



开鲁盆地钱家店铀矿区铼的地球化学特征与成矿作用

陈振岩, 王雷, 崔向东, 单芝波, 宋柏荣, 张雷

引用本文:

陈振岩, 王雷, 崔向东, 单芝波, 宋柏荣, 张雷. 开鲁盆地钱家店铀矿区铼的地球化学特征与成矿作用[J]. 沉积学报, 2022, 40(3): 739–752.

CHEN ZhenYan, WANG Lei, CUI XiangDong, SHAN ZhiBo, SONG BaiRong, ZHANG Lei. Geochemical Characteristics and Rhenium Mineralization, Qianjiadian Uranium Deposit, Kailu Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2022, 40(3): 739–752.

相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

楚雄盆地北部桂花铜矿区晚白垩世含矿岩系沉积环境

Sedimentary Environments of Late Cretaceous Ore-bearing Sequences at the Guihua Copper Ore Field in the Northern Chuxiong Basin, Yunnan Province, SW China

沉积学报. 2019, 37(3): 491–501 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2018.153>

开鲁盆地陆家堡凹陷绍根地区早白垩世裂陷期后沉积构造演化与铀矿化特征

Sedimentary Tectonic Evolution and Uranium Mineralization of Post Late Cretaceous in Shaogen Area of Lujiapu Sag, Kailu Basin

沉积学报. 2018, 36(1): 20–32 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-0550.2018.005>

贵州务一正一道地区铝土矿成矿模式与找矿模型

Metallogenic and Prospecting Models of Bauxite in Wuchuan-Zheng'an-Daozhen Area, Guizhou Province

沉积学报. 2018, 36(5): 914–926 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2018.081>

铀矿沉积学研究与发展

Study and Prospect for Sedimentology of Uranium Deposit

沉积学报. 2017, 35(5): 1044–1053 <https://doi.org/10.14027/j.cnki.cjxb.2017.05.015>

成岩作用与油气侵位对砂岩铀成矿的约束——以淮南硫磺沟地区头屯河组砂岩铀成矿为例

Impact of Diagenesis and Hydrocarbon Charging on Sandstone Uranium Mineralization: An example of Toutunhe Formation in Liuhuangou area, southern Junggar Basin

沉积学报. 2016, 34(2): 250–259 <https://doi.org/10.14027/j.cnki.cjxb.2016.02.004>

文章编号: 1000-0550(2022)03-0739-14

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2021.012

开鲁盆地钱家店铀矿区铼的地球化学特征与成矿作用

陈振岩¹, 王雷¹, 崔向东², 单芝波², 宋柏荣², 张雷¹

1. 辽河石油勘探局新能源开发分公司, 辽宁盘锦 124010

2. 辽河油田勘探开发研究院, 辽宁盘锦 124010

摘要 通过对开鲁盆地钱家店铀矿床中稀散元素铼(Re)的地球化学特征研究,并结合前人成果,探讨了研究区与铀相伴生的铼元素成矿作用。结果表明,钱家店铀矿床砂岩铀矿石中稀散元素Re的含量高,已完全达到伴生矿综合利用指标,可以尝试在地浸液循环过程中加以析出。Re与Fe²⁺/Fe³⁺、Se、U及有机碳相关性好,有较密切的共生关系;与稀土元素相关性极差,揭示了相异(相反)于稀土元素表生稳定的性质。钱家店地区铼矿床的形成经历了五个阶段:铼预富集阶段、上白垩统姚家组含矿主岩形成及沉积成矿阶段、层间渗入氧化水动力主成矿阶段、古近纪浅层氧化改造及热活动铼叠加成矿阶段、新近纪油气扩散还原保矿阶段,这五个阶段与该区铀的空间分布具有较好的相似性。

关键词 铼(Re);稀散元素;钱家店;姚家组;砂岩型铼成矿

第一作者简介 陈振岩,男,1963年出生,教授级高工,火山岩、潜山油气藏和铀矿勘查,E-mail: chenzy6@petrochina.com.cn

通信作者 单芝波,男,E-mail: shanzhibo1988@163.com

中图分类号 P619.14 **文献标志码** A

0 引言

开鲁盆地位于松辽盆地西南部,钱家店凹陷属于开鲁盆地内的次级负向构造单元(图1),钱家店铀矿床位于凹陷的北部,该矿床规模目前已达到超大型砂岩型铀矿床的标准。关于该矿床铀地球化学的研究,前人已做过较多工作^[1-13],并取得了一系列的研究成果。但有关与铀相伴生的超常富集元素铼的地球化学方面研究未见报道。前人对铼的超常富集成矿机制、成矿规律和找矿预测方面的研究成果很少,且集中于以辉钼矿为铼成矿载体和回收对象的研究^[14-19],砂岩型铀矿中伴生的铼仅少数学者在多年前做过初步分析^[20-25],对于松辽盆地钱家店特大型铀矿床中铼的研究,尚属于空白领域。

铼(Rhenium),原子序数为75,原子量为186.31,位于元素周期表中第6周期的第7族。在地壳中丰度极低(平均 0.5×10^{-9})^[26],且难以形成独立的矿物,因此被称为稀散元素。铼的地球化学性质相似于钼,且具中等的亲铜性质,因此常以类质同象的形

式赋存于辉钼矿中^[27]。在自然界,Re有多种形式的价态,以Re⁴⁺和Re⁷⁺为最稳定的两种价态,前者稳定于还原条件下,后者则稳定于氧化条件下,在天然水中以ReO⁴⁺存在。铼的高熔点(3 180 °C),高沸点(5 627 °C),具有耐热、耐腐蚀、耐磨等特性,使之广泛应用于航空、航天、电子及机械工业等特殊行业^[20]。目前对于伴生铼矿床的划分方案较多,黄凡等^[28]将中国铼矿床划分为斑岩型、矽卡岩型、碳酸岩脉型、石英脉型、热液脉型、沉积砂岩型、黑色页岩型和煤型。铼多伴生于铜钼或钼矿床中,其矿床类型划分与铜钼矿或钼矿床类型具有一致性;以内生矿床为主,其中斑岩型和矽卡岩型矿床占资源总量90%以上,而沉积砂岩型铼矿目前仅在伊犁盆地中报道并尚处于初步研究阶段^[25]。

近年来铀矿石中呈超富集状态的Re、Sc等伴生元素引起了人们的关注,据粗略资源量估算,在钱家店地区部分伴生元素规模显著较高,结合低成本开采工艺,伴生矿床的发现可创造更大的经济效益。然而,对于伴生元素的产出状态、富集规律、资源储

收稿日期:2020-07-06;收修改稿日期:2020-12-26

基金项目:国家重点研发计划(2018YFC0604205);中国石油天然气集团公司科学研究与技术开发项目(2019A-4809(GF)) [Foundation: National Key Research and Development Project, No. 2018YFC0604205; Scientific Research and Technology Development Project of CNPC, No. 2019A-4809(GF)]

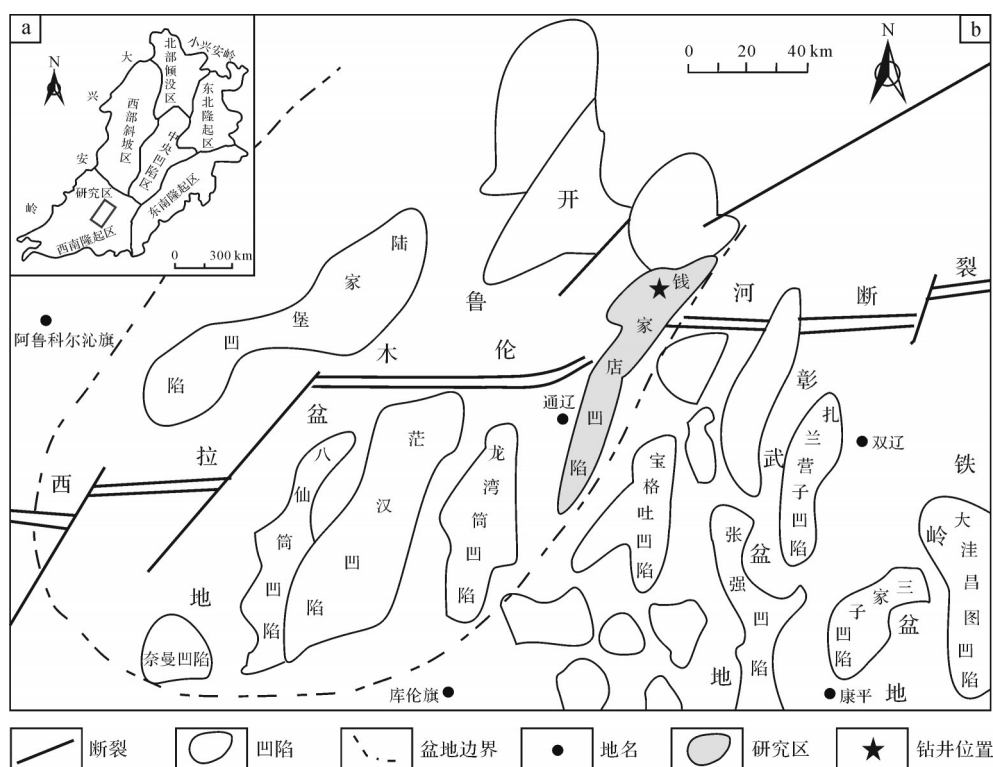


图1 开鲁盆地内部构造单元与断裂分布

Fig.1 Simplified tectonic map showing the interior units and faults of the Kailu Basin

