

文章编号: 0258-7106(2012)02-0391-10

松辽盆地钱家店砂岩型铀矿成矿地质特征

罗毅, 何中波, 马汉峰, 孙祥

(核工业北京地质研究院, 北京 100029; 铀资源勘查与评价技术重点实验室, 北京 100029)

摘要 通过对钱家店铀矿床产出的地质背景、地质构造环境、矿床铀矿物特征、蚀变地球化学特征、微量元素地球化学特征、成矿物质来源及成矿年代学等综合研究, 认为钱家店铀矿床受“晚白垩世姚家期辫状河道洼地、晚白垩世嫩江期末反转隆升剥蚀构造天窗、NNE向贯通性基底断裂”三位一体控制, 矿床成因类型为同生沉积后生叠加重成因型。这为进一步的找矿工作提供了依据。

关键词 地质学, 复成因矿床, 辫状河道洼地, 构造天窗, 贯通性基底断裂

中图分类号: P619.14

文献标志码: A

Metallogenic characteristics of Qianjiadian sandstone uranium deposit in Songliao basin

LUO Yi, HE ZhongBo, MA HanFeng and SUN Xiang

(Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China; Key Laboratory of Prospecting and Evaluation for Uranium Resources, Beijing 100029, China)

Abstract

The main purpose of this study is metallogenic prognosis in Songliao basin on the basis of the study of geological conditions and genetic model of the ore deposit. According to comprehensive researches on characteristics of the Qianjiadian sandstone uranium deposit, such as geological background, geological metallogenic conditions, uranium minerals, alteration geochemistry, minor element geochemistry, source of minerals and ore-forming stages, the authors hold that the Qianjiadian uranium deposit is controlled by late Cretaceous Yaojia stage braided channel depression, the last phase of late Cretaceous Nenjiang stage reverse uplifted and denudated windows, and NNE-trending transgressive fractures. And this model is called “three ore-forming stages in one place”. The ore deposit is of syngenetic sedimentation and epigenetic superimposition polygenetic and compound type.

Key words: geology, polygenetic and compound ore deposit, braided channel depression, denudated windows, transgressive fractures

松辽盆地是中国东北地区的一个大型中-新生代陆相断拗复合型盆地, 盛产石油、煤、天然气。铀矿勘查工作始于1996年, 至2010年共进行了14年的铀矿勘查评价工作, 发现了2个大型砂岩型铀矿床, 取得了砂岩型铀矿找矿的重要突破。2006年以前, 找矿工作注重于寻找层间氧化型铀矿, 采用的工

作方法为大网度铀矿勘查评价技术, 并未取得找矿的实质性突破, 对辽河油田发现的钱家店铀矿床也未做深入的解剖研究。本文重点对钱家店矿床的成矿地质特征、成因模式进行了系统的研究, 提出了“辫状河道洼地、反转隆升剥蚀天窗构造、贯通性基底断裂”三位一体成矿理论, 并且构建了三源流体复

成因矿床成矿模式。因此,该项研究成果对于进一步开展松辽盆地铀矿找矿工作,发现新的铀矿产地具有重要的现实意义。

1 区域地质背景

松辽盆地属板内伸展断拗复合型盆地,形成于晚中生代。盆地沉积构造演化表现为东泛西超,南隆北沉的沉积演化构造格局,盆地砂岩型铀矿床分布于盆地南部哲东隆起区西缘的钱家店凹陷的北段与西拉木伦河东西向断裂带的交汇区(高瑞祺等,1997)。钱家店成矿凹陷呈NNE向狭窄条带状展布,长约100 km,宽约9~12 km,面积1 280 km²。据凹陷的沉降特征,可进一步划分为宝龙山、胡力海、喜伯子、衙门子4个凹陷,铀矿产于胡力海凹陷中。凹陷区基底地层主要为晚古生代浅变质岩、花岗岩,中生代富铀酸性火山岩、花岗岩;盖层为上白垩统青山口组、姚家组及嫩江组构成。其中,中生代富铀酸性火山岩、花岗岩及辉绿岩,上白垩统姚家组与成矿的时空关系最为密切。

