

砂岩型铀矿成矿流体运移规律与成矿机制探讨

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: 砂岩型铀矿作为全球铀资源的主力供给类型,其成矿过程与成矿流体的运移、演化及与围岩的相互作用密切相关。本文系统梳理砂岩型铀矿成矿流体的基本特征,深入解析流体来源、物理化学性质及时空分布规律;从驱动机制、运移路径、时空演化三方面阐明成矿流体运移核心规律;重点剖析成矿流体与围岩相互作用、铀矿化沉淀驱动机制及多因素协同成矿逻辑;结合当前研究瓶颈,提出深部流体探测、多尺度模拟及人工智能应用等未来研究方向。研究成果可完善砂岩型铀矿成矿理论体系,为隐伏铀矿精准找矿提供关键理论支撑,对保障铀资源战略安全具有重要实践意义。

关键词: 砂岩型铀矿;成矿流体;运移规律;成矿机制

引言: 在全球能源结构转型与核电快速发展背景下,铀资源的战略重要性愈发凸显,砂岩型铀矿因埋藏浅、易开采成为研究热点。成矿流体作为铀元素迁移与富集的核心载体,其运移规律与成矿机制是解析砂岩型铀矿成矿本质的关键科学问题。本文立足现有研究基础,从成矿流体基本特征入手,逐步深入探讨运移规律与成矿机制,明确核心科学问题,提出针对性研究方向,旨在深化对砂岩型铀矿成矿过程的理解,为铀矿勘查理论创新与实践突破提供有力支撑。

1 砂岩型铀矿成矿流体基本特征

1.1 成矿流体来源识别

砂岩型铀矿成矿流体来源具有多元性,核心可分为大气降水主导型、深部热液参与型及多源混合型三类,其识别依赖多学科指标协同佐证。大气降水主导型流体多形成于伸展盆地或拗陷盆地,氢氧同位素组成与区域大气降水线高度吻合,流体盐度较低,常伴随明显的氧化特征,是层间氧化带型铀矿的主要流体来源。深部热液参与型流体则与盆地深部构造活动相关,常携带深部来源的稀有气体同位素(如He、Ar),具有较高的温度与盐度,部分还伴随岩浆成因元素异常,在断裂控制型铀矿中作用显著。多源混合型流体兼具不同来源流体的地球化学特征,如大气降水与深部热液的混合会导致同位素组成偏离单一来源范围,流体性质出现明显过渡特征^[1]。实际识别中,需结合氢氧、铷、稀有气体等多同位素体系,搭配流体包裹体温压盐度数据,综合判定流体来源类型及各来源占比。

1.2 成矿流体物理化学性质

砂岩型铀矿成矿流体的物理化学性质直接决定铀的迁移形式与沉淀效率,核心参数包括温度、压力、盐

度、pH值、Eh值及离子组成。物理性质方面,成矿流体温度多介于20~120℃,其中大气降水来源流体温度较低(20~60℃),深部热液参与型流体温度较高(60~120℃),压力多对应浅-中埋藏深度(0.5~5MPa),密度与黏度随温压变化呈规律性波动。化学性质方面,流体多呈弱酸性至中性(pH=4.5~7.5),氧化型流体Eh值多大于0.1V,还原型流体Eh值多小于-0.1V;离子组成以Na⁺、Cl⁻、SO₄²⁻、HCO₃⁻为主,不同成矿环境存在差异——氧化带流体富含SO₄²⁻,利于形成铀酰-硫酸络合物;还原带流体富含HCO₃⁻,且有机质含量较高,可促进铀的还原沉淀。铀在流体中的迁移形式以铀酰络合物为主,具体类型(硫酸络合物、碳酸络合物等)由流体离子组成与pH值共同决定,其稳定性直接影响铀的长距离迁移能力。

1.3 成矿流体的时空分布特征

砂岩型铀矿成矿流体的时空分布与盆地构造演化、地层发育及成矿事件紧密相关。时间上,流体活动期次与铀矿化成矿期高度吻合,多集中于盆地拗陷期后改造阶段,如我国鄂尔多斯盆地、二连盆地的成矿流体主要活动期为晚白垩世-古近纪,与区域构造活动及古气候转型时间匹配。不同成矿阶段流体性质存在演化规律:早期以氧化型大气降水入渗为主,流体富含铀酰离子;中期流体与围岩发生强烈相互作用,性质逐渐过渡;晚期流体进入还原环境,铀开始大量沉淀。空间上,流体呈现明显的分区特征,在盆地边缘斜坡带、断裂带附近及古河谷展布区流体活动强烈,形成高渗透流体通道;平面上,流体从盆地周边隆起区(铀源区)向盆地内部凹陷区(矿化区)运移;垂向上,流体主要集中于特定含矿地层(如侏罗系、白垩系砂岩),受隔水层限制形成层间流体系统,矿化多集中于流体运移的阻滞部位或性质突

