>。界面的稳定性与迁移特征直接影响矿化规模,稳定的界面可形成厚大连续的矿化体,而界面的周期性迁移则可能形成多期次矿化叠加,提升成矿潜力。

### 2.5 有机质控矿因素

有机质在砂岩型铀矿成矿过程中发挥着多重控矿作

用,是铀矿化富集的重要辅助因素。有机质的类型(如腐殖质、沥青、干酪根)与演化程度直接影响控矿效果,低成熟-成熟的有机质具备较强的吸附与还原能力。一方面,有机质可通过物理吸附(如表面吸附)与化学络合作用,直接吸附富集流体中的铀酰离子,降低铀元素的迁移能力;另一方面,有机质分解过程中产生的硫化氢、甲烷、有机酸等物质,可改变流体的地球化学环境,使流体pH值升高、还原性增强,促使铀酰离子还原为铀矿物沉淀。此外,有机质的存在可改善砂岩储层的孔隙结构,为流体运移与铀矿物沉淀提供更多微观空间。有机质的含量与分布具有明显的不均一性,通常在砂岩与泥岩的过渡带、透镜状砂体中心富集,这些区域也成为铀矿化的优先富集部位。

### 3 砂岩型铀矿成矿与控矿综合分析方法及应用

#### 3.1 综合分析方法体系

砂岩型铀矿成矿与控矿综合分析方法体系以“多学科融合、多尺度联动”为核心,整合地质、地球物理、地球化学、遥感等多领域技术方法,形成从宏观到微观的全维度分析框架。宏观尺度上,采用区域地质调查与遥感解译技术,识别含矿盆地的构造背景、边界格局与古地理环境,明确成矿的宏观条件;中观尺度运用地震勘探、重力勘探、磁法勘探等地球物理方法,探测盆地内部的地层结构、断裂分布与砂体展布,圈定有利成矿构造单元;微观尺度通过岩石薄片鉴定、扫描电镜分析、地球化学测试(如主量元素、微量元素、同位素分析),解析岩性矿物组成、流体性质与氧化还原环境,揭示成矿微观机制。同时,结合数值模拟技术,重构成矿过程中的流体运移路径与矿化富集过程,实现对成矿与控矿因素的定量化分析,形成“宏观圈定-中观聚焦-微观验证”的完整方法体系。

#### 3.2 在找矿预测中的应用

成矿与控矿综合分析方法体系在砂岩型铀矿找矿预测中发挥着核心支撑作用,通过多方法协同实现找矿靶

区的精准圈定与等级划分。在预测初期,利用宏观地质与遥感分析,明确含矿盆地的成矿潜力,排除不具备基础成矿条件的区域;中期结合地球物理勘探成果,聚焦盆地内断裂发育带、优质砂体分布区等有利构造-岩性单元,缩小找矿范围;后期通过地球化学测试与微观分析,验证目标区域的铀异常强度、氧化还原界面位置与有机质含量,确定矿化富集的直接标志。借助数值模拟技术,预测含矿流体的聚集部位与矿化体的可能形态,为钻探工程部署提供科学依据<sup>[4]</sup>。该方法体系已在多个含矿盆地的找矿预测中得到应用,通过整合多源数据构建找矿预测模型,有效提升了靶区预测的准确率,为砂岩型铀矿的高效勘查提供技术保障,推动了找矿工作从“经验型”向“精准型”转变。

#### 结束语

砂岩型铀矿成矿地质条件复杂,控矿因素多样,综合分析其成矿与控矿要素,对找矿预测和资源开发至关重要。本文构建的“多学科融合、多尺度联动”综合分析方法体系,在找矿预测中成效显著,提升了靶区预测准确率,推动找矿工作向精准型转变。未来,随着研究深入和技术发展,对该类铀矿的认识将更全面,为保障国家能源安全提供更有有力支持。

#### 参考文献

- [1]刘长纯,许国雨,王珑凯,等.辽东吉南成矿带金矿成矿系列、成矿谱系及成矿演化历史[J].中国地质调查,2024,11(05):104-111.
- [2]单贺,王刚.多因素套合分析法在吉林渔民屯地区金矿成矿预测中的应用[J].吉林地质,2024,43(03):96-101+108.
- [3]李彤,俞初安,杨桐旭,等.二连盆地西部白彦花地区砂岩型铀矿地质特征及控矿因素分析[J].华北地质,2022,45(4):38-47,74.
- [4]宋继叶,秦明宽,蔡煜琦,等.世界超大型砂岩铀矿床形成环境分析与找矿方向[J].铀矿地质,2021,37(5):901-912.