2 成矿地质特征

2.1 成矿环境

(1) 赋矿层及岩性岩相

矿床赋矿层位为上白垩统姚家组(K₂y),可分为上、下2个岩性段。两个岩性段之间为泛滥平原红色粉砂质泥岩。姚家组下岩性段底部为含泥砾粗砂岩、中细砂岩夹薄层泥岩,中部为灰绿色含碳屑中细砂岩,顶部为泛滥平原红色粉砂质泥岩。姚家组上岩性段为浅灰色、灰白色细砂岩为主,夹中细砂岩及粉砂岩,底部为含砾中粗砂岩,构成下粗上细的沉积韵律。与姚家组下段呈冲刷接触关系,岩层厚度40~69 m。姚家组赋矿层发育斜层理、交错层理、水平层理等沉积构造,二元结构明显,属三角洲泛滥平原砂质辫状河道沉积。铀矿化赋存于姚家组上、下岩性段辫状河道或曲流河道砂体中。

含矿主要为含碳屑、含泥砾粗砂岩,含碳屑岩屑长石砂岩。岩屑成分主要为富铀的酸性火山岩、花岗岩。岩屑含量达20%,长石含量大于50%,石英含量少于25%。含矿砂岩的成分成熟度、结构成熟度低。

赋矿层姚家组形成期的古气候为干旱、湿热交替古气候环境(王东坡等,1995),赋矿层中红色层与

灰色层互层,发现厥类孢子和裸子植物花粉及不同形状的钙质结核等,可为干旱、湿热古气候环境的有力佐证。

(2) 控矿构造

钱家店砂岩型铀矿床受“晚白垩世姚家期辫状河道洼地,NNE向贯通性基底断裂及晚白垩世嫩江期末反转隆升剥蚀构造天窗”三位一体控制(图1)。其中,晚白垩世姚家期辫状河道洼地以表现辫状沟槽、辫状砂岛、河漫滩、心滩等多沉积微相组合和含泥砾砂岩,富含碳屑、有机质、草莓状黄铁矿中细粒岩屑长石砂岩及粉砂岩,薄层粉砂质泥岩,泛滥平原相红色粉砂质泥岩等复杂岩性组合的正韵律沉积结构为特征。辫状河道洼地中的有机质、碳屑、草莓状黄铁矿控制了铀的同生沉积铀预富集成矿,洼地中岩石 $\alpha(U)$ 达到 $20 \times 10^{-6} \sim 100 \times 10^{-6}$;NNE向贯通性基底断裂为张性正断裂,控制着钱家店晚白垩世箕状凹陷的形成及其晚白垩世姚家期辫状河道洼地的形成,具同生断裂性质。晚白垩世嫩江期末凹陷反转构造活动期NNE向贯通性基底断裂表现为挤压破碎带特征,控制了油气流体渗出还原成矿作用,古近纪时期表现为张性复活,贯穿盖层,控制了辉绿岩脉岩浆热液活动,辉绿岩脉的K-Ar年龄为51 Ma,该期岩浆热液活动为矿床热叠加改造铀成矿提供了热源;晚白垩世嫩江期末反转隆升剥蚀构造天窗属褶皱隆升反转特点,先成的晚白垩世青山口组地层被褶皱隆升剥蚀出露于地表成为构造天窗,在构造天窗的侧翼分别形成箕状断陷。这种构造组合有利于控制地表含氧含铀水的渗入和深部成矿流体渗出还原的双混合铀成矿作用。

总之,晚白垩世姚家期辫状河道洼地、NNE向贯通性基底断裂、晚白垩世嫩江期反转隆升剥蚀构造天窗3种不同形式的构造,在平面分布上三者为叠合区,在剖面上表现为箕状断陷、NNE向贯通性基底断裂、反转隆升剥蚀构造天窗“三位一体”组合特点,它们分别控制铀成矿的不同成矿作用过程及铀矿床的分布。

2.2 矿体、矿石结构构造、矿石矿物组合

矿体呈似层状、透镜状。主矿体长1 100~1 300 m,平均宽1 200 m,厚度3~9 m,平均品位 $\alpha(U)$ 为0.026%,最高品位1.7%;其他矿体长度一般在100~400 m,宽50~200 m,厚度4~8 m。矿体在平面上呈圆饼状,与辫状河道洼地分布范围一致(图2)。