量等信息,还处于未知阶段。钱家店铀矿区伴生元素Re的研究程度较低,甚至还没有公开的分析测试数据及相关论述。因此,选取钱家店矿区重点钻孔为载体,以铀为研究对象,从统计学角度通过聚类分析为元素的共生组合研究提供有意义的信息,探索不同化学组分迁移和富集规律,分析地球化学指标对铀成矿的约束作用,进一步了解该地区元素变化规律及成矿过程,指导区域找矿工作。本文的研究成果为该地区针对铀元素地球化学研究的第一手资料,对今后铀元素的分布、存在形式及综合利用价值的查明有极其重要的理论意义,同时也为实现“一矿变多矿”的长远规划贡献力量。这些研究不仅具有战略意义,同时也有重要的国民经济意义。钱家店地区铀矿石中Re含量已达到可综合利用的标准 $(0.2\sim 10)\times 10^{-6}$ ^[29],本文旨在通过对此矿床Re的地球化学特征研究,以期对今后Re的找矿及勘探开发提供有益的参数。

1 地质概况

1.1 构造特征

松辽盆地是我国东北最大的沉积盆地,是在前

中生代海西褶皱带基础上发展起来的中新生代沉积盆地。开鲁拗陷位于松辽盆地西南部,总面积约 $3.1\times 10^4\text{ km}^2$ ^[6]。钱家店凹陷位于开鲁拗陷的北东部,呈北东—南西向带状展布,长约100 km,宽约9~20 km,面积1 280 km²,为中生代断拗型凹陷,下白垩统为断陷,是石油勘探的目的层位,上白垩统为拗陷,是铀矿勘探的目的层。钱家店凹陷上白垩统整体为北高南底的构造形态,可划分为北部斜坡带和南部洼陷带两个二级构造单元。北部斜坡带发育较多的沟槽和隆起,断裂较发育,总体为近北向及北东向展布,其中,西部发育一条贯穿上下白垩统地层的断裂,断距大,延伸距离长,早期为正断层,晚期北部发生构造反转变为逆断层,北部地区由于构造抬升强烈,遭受剥蚀形成一大型构造天窗,对钱家店铀矿床的形成起到了重要的控制作用;南部洼陷带呈北东向条带状展布,构造形态相对简单,断裂发育较少,仅发育几条延伸距离较短的正断层。矿区构造总体上表现为向北西缓倾斜的NE向箕状断陷,地层总体上表现为NW向缓倾,倾角 $5^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 。矿区断裂构造主要发育有NNE、NW向和近EW向3组^[3]。

1.2 地层和岩浆岩特征

矿区发育地层自下而上为上白垩统青山口组(K_2qn)、姚家组(K_2y)、嫩江组(K_2n)和第四系(Q),缺失四方台组—古近系。青山口组以紫红色泥岩和浅红色细砂岩为主,底部砂岩部分含泥砾,厚约120 m,与上覆姚家组呈平行不整合接触关系;姚家组可划分为姚上段和姚下段,姚下段以浅灰色细砂岩、浅红色细砂岩为主,夹灰色泥岩、紫红色泥岩,厚约80 m;姚上段以浅灰色细砂岩、浅灰色含泥砾细砂岩为主,夹紫红色、浅灰色泥质粉砂岩。厚约70 m,与上覆嫩江组地层呈整合接触关系;嫩江组上部以灰色泥岩为主,夹浅灰色泥质粉砂岩,下部以浅灰色细砂岩为主,夹浅红色泥岩、浅红色泥质粉砂岩,厚约210 m,与上覆新生界呈角度不整合接触关系;第四系灰黄色表土层、灰黄色砂砾层,厚约110 m。姚家组为本区的主要含矿层位。钱家店铀矿床铀矿体主要赋存于姚上段下部砂体和姚下段下部砂体^[3]。

姚家组地层主要发育辫状河沉积,姚下段与姚上段均可划分出多个下粗上细的沉积韵律,沉积韵律底部多见河流下切所形成的冲刷构造,自冲刷面向上岩性由粗砂岩、中砂岩向粉砂岩泥岩过渡。

姚家组地层砂体连通性好,单砂体厚度可达30~40 m左右,具有交错层理、水平层理及块状层理,岩性以浅灰色细砂岩、浅红色细砂岩、浅灰色含泥砾细砂岩为主,夹紫红色、浅灰色泥质粉砂岩;大多具有中细粒结构,砂体分选性总体中等—好,磨圆为次棱角—次圆状,物性条件较好。

辽河外围地区构造运动比较活跃,岩浆活动频繁,岩浆岩十分发育并广泛分布。无论是侵入岩还是喷出岩,都以燕山旋回形成的最为重要。该旋回的岩浆活动强烈,分布广泛。侵入岩以花岗岩类侵入为主,次为闪长岩类。喷出岩虽以安山岩常见,但不乏酸性岩类,特别是在研究区西侧的大兴安岭地区。矿区内辉绿岩发育,且与铀矿床的形成具密切的关系(图2)。

1.3 铀矿化特征

区内铀矿体主要赋存于上白垩统姚家组灰色砂体中,矿体呈板状、似层状,倾角约 1° ~ 3° 。平面上,呈北东—南西向展布,与层间氧化带前锋线展布方向基本一致,铀矿体具由北向南缓倾、东西两端翘起的特点,形态较复杂。铀矿体长500~2 500 m,宽200~600 m,厚度集中于2.3~7.5 m,最厚达18.5 m,岩石疏松,渗透性好。

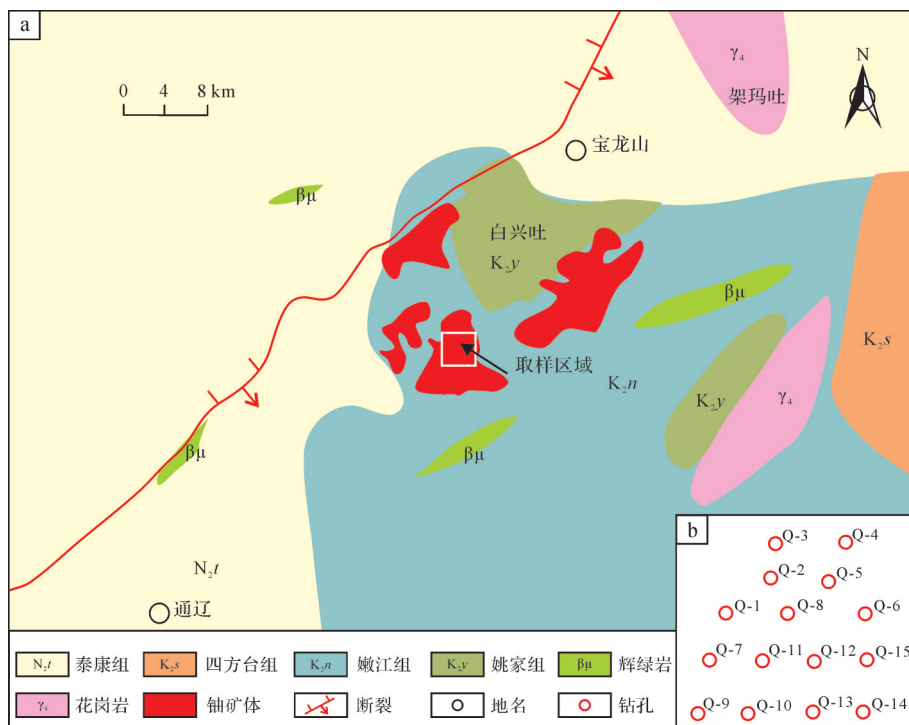


图2 钱家店地区铀矿床地质示意图(a)和主要研究钻孔分布图(b)

Fig.2 Schematic diagram of uranium deposit:(a) geological map of Qianjiadian area; and (b) borehole distribution

钱家店铀矿床矿石类型以灰白色、浅灰色中细粒岩屑长石细砂岩为主(图3),成分成熟度和结构成熟度较低,分选较差,磨圆度中等—较差,为次棱角状—次圆状。碎屑成分主要为长石、岩屑和石英,长石以钾长石为主,斜长石较少;岩屑以中酸性火山岩和浅成侵入岩为主,次为花岗质岩屑、泥岩岩屑^[13]。铀矿石以杂基支撑为主,其次为颗粒支撑和颗粒—杂基支撑;杂基主要为高岭石、伊蒙混层等黏土矿物,胶结物主要为方解石和白云石,偶见重晶石^[9,30]。铀的存在形式以铀矿物、吸附铀为主,含铀矿物较少,其中铀矿物为粒状、团块状沥青铀矿,吸附铀的载体主要为有机质及黏土矿物,含铀矿物主要为碎屑锆石^[3,8]。本地区铀矿石中铯含量较高,多已达到综合利用标准,铯矿石与铀矿石复合产出。

2 样品采集与测试分析

研究样品均采自钱家店铀矿床上白垩统姚家组赋矿砂岩。主量、微量及稀土元素分析测试工作均在核工业北京地质研究院分析测试研究所完成,主量元素在飞利浦PW2404X射线荧光光谱仪上完成,依据GB/T 14506.28—1993硅酸盐岩石化学分析方法X射线荧光光谱法测定主、次量元素,相对偏差<5%。微量元素和稀土元素依据DZ/T 0223—2001电

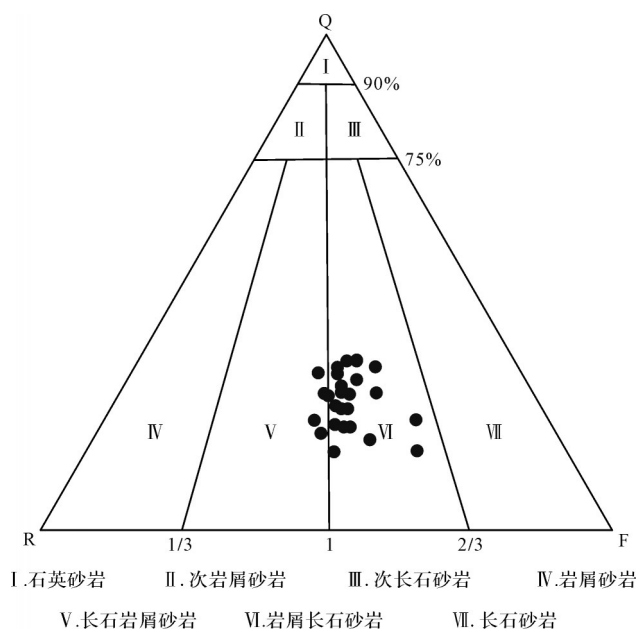


图3 钱家店地区姚家组砂岩分类三角图

Q. 石英; R. 其它岩屑+燧石; F. 长石+火成岩屑

Fig.3 Triangular diagram of sandstone from the Yaojia Formation in the Qianjiadian area