变带。

2 砂岩型铀矿成矿流体运移规律

2.1 流体运移驱动机制

砂岩型铀矿成矿流体运移受多种动力叠加驱动, 核心机制包括重力驱动、构造驱动、热力驱动及渗透压驱动, 不同成矿阶段主导动力存在差异。重力驱动是最基础的驱动方式, 由地形高差或地层埋藏深度差引发, 控制大气降水入渗与层间水的长距离径流, 在坳陷盆地层间氧化带型铀矿中起主导作用, 流体沿高渗透砂岩由补给区向排泄区缓慢运移。构造驱动与区域构造活动相关, 构造挤压或伸展作用会产生压力差, 断裂活动则可直接疏导流体, 尤其在断陷盆地或构造活跃区, 构造驱动可显著提升流体运移速率, 促进深部流体与浅层流体混合。热力驱动源于深部热梯度或岩浆活动, 导致流体产生热对流, 多作用于深部成矿系统或热液参与型铀矿。渗透压驱动由地层岩性差异、矿物溶解沉淀引发, 在流体运移后期或封闭性较好的储层中作用突出^[2]。实际成矿过程中, 多为多种驱动机制协同作用, 如重力驱动与构造驱动共同控制流体的运移路径与速率。

2.2 流体运移路径识别

砂岩型铀矿成矿流体运移路径的识别需结合宏观地质观测与微观分析技术, 核心路径包括宏观通道与微观通道两类。宏观通道以高渗透砂岩储层、断裂带、不整合面为主: 高渗透砂岩(如河流相、三角洲相砂岩)因孔隙度与渗透率高, 是流体长距离运移的主要载体, 其分布与沉积相带密切相关; 断裂带尤其是张性断裂, 可作为深部流体上升与浅层流体贯通的关键通道, 断裂交汇区易形成流体汇聚; 不整合面因界面上下岩性差异大, 常发育风化淋滤带, 具备良好的渗透性。微观通道则包括砂岩颗粒间隙、矿物解理缝、溶蚀孔隙等, 是流体在岩石内部渗透扩散的主要路径。识别方法上, 宏观层面可通过地质填图、地震与电法勘查圈定高渗透带与断裂带; 微观层面可借助岩心观察、扫描电镜分析识别微观孔隙与裂隙; 地球化学层面可通过追踪铀及伴生元素(Mo、Se)异常晕、同位素比值突变带, 精准定位流体运移路径与汇聚部位。

2.3 流体运移的时空演化规律

砂岩型铀矿成矿流体运移的时空演化呈现显著的规律性, 其过程与成矿事件的发生发展紧密耦合。时间演化上, 流体运移速率与性质随成矿阶段动态变化: 成矿早期, 盆地构造活动较弱, 流体以大气降水缓慢入渗为主, 运移速率低, 流体性质接近原始降水; 成矿中期, 构造活动增强或热液参与, 流体运移速率显著提升, 同

时与围岩发生强烈水-岩反应, 导致离子组成、Eh值等性质发生明显改变; 成矿晚期, 构造活动减弱, 流体运移速率放缓, 流体逐渐进入封闭或半封闭环境, 物理化学条件趋于稳定, 为铀沉淀提供有利条件。空间演化上, 流体从铀源区(盆地周边隆起或基底富铀岩石)向矿化区(盆地内部有利构造与岩性部位)运移过程中, 呈现明显的分带特征: 近源区流体氧化程度高、铀含量高; 中部运移区流体与围岩相互作用强烈, 铀含量随络合作用动态变化; 远源矿化区流体氧化还原条件突变, 铀大量沉淀。此外, 流体运移范围与强度还受盆地结构、岩性组合等因素控制, 呈现非均一性分布特征。

3 砂岩型铀矿成矿机制核心分析

3.1 成矿流体与围岩的相互作用

成矿流体与围岩的相互作用是砂岩型铀矿成矿的关键环节, 核心表现为水-岩反应、围岩蚀变及储层物性演化三大方面。水-岩反应是最基础的作用形式, 流体与砂岩、泥岩等围岩发生溶解、沉淀、离子交换等化学反应, 一方面改造流体性质——如长石、岩屑溶解会增加流体中 Na^+ 、 K^+ 含量, 黏土矿物吸附会改变流体Eh值与铀含量; 另一方面改变围岩成分, 为铀沉淀提供物质基础。围岩蚀变是水-岩反应的直观表现, 常见蚀变类型包括绿泥石化、高岭土化、黄铁矿化等, 其中黄铁矿化多与还原环境相关, 其形成过程可消耗流体中的氧, 降低流体氧化程度, 促进铀酰络合物分解; 高岭土化则会增加围岩吸附能力, 利于铀的吸附富集。储层物性演化对流体运移与矿化富集起调控作用, 流体溶蚀作用可扩大砂岩孔隙与裂隙, 提升渗透率, 利于流体运移; 而胶结作用则会降低储层物性, 阻滞流体流动, 促使流体中的铀在局部富集沉淀, 形成矿化体^[3]。