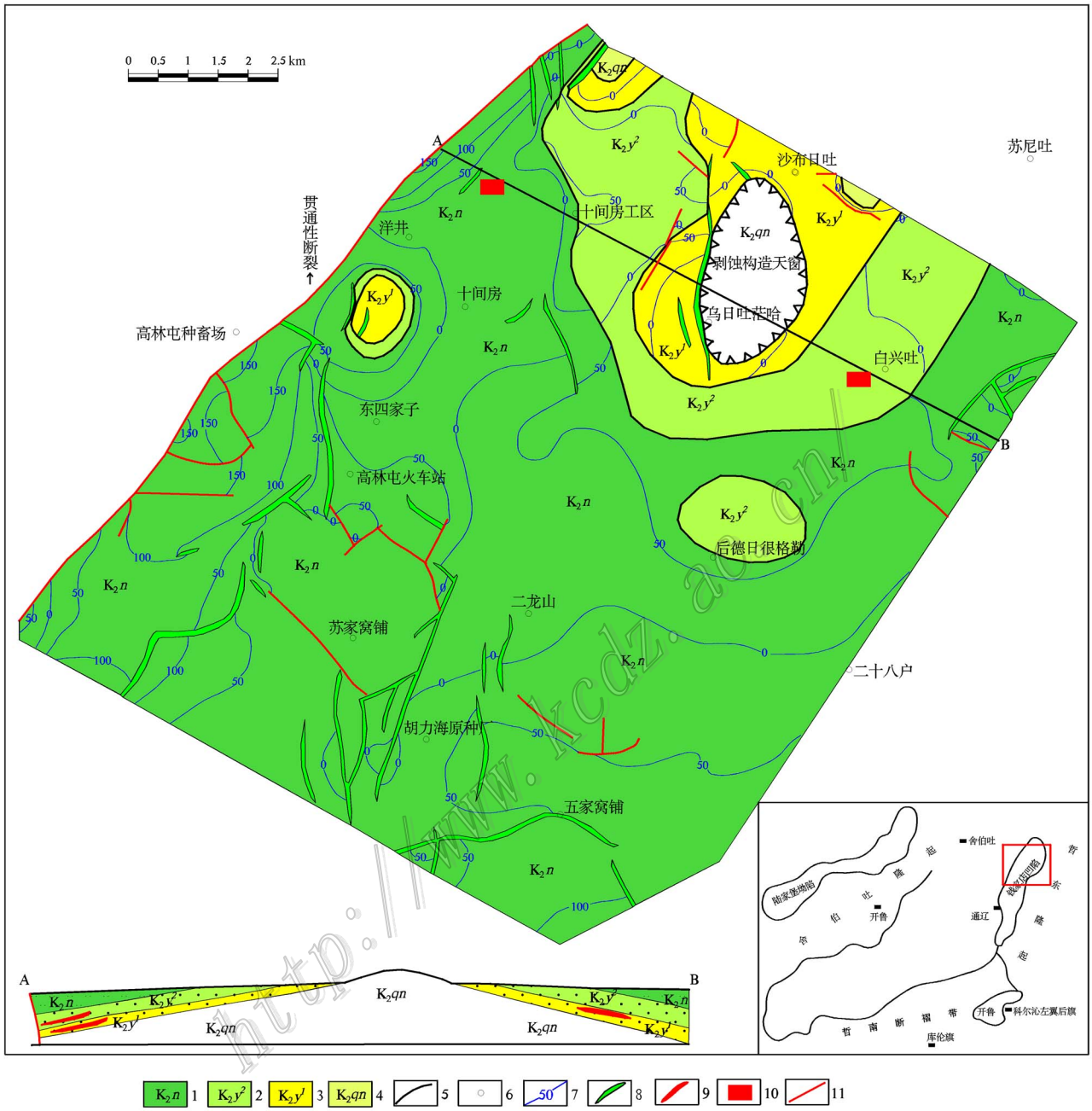


图 1 松辽盆地钱家店地区地质简图

1—上白垩统嫩江组灰绿色粉砂质泥岩; 2—上白垩统姚家组上段鲜红色泥岩夹灰色长石砂岩、粉砂质泥岩; 3—上白垩统姚家组下段鲜红色泥岩、砂岩夹灰色长石砂岩、粉砂质泥岩; 4—上白垩统青山口组紫红色泥岩、粉砂质泥岩; 5—地层界线; 6—地名; 7—等厚线; 8—古近纪辉绿岩脉; 9—铀矿体; 10—铀矿床; 11—断层