感耦合等离子体质谱(ICP-MS)方法通则,在Finnigan MAT的HR-ICP-MS(Element I)上进行,溶样和分析流程采用Liang *et al.*^[31],分析精度优于3%。

对15口井207件铀矿石及围岩样品测定U, Se, V, Re, Mo的含量,测试单位为核工业二〇三研究所,其中U含量测试仪器为MUA型激光荧光仪(核工业北京地质研究院制造),检测方法依据EJ/T 550—2000; Se含量测试仪器为AFS-230E(海光制造),检测方法依据EJ/T 754—1993; V含量测试仪器为AxiosX射线光谱仪(荷兰帕纳科制造),检测方法依据DZ/T 0279.1—2016; Re, Mo的含量测试仪器为XSERIES2型ICP-MS(ThermoFisher)制造,检测方法依据DZ/T 14506.30—2010。

3 分散元素Re地球化学特征

3.1 Re的含量特征

对207个砂岩铀矿石及围岩样品测试分析,并加以归纳总结,结果表明,U、Re的平均含量分别为 212.41×10^{-6} 和 0.24×10^{-6} , U、Re的含量变化系数分别为121.9%和137.6%,其中52.17%样品U含量高于 100×10^{-6} , 85.51%的样品Re含量高于 0.2×10^{-6} , U、Re在矿体中平均含量分别为 292.5×10^{-6} 和 0.72×10^{-6} ,最高分别达 $1\ 319.0 \times 10^{-6}$ 和 2.6×10^{-6} ,据Taylor *et al.*^[26]可知,陆壳中U、Re丰度分别为 2.8×10^{-6} 和 0.5×10^{-9} ,得出钱家店铀矿体相对陆壳平均富集系数为104.5,最高达471.1,铯矿体相对陆壳平均富集系数为1 440,最高达5 200。在矿体以外的砂岩围岩中,U、Re的平均含量分别为 35.6×10^{-6} 和 0.09×10^{-6} ,变化范围分别为 $0 \sim 76.6 \times 10^{-6}$ 和 $0 \sim 0.18 \times 10^{-6}$ 。根据中华人民共和国核行业标准,2002《地浸砂岩型铀矿地质勘查规范》^[32]中Re在可地浸砂岩中的综合利用指标($>0.2 \times 10^{-6}$),钱家店铀矿床中分散元素Re已完全达到可综合利用的指标。

3.2 Re与U、还原剂指标及伴生元素的关系

元素之间的共生组合规律是对地球化学元素进行组合异常分析的前提,运用多元统计分析方法中的聚类分析能很好的完成这一任务^[33-34]。本文采用R型聚类分析法对Re与主量元素、微量元素、稀土元素及还原剂指标做数学处理,建立等价矩阵,计算不同组分间的相关系数(R),同时作聚类分析谱系图。据相关系数(R)可判断组分间亲密程度,越接近1,亲密程度越高。通过观察Pearson简单相关系数在某

一取值范围判断变量的相关强度:相关系数0.8~1.0 极强相关;0.6~0.8 强相关;0.4~0.6 中等程度相关;0.2~0.4 弱相关;0~0.2 极弱相关或无相关^[35]。厘定 Re 与不同化学组份之间的亲疏关系,进而探讨 Re 在该区的迁移富集规律及成矿控制因素。

通过钱家店铀矿床中 Re 与 U、还原剂指标及伴生元素的 R 型聚类谱系图(图 4a)及相关性矩阵(表 1)的分析对比,可获得以下 2 点重要信息:

(1) Re 与 Fe²⁺/Fe³⁺、Se 和 U 聚合为一组,表明四者有较密切的共生关系。尤其是 Re 与 Fe²⁺/Fe³⁺首先聚合在一起,相关性达 0.802,反映氧化还原对 Re 富集的重要作用;与 U 和 Se 相关性强(分别为 0.726 和 0.501,暗示出在表生作用条件下三者具一定的地球化学相似性,据此推测 Re 和 U 具有类似的分布特征。

(2) Re 虽未与有机碳和全硫聚合为一组,然而三者相关性仍较高,分别达 0.631 和 0.445,暗示了 Re 的存在形式与有机碳和全硫存在更密切的关系。

3.3 Re 与主量元素的关系

Re 与岩石中主要组份的 R 型聚类分析结果(图 4b、表 2)如下:

(1) Re 与 CaO、Na₂O、K₂O 和 SiO₂ 聚合为一组,表明了 Re 的活化、迁移、沉淀富集与表生条件下活性组份的迁移、沉淀富集规律存在一定的关系。Re 与 CaO 首先聚合为一组,表明 Re 同铀活化迁移及沉淀机制相似,可能在弱碱性条件下形成络合物迁移,随物理化学条件的变化,沉淀聚集,同时钙析出沉淀。大量的镜下观察与化学分析显示, SiO₂ 含量在过渡带(矿石带)有较明显的升高或局部升高的趋势,暗示了成矿流体的碱性溶蚀作用。

(2) Al₂O₃、TiO₂、P₂O₅ 等惰性组份聚合为一组,与镜下黏土矿物、金红石及磷灰石等富集相吻合。除氧化还原作用外,具强吸附作用的高孔隙度矿物对 Re 的富集关系密切,部分样品高 Re 含量可能与黏土矿物吸附有关。与 Re 强烈分离,同样表明 Re 在该区表生环境下的活跃性,同时验证了聚类分析对元素性质判别的科学性。

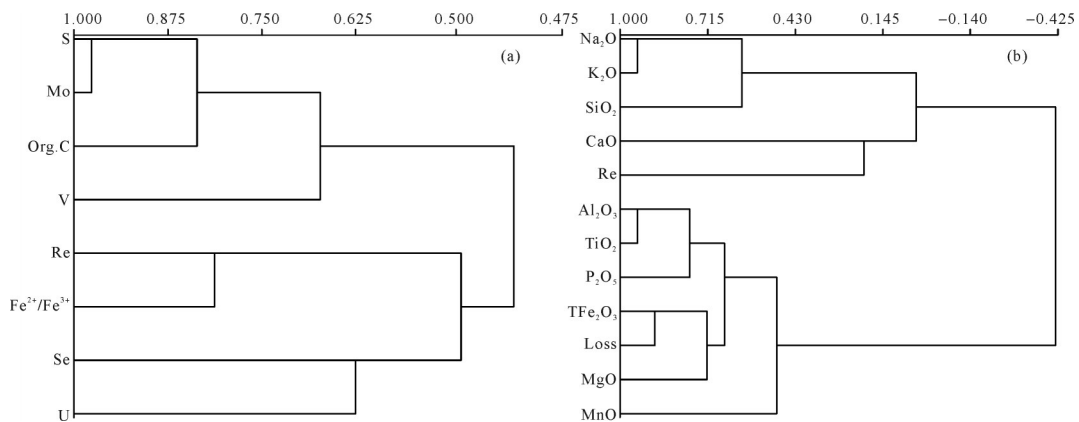


图 4 Re 与 U、还原剂指标及伴生元素(a)和主量元素 R 型聚类分析谱系图(b)

Fig.4 Uranium, reductant index and associated elements (a) with rhenium R-type cluster analysis spectrum; and (b) R-type cluster analysis spectrum for major elements

表 1 钱家店地区姚家组 Re 与 U、还原剂指标及伴生元素相关矩阵

Table 1 Uranium, reductant index and associated elements with rhenium correlation matrix for Yaojia Formation in the Qianjiadian area

	U	S	V	Mo	Se	Org.C	Fe ²⁺ /Fe ³⁺	Re
U	1.000							
S	0.513	1.000						
V	0.359	0.646	1.000					
Mo	0.632	0.957	0.668	1.000				
Se	0.625	0.061	0.432	0.261	1.000			
Org.C	0.531	0.813	0.659	0.843	0.411	1.000		
Fe ²⁺ /Fe ³⁺	0.521	0.498	0.235	0.516	0.243	0.610	1.000	
Re	0.726	0.445	0.103	0.498	0.501	0.631	0.802	1.000

表2 钱家店地区姚家组Re与主量元素相关矩阵

Table 2 Major elements with rhenium correlation matrix for Yaojia Formation in Qianjiadian area

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TFe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅	Loss	Re
SiO ₂	1.000											
Al ₂ O ₃	-0.913	1.000										
TFe ₂ O ₃	-0.818	0.562	1.000									
MgO	-0.879	0.738	0.689	1.000								
CaO	-0.005	-0.198	0.035	0.372	1.000							
Na ₂ O	0.595	-0.411	-0.806	-0.347	0.214	1.000						
K ₂ O	0.605	-0.456	-0.719	-0.390	0.135	0.961	1.000					
MnO	-0.479	0.443	0.254	0.667	0.337	-0.129	-0.288	1.000				
TiO ₂	-0.916	0.943	0.607	0.721	-0.156	-0.518	-0.593	0.547	1.000			
P ₂ O ₅	-0.667	0.753	0.292	0.655	-0.205	-0.133	-0.229	0.740	0.781	1.000		
Loss	-0.951	0.792	0.887	0.779	-0.057	-0.741	-0.715	0.334	0.845	0.531	1.000	
Re	0.329	-0.569	0.150	-0.354	0.234	-0.268	-0.121	-0.510	-0.513	-0.824	-0.112	1.000

3.4 Re与微量元素的关系

Re与Tl、Zr和Cd聚合为一组,反映了四者之间紧密的共生关系(图5a、表3)。且铼与Tl的相关系数为0.912,在0.8~1的范围内,为极强正相关性,暗示了铼与铊同为稀散元素,含量低,地球化学相近的特征;铼与Zr的相关系数为0.613,在0.6~0.8的范围内,为强正相关性,沉积岩中Zr元素常富集于稳定锆石中,Re与Zr含量的强相关反映了部分Re可能以锆石为依托,在稳定的重矿物中赋存,该部分Re难以地浸溶出,后期开采需重点研究。铼与Cd的相关系数为0.693,在0.6~0.8的范围内,为强正相关,镉同样为典型的稀散元素,且与Re地球化学相似,为亲硫元素^[27],钱家店地区姚家组黄铁矿的富集为Re和Cd的