3.2 铀矿化沉淀的核心驱动机制

砂岩型铀矿中铀的沉淀是成矿流体物理化学条件突变的结果, 核心驱动机制包括氧化还原界面控矿、吸附沉淀、流体混合及温压变化四类。氧化还原界面控矿是最普遍的核心机制, 氧化型成矿流体携带铀酰络合物运移至氧化还原界面时, 流体Eh值急剧降低, 铀酰离子被还原为低价铀离子, 稳定性下降并以沥青铀矿等形式沉淀, 界面位置多与岩性变化、构造转折或流体性质突变带吻合。吸附沉淀机制依赖围岩的吸附能力, 黏土矿物(高岭石、蒙脱石)、有机质、铁锰氧化物等可通过物理或化学吸附作用捕获流体中的铀离子, 尤其在流体中铀含量较低时, 吸附作用成为铀富集的关键。流体混合机制多发生于不同来源流体交汇区, 如大气降水与深部热液混合, 会导致流体pH值、离子组成突变, 破坏铀酰络

合物稳定性,引发铀沉淀。温压变化机制则常见于流体运移至浅部或构造减压区,温压降低会使铀酰络合物的溶解度下降,促使铀析出沉淀,在断裂带附近表现尤为明显。

3.3 多因素协同成矿机制

砂岩型铀成矿并非单一因素作用的结果,而是成矿流体与构造、岩性、氧化还原环境、有机质等多因素协同作用的产物,形成完整的成矿链条。构造因素起基础调控作用,控制盆地结构、含矿地层分布及流体运移通道,盆地边缘斜坡带、断裂交汇区等构造部位是流体汇聚与矿化定位的核心区域。岩性因素提供物质与空间保障,“砂岩储矿+泥岩隔水”的岩性组合既为流体运移与铀富集提供储集空间,又可阻滞流体流动,促进铀沉淀;砂岩的孔隙度、渗透率直接影响流体运移效率与矿化规模。氧化还原环境是铀沉淀的关键条件,氧化还原界面的形成与分布决定矿化体的空间位置。有机质则起双重作用,既是铀的还原介质,可将铀酰离子还原为低价铀,又是铀的吸附载体,显著提升铀的富集效率。成矿流体作为核心纽带,串联起铀源活化、迁移、沉淀的全过程,各因素时空匹配、协同作用,最终形成砂岩型铀矿。

4 未来研究方向

4.1 深部流体探测技术(如地球物理反演)

深部隐伏砂岩型铀矿是当下找矿重点,深部成矿流体探测对解析成矿规律很关键,地球物理反演技术潜力大。当前深部流体探测面临储层埋藏深、地质复杂、观测难等问题,要研发适配地球物理技术。可基于可控源音频大地电磁法等数据,结合先进算法,提升对深部相关区域的识别精度。同时建立地球物理响应模型,结合地球化学指标判定流体情况^[4]。另外,加强多方法联合探测,整合多源数据构建“空-地-井”一体化体系,突破深部勘查瓶颈。

4.2 多尺度流体-岩石相互作用模拟

流体-岩石相互作用贯穿铀成矿全程,但多尺度耦合机制未充分解析,多尺度模拟研究很必要。当前模拟多聚焦单一尺度,难反映完整作用过程。未来要构建

涵盖微观、介观、宏观的多尺度模拟体系,微观用分子动力学等方法解析微观过程;介观用孔隙网络模型模拟运移富集;宏观结合盆地动力学模型模拟运移演化。同时加强实验与数值模拟结合,通过实验获取参数优化模型,提升可靠性,为解析成矿和预测矿化提供工具。

4.3 人工智能在矿床预测中的应用潜力

人工智能凭借数据处理与模式识别能力,为铀矿床预测带来新思路,应用潜力大。当前铀矿预测依赖传统地质分析,存在数据利用率低、精度有限问题。未来重点开展三方面研究:一是构建多源数据融合平台,整合数据形成高质量预测集;二是研发适配人工智能模型,挖掘成矿规律建立关联模型;三是开发智能预测系统,实现自动圈定、定量评价和可视化展示。此外,加强与成矿理论结合,提升预测结果可解释性,推动找矿精准化、智能化。

结束语

砂岩型铀成矿流体的运移规律与成矿机制是成矿理论研究的核心,关乎铀资源勘查的成败。随着技术的不断创新与多学科的深度融合,有望进一步厘清成矿流体的来源、运移及成矿的完整过程,完善砂岩型铀成矿理论体系。这将为隐伏铀矿的精准找矿提供更有力的理论与技术支撑,有效提升铀资源勘查效率,为保障国家铀资源战略安全、推动核电事业可持续发展奠定坚实基础,具有重要的理论价值与实践意义。

参考文献

- [1] 韦晓艳,李增华,杜鹏飞,等.数值模拟在砂岩型铀矿流体运移机制研究中的应用[J].铀矿地质,2022,38(1):106-114.
- [2] 宋昊,侯明才,池国祥,等.砂岩型铀矿床层间氧化带氧化前锋线动态迁移成矿模式[J].东华理工大学学报(自然科学版),2025,48(4):301-315.
- [3] 贺锋,张宇龙,武正乾,等.砂岩型铀矿“源-汇”系统[J].世界核地质科学,2024,41(3):419-433.
- [4] 魏永强,江成泽,常树帅,娄汉生,牛稳,曹泽欣.综合物探方法在陕西富县地区铀矿勘查中的应用[J].矿产勘查,2021,12(03):710-717.