Fig. 1 Uranium geological map of Qianjiadian area in Songliao basin

1—Upper Cretaceous Nenjiang Formation grayish green silty mudstone; 2—Upper Member of Upper Cretaceous Yaojia Formation red mudstone intercalated with gray feldspar sandstone; 3—Lower Member of Upper Cretaceous Yaojia Formation red mudstone, sandstone intercalated with gray feldspar sandstone; 4—Upper Cretaceous Qingshankou Formation purple red mudstone, silty mudstone; 5—Geological boundary; 6—Place name; 7—Isopach; 8—Paleogene diabase dike; 9—Uranium ore body; 10—Uranium deposit; 11—Fault

据电子探针分析和光片鉴定结果,矿石结构构造主要为分散微粒状结构、球状结构,微脉状及块状构造(图3、图4、图5、图6)。铀矿物的主要成分为 $w(\text{UO}_2)$ (60.29%~88.79%)、 $w(\text{SiO}_2)$ (0.19%~5.56%),根据此成分含量,该铀矿物具有沥青铀矿的成分特征, $w(\text{SiO}_2)$ 均少于6%(表1)。矿石中

P_2O_5 和 TiO_2 含量偏高可能与赋矿层的有机物及花岗质岩屑有关,磷对铀具有吸附作用。

矿物组合为草莓状黄铁矿-沥青铀矿组合、胶黄铁矿-沥青铀矿组合及微晶石英(玉髓)-沥青铀矿组合3种(图3、图5、图6)。

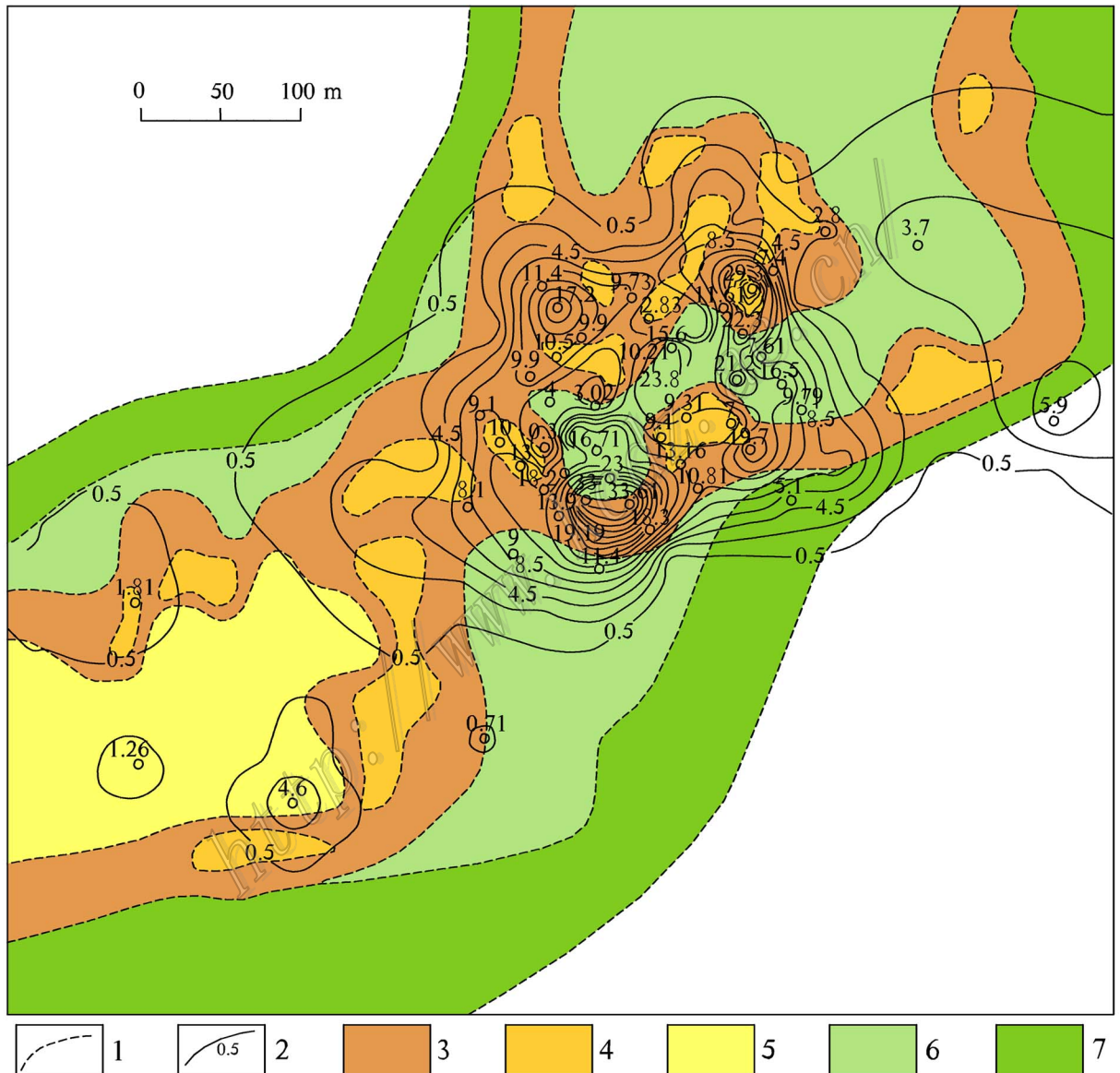


表 1 松辽盆地铀矿床铀矿石点及探针分析结果表($\mu(B)\%$)
Table 1 Electron microprobe analyses of uranium ore in Songliao basin($\mu(B)\%$)