沉淀提供了条件,另外镉的碳酸盐同为表生环境下重要的沉淀方式,这与本区铀的搬运富集模式相一致。

3.5 Re与稀土元素的关系

重稀土、中稀土、轻稀土呈现出较好的分类聚合关系(图5b、表4、5);Re与稀土元素的聚类趋势不明显,存在明显的不相关性。相关系数值均接近于0,即可认为该元素与稀土元素之间相关性极弱,不存在明显的正相关或负相关性,钱家店地区Re与轻稀土元素相关性介于0.314~0.405,相关性弱;与中稀土元素相关性介于0.045~0.174,极弱相关,与重稀土元素相关性介于0.038~0.042,极弱/无相关。表明Re与重稀土元素在表生环境下具高度稳定性性质相反,有较好的活跃性。

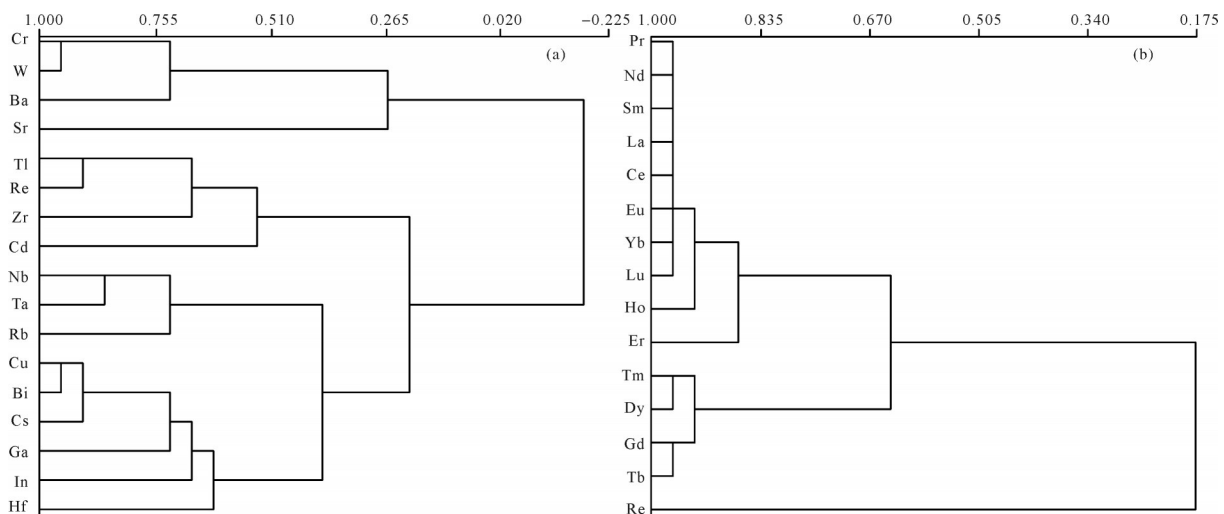


图5 Re与微量元素(a)和稀土元素R型聚类分析谱系图(b)

Fig.5 Trace elements with (a) rhenium R-type cluster analysis spectrum; and (b) rare earth elements R-type cluster analysis spectrum

表3 钱家店地区姚家组Re与微量元素相关矩阵

Table 3 Trace elements with rhenium correlation matrix for Yaojia Formation in Qianjiadian area

	Cr	Cu	G	Rb	Sr	Nb	Cd	In	Cs	Ba	Ta	W	Tl	Bi	Zr	Hf	Re
Cr	1.000																
Cu	-0.281	1.000															
Ga	-0.429	0.749	1.000														
Rb	-0.359	0.015	0.580	1.000													
Sr	0.267	-0.045	-0.277	-0.071	1.000												
Nb	-0.512	0.501	0.742	0.625	-0.207	1.000											
Cd	0.139	0.496	0.379	-0.342	-0.182	-0.104	1.000										
In	-0.615	0.685	0.617	0.357	0.227	0.626	0.091	1.000									
Cs	-0.309	0.899	0.733	0.251	0.199	0.629	0.226	0.783	1.000								
Ba	0.737	-0.238	-0.064	0.232	0.322	-0.209	-0.094	-0.401	-0.138	1.000							
Ta	-0.284	0.250	0.616	0.811	-0.211	0.863	-0.350	0.370	0.412	0.141	1.000						
W	0.983	-0.313	-0.417	-0.271	0.200	-0.435	0.018	-0.622	-0.330	0.767	-0.151	1.000					
Tl	-0.056	0.235	0.609	0.372	-0.400	0.429	0.584	0.227	0.120	0.051	0.340	-0.056	1.000				
Bi	-0.196	0.968	0.728	0.063	0.095	0.488	0.448	0.643	0.925	-0.096	0.289	-0.228	0.176	1.000			
Zr	-0.140	0.325	0.687	0.421	-0.746	0.593	0.302	0.063	0.206	0.060	0.581	-0.072	0.738	0.253	1.000		
Hf	-0.217	0.702	0.490	0.146	0.050	0.735	-0.112	0.603	0.782	-0.120	0.568	-0.156	0.004	0.697	0.294	1.000	
Re	0.075	0.146	0.453	0.213	-0.367	0.179	0.693	0.019	-0.023	0.121	0.150	0.048	0.912	0.133	0.613	-0.220	1.000

表4 钱家店地区姚家组Re与稀土元素相关矩阵

Table 4 Rare earth elements with rhenium correlation matrix for Yaojia Formation in Qianjiadian area

	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Re
La	1.000														
Ce	0.943	1.000													
Pr	0.984	0.936	1.000												
Nd	0.950	0.967	0.968	1.000											
Sm	0.814	0.928	0.819	0.918	1.000										
Eu	0.606	0.765	0.570	0.712	0.894	1.000									
Gd	0.646	0.825	0.615	0.764	0.936	0.965	1.000								
Tb	0.560	0.773	0.537	0.698	0.904	0.965	0.989	1.000							
Dy	0.547	0.765	0.520	0.680	0.890	0.959	0.982	0.997	1.000						
Ho	0.514	0.739	0.480	0.644	0.858	0.944	0.970	0.988	0.996	1.000					
Er	0.523	0.748	0.491	0.656	0.864	0.942	0.972	0.989	0.996	0.999	1.000				
Tm	0.533	0.753	0.500	0.664	0.868	0.942	0.975	0.988	0.995	0.999	0.999	1.000			
Yb	0.532	0.754	0.501	0.663	0.872	0.940	0.973	0.989	0.996	0.997	0.998	0.999	1.000		
Lu	0.508	0.734	0.476	0.641	0.856	0.935	0.964	0.985	0.994	0.997	0.998	0.997	0.998	1.000	
Re	0.405	0.288	0.358	0.286	0.314	0.174	0.191	0.121	0.099	0.045	0.042	0.048	0.074	0.038	1.000

表5 钱家店地区姚家组砂岩主量元素(wt.%)、微量元素($\times 10^{-6}$)和稀土元素($\times 10^{-6}$)分析结果Table 5 Chemical compositions of metasedimentary rocks from the Yaojia Formation Qianjiadian area (major elements (%); trace elements ($\times 10^{-6}$); rare earth elements ($\times 10^{-6}$))

样品号	II-1	II-2	II-3	II-4	II-5	II-6	II-7	II-8	II-9	II-10	II-11	II-12
SiO ₂	74.01	69.49	65.64	77.02	76.71	75.50	79.25	76.16	77.21	72.91	76.24	75.46
Al ₂ O ₃	12.97	14.80	15.70	12.43	11.56	12.51	10.27	12.48	12.21	13.43	11.60	10.70
TFe ₂ O ₃	2.40	3.26	4.32	1.45	1.73	2.48	2.16	1.81	1.66	3.45	2.72	3.35
MgO	0.59	0.55	0.80	0.19	0.34	0.30	0.16	0.31	0.22	0.31	0.17	0.43
CaO	0.84	0.53	0.43	0.30	0.95	0.39	0.24	0.67	0.39	0.29	0.24	1.21
Na ₂ O	1.92	1.62	1.51	1.91	1.83	1.63	1.71	1.78	1.73	1.60	1.71	1.65
K ₂ O	3.69	3.27	3.22	3.70	3.51	3.30	3.46	3.52	3.44	3.35	3.50	3.40

续表

样品号	II-1	II-2	II-3	II-4	II-5	II-6	II-7	II-8	II-9	II-10	II-11	II-12
MnO	0.10	0.13	0.08	0.02	0.05	0.06	0.06	0.06	0.05	0.02	0.01	0.06
TiO ₂	0.41	0.75	0.72	0.41	0.39	0.43	0.29	0.41	0.40	0.48	0.37	0.32
P ₂ O ₅	0.17	0.20	0.19	0.13	0.12	0.13	0.14	0.13	0.12	0.11	0.11	0.08
Loss	2.40	4.92	7.02	2.01	2.26	2.84	1.72	2.20	2.12	3.60	3.32	3.33
U	465	110	448	525	138	118	130	190	253	728	677	1268
S	0.02	0.06	0.03	0.11	0.08	0.11	0.07	0.05	0.10	0.54	0.20	0.20
V	33.5	75.9	24.2	70.5	42.8	43.3	44.9	20.7	24.5	94.2	29.4	68.0
Mo	0.46	0.80	0.70	1.01	1.10	0.85	1.03	0.95	1.13	17.20	3.17	8.65
Se	0.40	0.95	0.37	0.41	0.15	0.51	0.17	0.16	0.18	0.27	0.07	2.10
Org.C	0.02	0.10	0.02	0.07	0.10	0.22	0.24	0.02	0.09	0.44	0.15	0.37
Fe ²⁺ /Fe ³⁺	1.20	1.14	1.48	2.58	2.07	2.01	2.73	2.84	2.11	2.82	2.47	3.41
Re	0.22	0.25	0.34	0.35	0.36	0.42	0.45	0.46	0.50	0.51	0.65	0.88
Li	28.8	23.6	20.7	26.6	23.8	28.6	20.8	21.8	29.4	28.7	34.5	38.3
Be	1.46	1.36	1.20	1.80	1.48	1.87	1.67	1.58	1.91	1.94	2.91	2.35
Cr	12.80	19.90	8.74	12.40	10.80	15.90	25.70	131.00	12.20	11.20	14.10	23.90
Co	8.00	4.63	5.97	5.66	7.34	7.70	12.30	11.00	7.55	4.89	20.80	8.89
Ni	19.70	7.10	6.52	7.55	9.12	12.30	17.80	15.80	9.93	8.73	26.10	26.10
Cu	13.80	9.40	7.74	11.10	7.14	14.60	14.80	7.05	7.93	10.00	9.87	13.40
Zn	41.1	43.1	37.1	18.7	37.5	42.2	43.4	74.5	37.7	69.9	47.9	149.0
Ga	14.5	13.4	11.2	14.2	12.7	15.5	13.5	11.4	13.3	14.0	14.6	16.0
Rb	112.0	119.0	101.0	128.0	119.0	123.0	93.5	104.0	121.0	126.0	114.0	125.0
Sr	184.0	338.0	249.0	304.0	282.0	292.0	299.0	295.0	240.0	199.0	146.0	238.0
Nb	11.70	9.72	9.04	10.60	9.58	11.00	8.74	7.90	11.00	9.60	9.20	12.00
Cd	0.18	0.21	0.16	0.10	0.13	0.29	0.75	0.33	0.16	0.24	0.60	0.68
In	0.04	0.04	0.03	0.04	0.03	0.04	0.04	0.02	0.03	0.03	0.03	0.04
Sb	1.70	1.56	1.61	2.24	1.96	2.43	1.55	3.02	3.14	4.18	9.35	7.43
Cs	5.03	4.48	3.01	4.39	3.50	5.33	4.94	3.07	3.66	4.13	3.17	4.92
Ba	560	732	556	705	633	839	531	989	673	687	673	683
Ta	0.90	0.76	0.73	0.90	0.81	0.90	0.66	0.75	0.88	0.84	0.76	0.90
W	2.04	1.31	1.35	1.75	1.44	2.02	1.24	11.00	1.46	1.60	1.32	2.23
Tl	0.94	0.78	0.79	1.32	1.03	1.40	0.76	1.17	1.50	1.71	3.34	5.95
Pb	20.0	20.5	22.0	21.7	25.4	26.6	26.2	32.4	29.2	27.1	54.3	59.5
Bi	0.20	0.14	0.11	0.16	0.12	0.24	0.22	0.12	0.13	0.15	0.14	0.20
Zr	184	141	142	144	136	171	131	150	168	173	191	199
Hf	5.31	3.96	3.91	4.13	3.44	4.92	3.94	3.53	3.89	3.61	3.12	4.47
La	22.4	32.6	32.6	28.9	29.8	37.7	30.8	29.9	35.0	34.6	29.6	34.3
Ce	41.0	61.2	61.8	52.5	60.9	84.1	60.5	59.0	69.9	65.2	55.8	64.5
Pr	4.96	7.32	7.45	6.32	6.62	8.39	7.08	6.98	8.04	7.75	6.71	7.42
Nd	19.2	26.2	28.6	23.3	25.9	33.5	26.2	26.9	29.8	29.6	25.1	27.1
Sm	3.65	4.12	5.18	3.84	4.75	6.94	4.73	4.79	5.37	5.13	4.72	5.01
Eu	0.90	0.83	1.00	0.73	0.93	1.44	0.80	0.89	0.97	0.97	0.90	1.01
Gd	3.40	3.05	4.17	3.02	4.47	7.34	3.69	3.77	4.34	4.46	3.84	4.31
Tb	0.64	0.50	0.72	0.46	0.80	1.38	0.64	0.67	0.76	0.71	0.64	0.73
Dy	3.48	2.51	4.00	2.46	4.48	8.50	3.46	3.59	4.26	3.67	3.30	4.09
Ho	0.67	0.45	0.75	0.48	0.89	1.81	0.65	0.65	0.77	0.67	0.57	0.76
Er	1.96	1.31	2.26	1.48	2.68	5.40	1.91	2.01	2.37	2.03	1.69	2.24
Tm	0.32	0.21	0.37	0.25	0.43	0.85	0.32	0.32	0.38	0.34	0.27	0.36
Yb	2.02	1.35	2.29	1.58	2.65	5.10	2.05	2.09	2.47	2.10	1.74	2.37
Lu	0.33	0.21	0.37	0.24	0.43	0.82	0.32	0.32	0.39	0.31	0.26	0.37

4 Re的成矿作用探讨

前人通过对钱家店铀矿床成因的深入研究,并与国内经典的层间氧化带型砂岩铀矿床(如伊犁砂岩型铀矿床)相对比,钱家店地区铀成矿作用尤其独特,铀矿化异常以及铀矿体的形成与下白垩统的断陷层的还原性流体、上白垩统拗陷层的辫状河流相砂体、多期次活动的贯通式断裂、后期形成的构造天窗以及层间氧化作用具有密切关系。本地区铼与铀的表生地球化学性质具有相似性,同为氧化还原敏感元素,因此其表生地球化学行为在该区表现出与铀成矿聚集作用的一致性,同样经历了铼预富集阶段、上白垩统姚家组含矿主岩形成及沉积成矿阶段、层间渗入氧化水动力主成矿阶段、古近纪浅层氧化改造及热活动铼叠加成矿阶段、新近纪油气扩散还原保矿阶段5个阶段。

4.1 铼预富集阶段

作为钱家店地区物源区,松辽盆地南缘的燕山期造山带广泛发育放射性异常地质体,早期风化剥蚀出大量含铀矿物的碎屑颗粒,致使姚家组地层铀矿物的原始预富集。宫文杰等^[36]系统归纳总结了松辽盆地各个蚀源区主要岩性的铀含量值,结果显示,南部燕山期造山带侵入岩及喷出岩铀含量较高,并且存在较多的地面铀异常点、带,存在铀迁移现象。本次研究在总结前人资料的基础上,采集并测试了蚀源区各类岩性Re含量,结果表明,Re与铀在岩浆岩中含量相对较高,Re含量介于 $(0.4\sim 1.3)\times 10^{-9}$,U含量介于 $(2.3\sim 11.2)\times 10^{-6}$ (图6),显著高于地壳中Re和

U的平均含量(分别为 6.57×10^{-10} 和 2.07×10^{-6})^[37],预富集均具强烈的母岩专属性,中酸性岩浆岩为共同优质源岩。蚀源区富Re的岩石为钱家店地区姚家组沉积提供了充足的物质来源,同时也为后期铀矿的聚集奠定了坚实的基础。

4.2 上白垩统姚家组含矿主岩形成及沉积成矿阶段

晚白垩世拗陷演化阶段,该区构造运动发生明显变革,从强烈的伸展环境向弱伸展热沉降拗陷转化,进而在本区发育辫状河沉积体系。沉积了一套以浅灰、灰白色为主的砂岩类,以泥砾岩为主的砾岩类,以浅灰色、深灰色及紫红色为主的粉砂岩和泥岩类等有利的成矿砂体。此砂体受辫状河沉积体系控制,其中的河道和心滩沉积砂体对成矿最为有利,并且在该区分布具有较大的范围和规模^[38]。姚家组沉积一成岩期,在下白垩统深部的还原性流体及上白垩统青山口、嫩江组暗色泥岩还原性压榨水的共同作用下,姚家组原生灰色沉积砂岩发生了铼的初始富集,铼含量增高显著,一般位于 $(0.055\sim 0.133)\times 10^{-6}$ 之间,最高达 0.218×10^{-6} (表6)。局部地段已经达到了铼异常或铼矿化,然而总体铼品位依然较低。不同岩性中Re含量具明显的差异,其中原生红色砂岩和红色泥岩中Re含量变化不大,都显示出微弱含量特征;平均含量分别为 0.032×10^{-6} 和 0.045×10^{-6} ,而原生灰色砂岩及灰色泥岩中Re含量均显著富集,平均含量分别为 0.084×10^{-6} 和 0.315×10^{-6} ,表明沉积期氧化还原作用对Re富集具有重要控制作用。

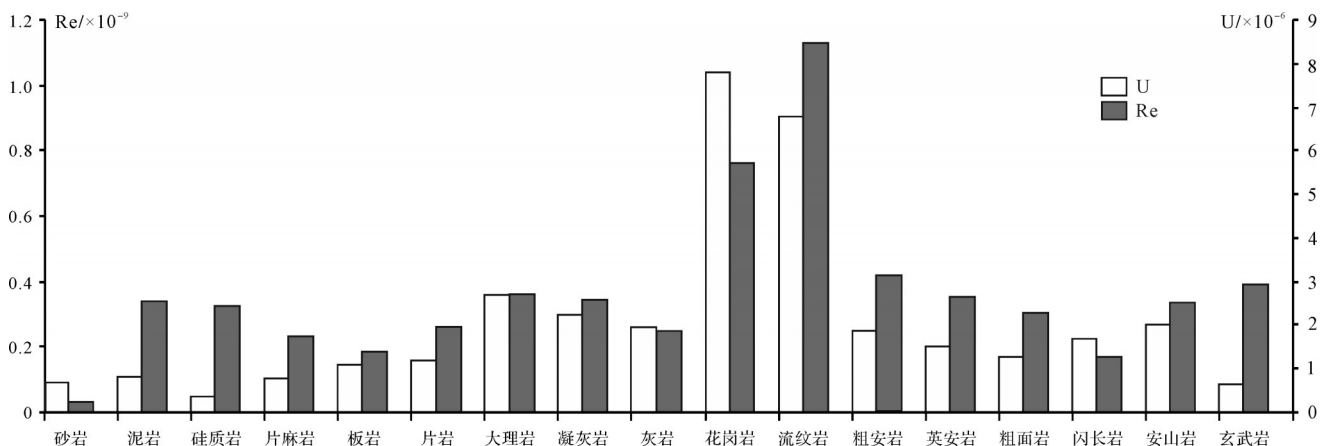


图6 钱家店铀矿床蚀源区不同岩性Re及U含量对比图^[36]