| | 与草莓状黄铁矿共生的 沥青铀矿 | 与块状黄铁矿、黄铜矿共生的 沥青铀矿 | 与胶黄铁矿共生的 沥青铀矿 | 与玉髓脉、方解石脉共生的 沥青铀矿 |
|--------------------------------|--------------------|-----------------------|------------------|----------------------|
| UO ₂ | 65.56 | 60.29 | 69.19 | 88.79 |
| SiO ₂ | 4.05 | 5.56 | | 0.19 |
| Al ₂ O ₃ | | 0.99 | | |
| MgO | 4.30 | 0.16 | 1.24 | 0.94 |
| SO ₂ | | | | 0.28 |
| TiO ₂ | 8.31 | 0.37 | 5.34 | 0.236 |
| FeO | 1.64 | 0.44 | 0.43 | |
| PbO | 1.06 | 0.35 | 0.3 | |
| P ₂ O ₅ | | 8.60 | 4.29 | |
| CaO | | 3.95 | 3.95 | |
| Cr ₂ O ₃ | | | | 0.155 |
| 总和 | 84.92 | 80.71 | 84.74 | 90.59 |

测试单位 : 核工业北京地质研究院测试中心。

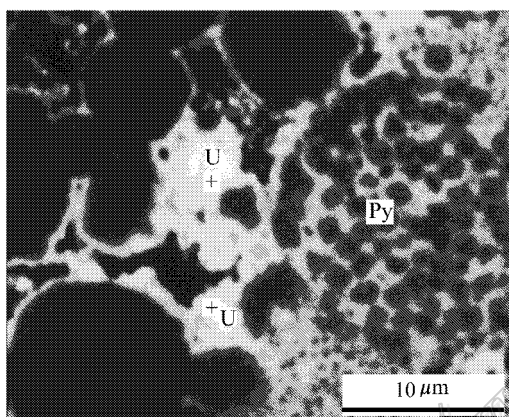


图 3 草莓状黄铁矿与沥青铀矿共生(球状结构)
U—沥青铀矿;Py—草莓状黄铁矿;+为测点

Fig. 3 Association of pitchblende and framboidal pyrite (bulbous structure)
U—Pitchblende;Py—Strawberry pyrite

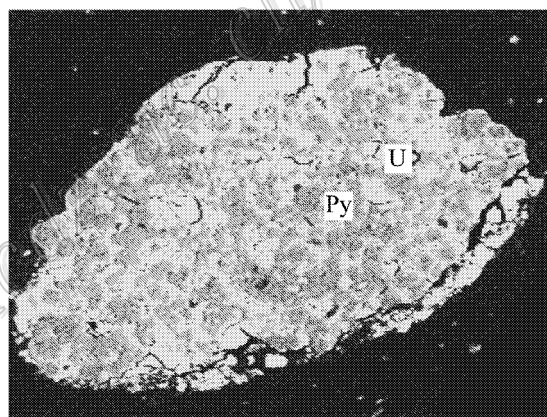


图 5 胶黄铁矿中的分散状沥青铀矿(分散粒状结构)
U—沥青铀矿;Py—胶黄铁矿

Fig. 5 Scattered pitchblende in melnikovite (scattered granular texture)
U—Pitchblende;Py—Melnikovite