Fig.6 Comparison of rhenium and uranium contents with different lithology in the erosion source area of Qianjiadian uranium deposit^[36]

表6 钱家店地区姚家组不同原生岩石类型Re含量分析结果

Table 6 Analysis results of Re content of different primary rock types in Qianjiadian area

岩性	数量/个	Re含量变化区间/ $\times 10^{-6}$	Re含量平均值/ $\times 10^{-6}$
原生灰色细砂岩	56	0.055~0.218	0.084
原生红色细砂岩	11	0.021~0.056	0.032
红色泥岩	7	0.022~0.063	0.045
灰色泥岩	14	0.082~0.845	0.315

同铀一样,还原性砂体的存在仍是砂岩型铀成矿的先决条件,然而与铀成矿相关的砂体类型较多,对于卷状或板状铀矿体而言,含矿砂体需要具备以下三方面条件,即:砂体上部和下部具备不透水隔档层;砂体本身具有较好的泛连通性;另外,具能产生氧化还原作用的地球化学障也是不可缺少的条件。地层中还原性组分的富集与沉积过程有较大的关系,在砂质辫状沉积环境中,尤其是心滩沉积,细碎屑物中常含有大量的有机质及还原性物质,其可随着砂体在某些地段共同沉积,从而构成砂体的原生还原障。铀矿化主要产于砂岩中,姚家组中不同沉积旋回均见铀矿化异常显示,且表现出与铀矿化的一致性,表明了姚家组具强还原性的沉积期砂体对铀富集的重要作用(图7)。

4.3 层间氧化渗入水动力主成矿阶段

晚白垩世末期,本区发生了构造反转运动,伴随着反转的增强,剥蚀作用也更加强烈,姚家组目的层出露地表,便形成了姚家组剥蚀天窗。早期的同生断裂复活,该区嫩江末期生油期与之相吻合,因此油气等还原性流体沿着断裂运移并扩散,从而广泛的蚀变作用于姚家组砂体中,形成了具强还原能力和还原剂容量的灰色砂体,为后期的铀成矿作用提供了有利的砂体条件^[6]。同时,剥蚀天窗的形成也改变了整体上水动力环境,形成了补—径—排的水循环系统,因而也促进了含氧含铀水的渗入氧化作用,并在地球化学反应界面聚集沉淀形成铀矿体。位于过渡带内的灰色砂岩Re含量富集显著,含量集中于 $(0.121\sim 0.577)\times 10^{-6}$ 之间,最高达 1.602×10^{-6} (表7),除个别样品只达到铀矿化级别外,其余均达到铀工业级别(地浸砂岩型铀矿Re综合利用标准);后生红色细砂岩中Re含量集中于 $(0.054\sim 0.086)\times 10^{-6}$ 之间,最高达 0.072×10^{-6} ,明显高于原生红色砂岩含量值;过渡带内高Re值的灰色细砂岩、后生红色细砂岩和黄色细砂岩的出现,为本地区曾经历了较强烈的层间氧化富集作用提供了坚实的理论依据。另外,钱家

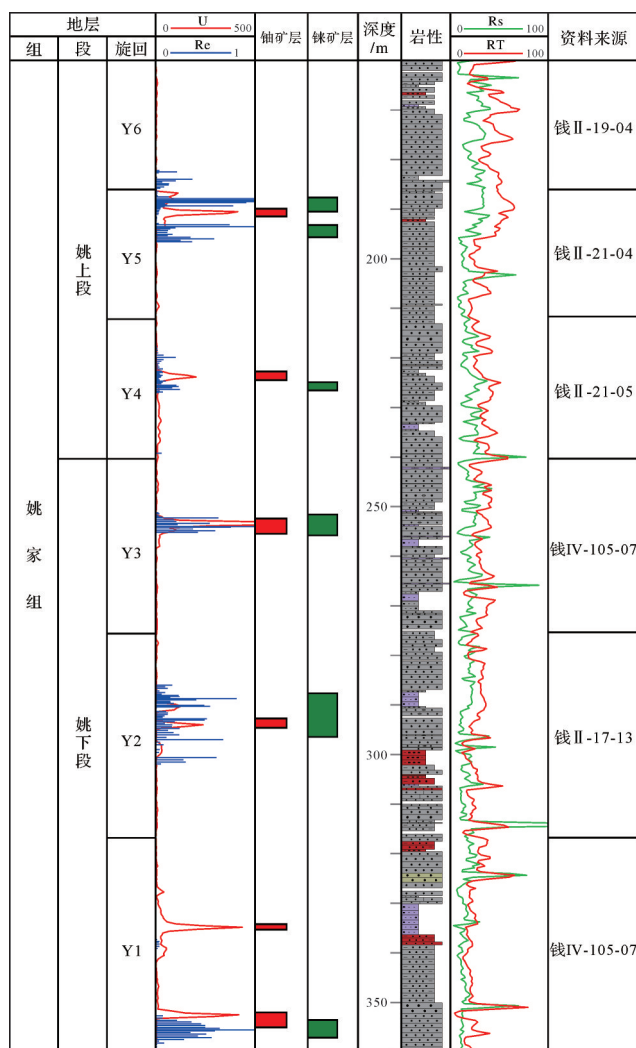


图7 钱家店地区姚家组Re矿及U矿综合柱状图
Fig.7 Comprehensive bar chart of rhenium and uranium ore in Yaojia Formation, Qianjiadian area

店铀矿床中不同钻孔的Re元素与U元素含量变化关系反映出两者在纵向上呈现较吻合的单峰态特征(图8),U与Re含量起伏在钻孔纵向上吻合性高,同样表明Re在本地区的富集相似于U,受层间氧化还原作用控制。

4.4 古近纪浅层氧化改造及热活动铀叠加成矿阶段

本区在嫩江期末反转构造运动之后,也就是古近纪时期处于持续隆升状态,因此缺失了古近系地

表7 钱家店地区姚家组不同层间氧化带岩石类型Re含量分析结果

Table 7 Analysis results of Re content of rock types in different oxidation zones, Qianjiadian area

岩性	数量	Re含量变化区间/ $\times 10^{-6}$	Re含量平均值/ $\times 10^{-6}$
灰色细砂岩	88	0.121~1.602	0.448
后生红色细砂岩	15	0.037~0.086	0.072
黄色细砂岩	16	0.005~0.036	0.020

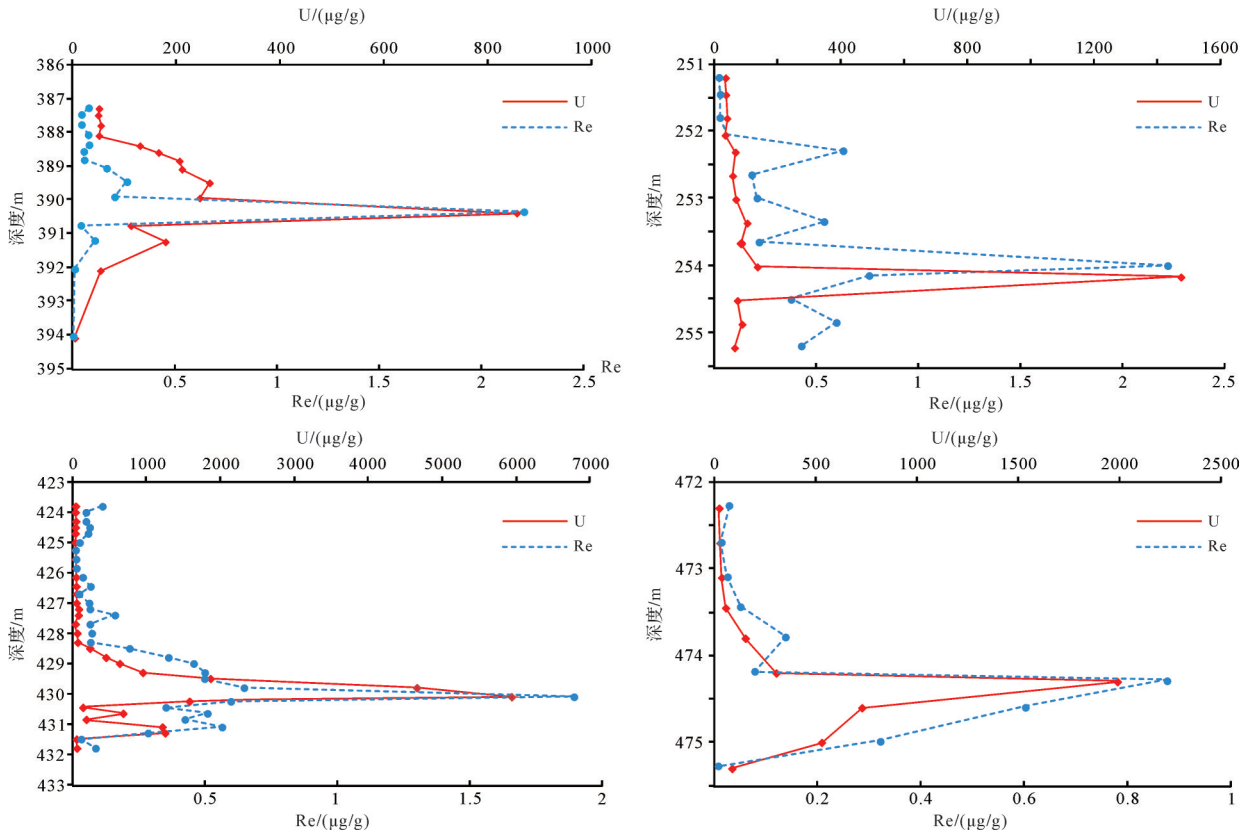


图8 钱家店铀矿床不同单井Re与U含量关系变异图

Fig.8 Variation of Re and U content in individual wells, Qianjiadian uranium deposit