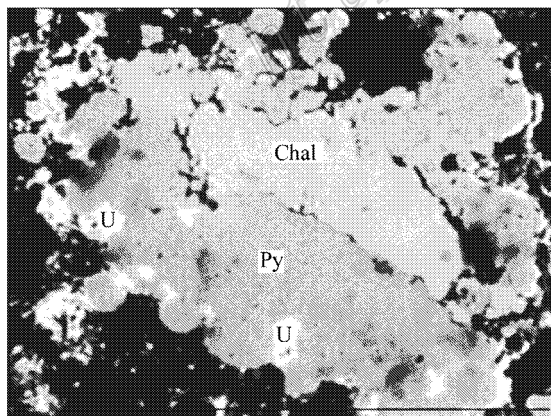


图 4 块状黄铁矿与黄铁矿中的粒状沥青铀矿(微粒结构)
U—沥青铀矿;Py—草莓状黄铁矿;Cha—黄铜矿

Fig. 4 Granular pitchblende in massive pyrite (granular texture)
U—Pitchblende;Py—Strawberry pyrite;Cha—Chalcopyrite

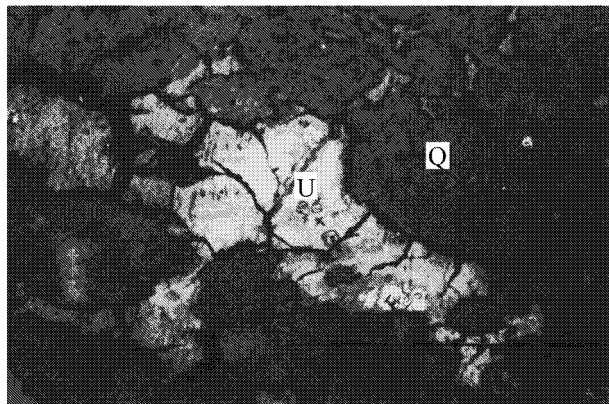


图 6 玉髓脉中的脉状沥青铀矿(微脉状构造)
U—沥青铀矿;Q—微晶石英

Fig. 6 Vein pitchblende in chalcedony (micro-vein texture) U—Pitchblende;Q—Microcrystal quartz

2.3 矿床蚀变地球化学及元素地球化学特征

矿床蚀变地球化学特征

矿床蚀变大致可划分为3类:渗入氧化蚀变、渗出还原蚀变和热液蚀变。

(1) 渗入氧化黏土蚀变

黏土蚀变矿物据X射线衍射分析和电镜扫描分析结果,主要为叶片状高岭石、蒙脱石,碎片状伊蒙混层矿物,片状伊利石等(图7、图8、图9),是晚白垩世嫩江期末反转隆升剥蚀构造天窗控制的地下水渗入改造含矿岩石中的长石水解蚀变后的产物,蚀变岩石为白色。

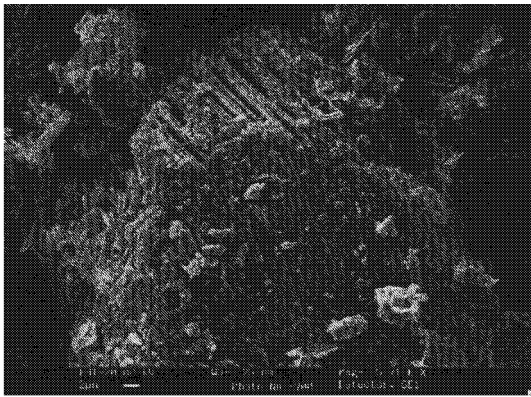


图7 叶片状高岭石
Fig. 7 Lamellar kaolinite

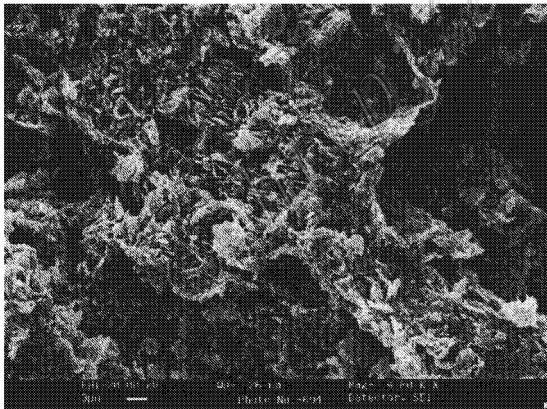


图8 碎片状伊蒙混层
Fig. 8 Flake illite and montmorillonite

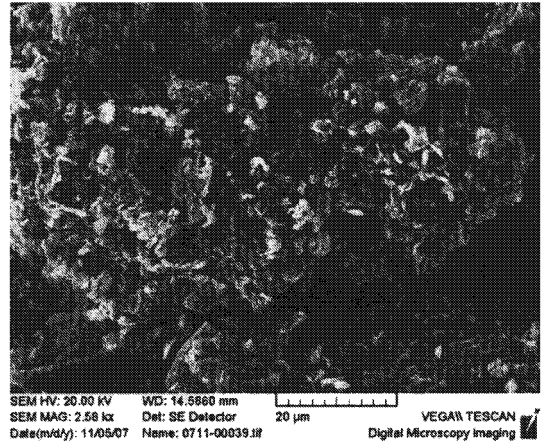


图9 片状伊利石
Fig. 9 Flake illite

向贯通性基底断裂控制的油气流体渗出关系密切。

碳酸盐化蚀变在矿区表现为方解石和铁白云石2种。它是渗入流体中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Fe^{3+} 离子与渗出油气中的 CO_2 结合形成方解石及铁白云石的结果。

(3) 热液蚀变

矿区热液蚀变主要发生于古近纪NNE向贯通性基底断裂张性复活导致的辉绿岩岩浆热液活动期,表现较强的硅化,脉状黄铁矿、赤铁矿化及脉状碳酸盐化,它们叠置在先成的渗出油气还原蚀变带之上,控制着热液成矿作用。

总之,以上3种蚀变作用是NNE向贯通性基底断裂与晚白垩世嫩江期末反转隆升剥蚀构造天窗二者联合作用的结果。当含氧含铀的地下水渗入到含矿层中时,含矿层中的长石被水解形成高岭石、蒙脱石、伊利石等黏土蚀变矿物。渗入氧化蚀变其实是一种表生氧化作用的产物;渗出油气流体通常是一种富含 CO 、 H_2S 、 CH_4 等气体的流体,当它们沿NNE向贯通性基底断裂通道上升渗出进入含矿层时,与含氧含铀地下水流体混合时,油气流体中的 CO 、 H_2S 气体与地下水中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Fe^{3+} 离子分别形成方解石、铁白云石及黄铁矿等蚀变矿物,矿床中的热液蚀变受NNE向贯通性基底断裂控制的辉绿岩岩浆热液所控制,该岩浆热液对先成的矿化层进行热改造交代作用,产生脉状叠置式的硅化蚀变、赤铁矿化蚀变和脉状碳酸盐化蚀变,这种蚀变在空间上受构造裂隙控制。以上3种蚀变虽然蚀变作用的流体来源不同、性质不同、控制的构造形式不同,但它

(2) 渗出油气流体还原蚀变

油气渗出还原蚀变作用,含矿岩石多为灰绿色,黄铁矿化、碳酸盐化等。黄铁矿为球粒状黄铁矿、胶黄铁矿,这些黄铁矿大多分布于灰绿色岩石中,在碳屑胞腔中交代碳屑。这些黄铁矿的形成与NNE