层沉积。隆升剥蚀致使构造天窗规模扩大,同时也导致姚家组砂体中的含氧含铼水向地层深部持续的渗入^[3]。因此早期姚家组富集的铼元素,开始持续迁移并在较强的还原地带重新沉淀聚集,进而形成了更高的规模和品位的新铼矿体。与此同时,大量的辉绿岩脉沿断裂带上涌,并穿插于姚家组和嫩江组中较弱的岩性带中,携带的高温流体致使后期的成矿改造作用更加强烈,在局部地段形成了具岩浆热液和建造水热液双重特点高品位铼矿体^[30]。该阶段的矿体主要分布于矿区的北部构造剥蚀天窗附近和西部的区域性断裂附近,Re和U均呈现局部高度富集特点,Re含量和U含量分别集中于 $(0.56\sim 4.4)\times 10^{-6}$ 和 $(530\sim 1\ 062)\times 10^{-6}$ 之间,平均含量分别可达 1.34×10^{-6} 和 836×10^{-6} 。

4.5 新近纪油气扩散还原保矿阶段

新近纪本区构造运动以差异升降为主,并且具备断块活动特征。此期正是石油和天然气成藏的破坏期,在受到强烈的伸展断裂活动的背景下,油气沿着断裂运移并在周围大量渗出,进而扩散到具高渗透率的沉积砂体,致使晚白垩世末期和古近纪时形成的铼矿体长期处于较强的还原环境,达到了对已形成的铼矿床的保护作用^[39]。

5 结论

(1) 钱家店铀矿床砂岩铀矿石中分散元素Re的含量高,已完全达到伴生矿综合利用指标。

(2) Re与 Fe^{2+}/Fe^{3+} 、Se、U及有机碳相关性好,表明有较密切的共生关系;与稀土元素相关性极差,暗

示了相异(相反)于稀土元素表生稳定的性质。

(3) 钱家店地区铀矿床形成经历了铀预富集阶段、上白垩统姚家组含矿主岩形成及沉积成矿阶段、层间渗入氧化水动力主成矿阶段、古近纪浅层氧化改造及热活动铀叠加成矿阶段、新近纪油气扩散还原保矿阶段5个阶段,这5个阶段与该区铀的空间分布具有很好的相似性。

参考文献(References)

- [1] 赵忠华,刘广传,崔长远. 松辽盆地西南部层间氧化带砂岩型铀矿找矿方向[J]. 矿物岩石地球化学通报,1998,17(3):156-159. [Zhao Zhonghua, Liu Guangchuan, Cui Changyuan. The prospecting direction for sandstone type uranium deposit in inter-layered oxidation zone in the southwest of Songliao Basin [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 1998, 17 (3): 156-159.]
- [2] 李胜祥. 松辽盆地地质演化史与砂岩型铀矿找矿方向研究[J]. 核工业北京地质研究院,2002,59:114-115. [Li Shengxiang. Geological evolution history of Songliao Basin and prospecting direction of sandstone-type uranium deposits[J]. Beijing Institute of Geology, Nuclear Industry, 2002, 59: 114-115.]
- [3] 罗毅,马汉峰,夏毓亮,等. 松辽盆地钱家店铀矿床成矿作用特征及成矿模式[J]. 铀矿地质,2007,23(4):193-200. [Luo Yi, Ma Hanfeng, Xia Yuliang, et al. Geologic characteristics and metallogenic model of Qianjiadian uranium deposit in Songliao Basin[J]. Uranium Geology, 2007, 23(4): 193-200.]
- [4] 马汉峰,罗毅,李子颖,等. 沉积特征对砂岩型铀成矿类型的制约:以松辽盆地南部姚家组为例[J]. 世界核地质科学,2010,27(1):6-10,61. [Ma Hanfeng, Luo Yi, Li Ziyang, et al. Constrain of sedimentary characteristics on the mineralization type of sandstone-hosted uranium deposits: A case study of Yaojia Formation in the southern Songliao Basin [J]. World Nuclear Geoscience, 2010, 27(1): 6-10, 61.]
- [5] 夏毓亮,林锦荣,李子颖,等. 松辽盆地钱家店凹陷砂岩型铀矿预测评价和铀成矿规律研究[J]. 中国核科技报告,2003(3):105-117. [Xia Yuliang, Lin Jinrong, Li Ziyang, et al. Perspective and resource evaluation and metallogenic studies on sandstone-type uranium deposit in Qianjiadian Depression of Songliao Basin [J]. China Nuclear Science and Technology Report, 2003 (3): 105-117.]
- [6] 夏毓亮,郑纪伟,李子颖,等. 松辽盆地钱家店铀矿床成矿特征和成矿模式[J]. 矿床地质,2010,29(增刊1):154-155. [Xia Yuliang, Zheng Jiwei, Li Ziyang, et al. Metallogenic characteristics and metallogenic model of the Qianjiadian uranium deposit, Songliao Basin [J]. Mineral Deposits, 2010, 29 (Suppl. 1) : 154-155.]
- [7] 陈晓林,向伟东,李田港,等. 松辽盆地钱家店铀矿床含矿层位的岩相特征及其与铀成矿的关系[J]. 铀矿地质,2007,23(6):335-341,355. [Chen Xiaolin, Xiang Weidong, Li Tiangang, et al. Lithofacies characteristics of ore-hosting horizon and its relationship to uranium mineralization in Qianjiadian uranium deposit, Songliao Basin [J]. Uranium Geology, 2007, 23 (6) : 335-341, 355.]
- [8] 张明瑜,郑纪伟,田时丰,等. 开鲁拗陷钱家店铀矿床铀的赋存状态及铀矿形成时代研究[J]. 铀矿地质,2005,21(4):213-218. [Zhang Mingyu, Zheng Jiwei, Tian Shifeng, et al. Research on existing state of uranium and uranium Ore-Formationage at Qianjiadian uranium deposit in Kailu Depression [J]. Uranium Geology, 2005, 21(4): 213-218.]
- [9] 陈方鸿,张明瑜,林畅松. 开鲁盆地钱家店凹陷含铀岩系姚家组沉积环境及其富铀意义[J]. 沉积与特提斯地质,2005,25(3):74-79. [Chen Fanghong, Zhang Mingyu, Lin Changsong. Sedimentary environments and uranium enrichment in the Yaojia Formation, Qianjiadian Depression, Kailu Basin, Nei Mongol [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2005, 25(3) : 74-79.]
- [10] 李宏涛,吴世祥,蔡春芳,等. 油气相关砂岩型铀矿的形成过程:以钱家店铀矿床为例[J]. 地球化学,2008,37(6):523-532. [Li Hongtao, Wu Shixiang, Cai Chunfang, et al. Forming processes of petroleum-related sandstone-type uranium ore: Example from Qianjiadian uranium deposit [J]. Geochimica, 2008, 37(6): 523-532.]
- [11] 林锦荣,田华,董文明,等. 松辽盆地东南部铀矿找矿目的层原生地球化学类型与后生蚀变作用[J]. 铀矿地质,2009,25(4):202-207. [Lin Jinrong, Tian Hua, Dong Wenming, et al. Original geochemical types and epigenetic alteration of rocks in prospecting target stratum for uranium deposit in the southeast of Songliao Basin [J]. Uranium Geology, 2009, 25 (4) : 202-207.]
- [12] 张万亮,苏学斌,张渤. 可地浸砂岩型铀资源开采利用系数的探讨:以钱家店铀矿床为例[J]. 铀矿冶,2017,36(1):19-22. [Zhang Wanliang, Su Xuebin, Zhang Bo. Discussion on mining utilization coefficient for in-situ leaching sandstone type uranium resource: A case study of Qianjiadian uranium deposit [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2017, 36(1): 19-22.]
- [13] 单芝波. 松辽盆地钱家店地区姚家组赋矿砂岩的组成、地球化学特征及其构造背景[J]. 地质科学,2019,54(2):472-490. [Shan Zhibo. Detrital modal, geochemical characteristics and tectonic setting of the Yaojia Formation ore-bearing sandstones in Qianjiadian area, Songliao Basin [J]. Chinese Journal of Geology, 2019, 54(2): 472-490.]
- [14] 张贻侠. 铼的地球化学和矿床成因类型问题[J]. 成都地质学院学报,1960(1):25-32. [Zhang Yixia. The geochemical and genetic types of rhenium [J]. Chengdu University of Technology, 1960(1): 25-32.]
- [15] 曹志敏,骆耀南,王汝成,等. 沐川太平砂岩型铀(钼)矿点的地质特征和矿化时代[J]. 地质学报,2002,76(1):95-99. [Cao Zhimin, Luo Yaonan, Wang Rucheng, et al. Geological

- Characteristics and mineralization age of the sandstone type Re-Mo (-Os) mineral occurrence in Muchuan, Sichuan [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2002, 76(1): 95-99.]
- [16] 杨宗锋, 罗照华, 卢欣祥, 等. 关于辉钼矿中 Re 含量示踪来源的讨论 [J]. *矿床地质*, 2010, 29(增刊 1): 321-322. [Yang Zongfeng, Luo Zhaohua, Lu Xinxiang, et al. Discussion on tracer source of rhenium content in molybdenite [J]. *Mineral Deposits*, 2010, 29(Suppl. 1): 321-322.]
- [17] 黄典豪. 就若干矿床的类型、成矿物质来源及辉钼矿含铼量的地质意义等与毛景文研究员商榷 [J]. *地质论评*, 2015, 61(5): 990-1000. [Huang Dianhao. Discussion with Prof. Mao Jingwen on Types, Ore-Forming material source of some deposits and geological significance of rhenium content in Molybdenite [J]. *Geological Review*, 2015, 61(5): 990-1000.]
- [18] 蒋绍平, 李峰, 肖静珊, 等. 澜沧老厂斑岩钼矿中的铼及其资源意义 [J]. *云南冶金*, 2011, 40(4): 7-12, 52. [Jiang Shaoping, Li Feng, Xiao Jingshan, et al. Rhenium resource in the porphyry molybdenum deposit at Langchang Laochang and its significance [J]. *Yunnan Metallurgy*, 2011, 40(4): 7-12, 52.]
- [19] 王登红, 王瑞江, 孙艳, 等. 我国三稀(稀有稀土稀散)矿产资源调查研究成果综述 [J]. *地球学报*, 2016, 37(5): 569-580. [Wang Denghong, Wang Ruijiang, Sun Yan, et al. A review of achievements in the three-type rare mineral resources (rare resources, rare earth and rarely scattered resources) survey in China [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2016, 37(5): 569-580.]
- [20] 秦明宽, 赵瑞全. 512 铀矿床 Re 的地球化学及其研究意义 [J]. *铀矿地质*, 1997, 13(5): 273-278. [Qin Mingkuan, Zhao Ruiquan. The geochemistry and significance of rhenium in uranium deposit No. 512 [J]. *Uranium Geology*, 1997, 13(5): 273-278.]
- [21] 谈成龙. 层间氧化带砂岩型铀矿中铼的地球化学行为及找矿意义探讨 [J]. *铀矿地质*, 2004, 20(5): 299-305. [Tan Chenglong. Geochemical behavior of rhenium at interlayer oxidation zone sandstone-type uranium deposits and discussion on its prospecting significance [J]. *Uranium Geology*, 2004, 20(5): 299-305.]
- [22] 王正其, 潘家永, 曹双林, 等. 层间氧化带分散元素铼与硒的超常富集机制探讨: 以伊犁盆地扎吉斯坦层间氧化带砂岩型铀矿床为例 [J]. *地质论评*, 2006, 52(3): 358-362. [Wang Zhengqi, Pan Jiayong, Cao Shuanglin, et al. Super-enriching mechanism of disperse-elements Re and Se in interlayer oxidation: A case study of the Zhajistan interlayer oxidation zone sandstone-type uranium deposit, Ili Basin, Xinjiang [J]. *Geological Review*, 2006, 52(3): 358-362.]
- [23] 王正其, 李子颖, 管太阳. 层间氧化作用: 一种分散元素(Re、Se)新的富集成矿机制 [J]. *铀矿地质*, 2007, 23(6): 328-334. [Wang Zhengqi, Li Ziyang, Guan Taiyang. Interlayer oxidation: A new mineralization mechanism for dispersed elements (Re, Se) [J]. *Uranium Geology*, 2007, 23(6): 328-334.]
- [24] 陈祖伊, 郭庆银. 砂岩型铀矿床层间氧化带前缘区稀有元素富集机制 [J]. *铀矿地质*, 2010, 26(1): 1-8. [Chen Zuyi, Guo Qingyin. The mechanism of rare elements concentration in the redox front area of interlayer oxidation type sandstone-hosted uranium deposits [J]. *Uranium Geology*, 2010, 26(1): 1-8.]
- [25] 潘家永, 曾爱花, 陈益平, 等. 新疆 511 铀矿床 U-Se-Re-Mo 富集规律探讨 [J]. *矿物学报*, 2011, 31(增刊 1): 282-283. [Pan Jiayong, Zeng Aihua, Chen Yiping, et al. Enriching mechanism of U-Se-Re-Mo in No. 511 uranium deposit, Xinjiang [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2011, 31(Suppl. 1): 282-283.]
- [26] Taylor S R, McLennan S M. The continental crust: Its composition and evolution [M]. Oxford: Blackwell Scientific Pub., 1985.
- [27] 涂光炽, 高振敏, 胡瑞忠, 等. 分散元素地球化学及成矿机制 [M]. 北京: 地质出版社, 2004: 1-424. [Tu Guangchi, Gao Zhenmin, Hu Ruizhong, et al. The geochemistry and ore-forming mechanism of the dispersed elements [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004: 1-424.]
- [28] 黄凡, 王登红, 王岩, 等. 中国铼成矿规律和找矿方向研究 [J]. *地质学报*, 2019, 93(6): 1252-1269. [Huang Fan, Wang Denghong, Wang Yan, et al. Study on metallogenic regularity rhenium deposits in China and their prospecting direction [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2019, 93(6): 1252-1269.]
- [29] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 25283—2010 矿产资源综合勘查评价规范 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2011. [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration. GB/T 25283-2010 Specification for comprehensive exploration and evaluation of mineral resources [S]. Beijing: China Standard Press, 2011.]
- [30] 聂逢君, 严兆彬, 夏菲, 等. 内蒙古开鲁盆地砂岩型铀矿热流体作用 [J]. *地质通报*, 2017, 36(10): 1850-1866. [Nie Fengjun, Yan Zhaobin, Xia Fei, et al. Hot fluid flows in the sandstone-type uranium deposit in the Kailu Basin, northeast China [J]. *Geological Bulletin of China*, 2017, 36(10): 1850-1866.]
- [31] Liang Q, Grégoire D G. Determination of trace elements in twenty six Chinese geochemistry reference materials by inductively coupled plasma-mass spectrometry [J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 2000, 24(1): 51-63.]
- [32] 国防科学技术工业委员会. EJ/T 1157—2002 地浸砂岩型铀矿地质勘查规范 [S]. 国防科学技术工业委员会, 2002. [Commission of Science, Technology and Industry for National Defense. EJ/T 1157-2002 Exploration specifications on in-situ leaching sandstone type uranium deposits [S]. Commission of Science, Technology and Industry for National Defense, 2002.]
- [33] 邹林, 彭省临, 杨自安, 等. 青海阿尔茨托山地区地球化学(异常)场的多重分形研究 [J]. *中国地质*, 2004, 31(4): 436-441. [Zou Lin, Peng Shenglin, Yang Zi'an, et al. Multifractal study of geochemical (anomaly) fields in the A'ercituoshan area, Qinghai [J]. *Geology in China*, 2004, 31(4): 436-441.]

- [34] 王寿超,李杰,王菊,等. R型聚类与模糊聚类分析在源解析中的应用[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(29): 17757-17759, 17761. [Wang Shouchao, Li Jie, Wang Ju, et al. R-type clustering analysis and fuzzy clustering analysis in the source apportionment[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2011, 39(29): 17757-17759, 17761.]
- [35] 何益. 攀枝花层状岩体钽的地球化学特征及富集规律[D]. 成都:成都理工大学, 2016:1-87. [He Yi. The geochemical features and concentration regularity of scandium in stratified rock mass of Panzhihua[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016: 1-87.]
- [36] 宫文杰,张振强,于文斌,等. 松辽盆地地浸砂岩型铀成矿铀源分析[J]. 世界核地质科学, 2010, 27(1):25-30. [Gong Wenjie, Zhang Zhenqiang, Yu Wenbin, et al. Analysis of uranium sources in in-situ leachable sandstone-type uranium deposit in Songliao Basin[J]. World Nuclear Geoscience, 2010, 27(1): 25-30.]
- [37] 黎彤. 地壳元素丰度的若干统计特征[J]. 地质与勘探, 1992, 28(10): 1-7. [Li Tong. The statistical characteristics of the abundance of chemical elements in the earth crust[J]. Geology and Prospecting, 1992, 28(10): 1-7.]
- [38] 殷敬红,张辉,笱国军,等. 内蒙古东部开鲁盆地钱家店凹陷铀矿成藏沉积因素分析[J]. 古地理学报, 2000, 2(4): 76-83. [Yin Jinghong, Zhang Hui, Zan Guojun, et al. Sedimentation factors analysis of uranium mineralization of Qianjiadian Depression, Kailu Basin, east Inner Mongolia Autonomous Region [J]. Journal of Palaeogeography, 2000, 2(4): 76-83.]
- [39] 郑纪伟. 开鲁盆地钱家店铀矿床成矿地质条件及勘探潜力分析[J]. 铀矿地质, 2010, 26(4): 193-200, 207. [Zheng Jiwei. Geological setting and exploration potential of Qianjiadian uranium deposit in Kailu Basin [J]. Uranium Geology, 2010, 26(4): 193-200, 207.]

Geochemical Characteristics and Rhenium Mineralization, Qianjiadian Uranium Deposit, Kailu Basin

CHEN ZhenYan¹, WANG Lei¹, CUI XiangDong², SHAN ZhiBo², SONG BaiRong², ZHANG Lei¹

1. Development Company of New Energy Sources of Liaohe Petroleum Exploration Bureau, Panjin, Liaoning 124010, China

2. Liaohe Oilfield Exploration and Development Research Institute, Panjin, Liaoning 124010, China

Abstract: This study discusses the mineralization of rhenium associated with uranium in the Qianjiadian uranium deposit. Present studies of the geochemical characteristics of rhenium in this area are combined with previous research results. The content of rhenium in the sandstone uranium ore of the Qianjiadian uranium deposit is high, and has reached the comprehensive utilization index. Re correlates well with Fe^{2+}/Fe^{3+} , Se, U and organic C, indicating a close symbiotic relationship. The very poor correlation with rare earth elements suggests less stability than the surface stability of rare earth elements. The formation of the rhenium deposit in the Qianjiadian area has undergone five stages: pre-enrichment; the formation of ore-bearing main rocks in the Upper Cretaceous Yaojia Formation, and the sedimentary and metallogenic stages. The main ore-forming stages were interlayer oxidation and hydrodynamics, and shallow oxidation and modification in the Paleogene. The superposition and metallogenic stage of hydrothermal rhenium, and the ore-preserving stage of hydrocarbon diffusion and reduction in the Neogene. These five stages are very similar to the spatial distribution of uranium in the region. The similarity also determines the coexistence of uranium and rhenium in the same horizon and the enrichment in the same region on the stratum, which provides a basis for the joint exploration and mining of uranium and rhenium.

Key words: rhenium; sparsely scattered elements; Qianjiadian; Yaojia Formation; sandstone-type rhenium mineralization