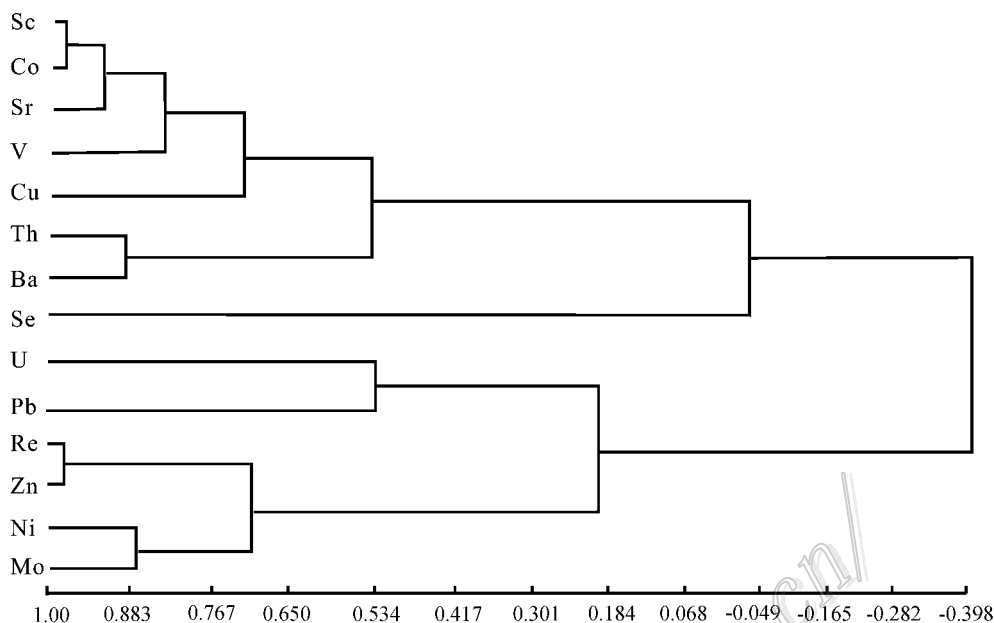


图 10 铀矿床微量元素聚类图

Fig. 10 Cluster analysis plot of trace elements in uranium deposit

们的空间关系是叠合为一体的。这主要与矿床的 3 种不同性质控矿构造的三位一体叠合有关。

矿床元素地球化学特征

本次采自矿床的 100 件铀矿石样品,采用 ICP-MS 测试方法获得铀矿石微量元素数据。根据微量元素分析数据的相关与聚类分析表明,矿石中 U 与 Pb、S、Re、Mo、Ni、Zn、Co、Ba 等元素呈正相关,相关系数均大于 $(\gamma_{0.05})0.241$,分别为 0.828、0.782、0.762、0.693、0.659、0.551、0.327 和 0.319,其中 U 与 Pb、Re、Mo 相关性密切,铀矿石中的 $w(\text{Re})$ 为 $(0.116 \sim 1.17) \times 10^{-6}$,铀的综合利用工业指标为 0.1×10^{-6} ,Re 元素可达到综合利用;U 与 Th、Se、V、Sr 等元素相关性不明显(图 10,表 2)。矿石中富 Re、Pb、Zn、Mo、Ni 主要是与蚀源区富 Pb、Zn、Mo 的中酸性火山岩有关及油气流体的还原作用形成的黄铁矿有关。

3 成矿机理分析

3.1 成矿物质来源

(1) 铀源

据本次伽玛能谱测量结果,钱家店铀矿区南部(华北陆块北缘)蚀源区酸性火山岩 $w(\text{U})$ 为 $(5 \sim 7) \times 10^{-6}$,花岗岩 $w(\text{U})$ 为 5.4×10^{-6} ,上述结果绝对

误差为 $\pm 1 \times 10^{-6}$;铀的浸出率达到 50%~75%,表明蚀源区富铀酸性火山岩及花岗岩是赋矿区富铀建造及成矿的主要铀源之一;钱家店铀矿床赋矿层砂岩 $w(\text{U})$ 为 $(7.8 \sim 20) \times 10^{-6}$,达到该地层内砂岩铀含量的 3~6 倍,表现出明显的铀预富集作用,成为铀成矿的直接铀源。因此,钱家店铀矿床成矿铀源具有来自蚀源区富铀酸性火山岩、花岗岩的间接铀源和来自含矿层本身的直接铀源的二次铀源特点。

(2) 成矿流体来源

据流体包裹体及 C、O、S 同位素研究结果表明:① 矿床中矿石的 12 件包裹体和烃的气相色谱分析(董文明等 2005),矿石中碳数的主峰范围 $C_{15} \sim C_{25}$ 之间,主峰 C_{17} 、 C_{18} 碳数奇偶优势不明显,反映其来自海洋浮游藻类及细菌,而不是陆生植物,因此,它们来源于深部油气形成的包裹体;② 据李胜祥(2002)对砂岩矿石胶结物的碳酸盐方解石、黄铁矿的 C、O、S 同位素研究结果,矿石中的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值为 6.33‰, $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-POB}}$ 值为 14.93‰, $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 值为 15.53‰, $\delta^{34}\text{S}$ 值为 11.27‰,同位素组成异常;非矿化岩石的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值为 1‰~ -1.2‰, $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}}$ 值为 15.2‰~ -15.8‰, $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 值为 15.2‰~ -14.65‰, $\delta^{34}\text{S}$ 值为 3.65‰~6.3‰,同位素值均较低,多为大的负值,有机成分 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值一般小于 -20‰,反映了来自深部油气流体渗出与浅成渗入来源。

表2 钱家店铀矿床微量元素与U相关分析表

Table 2 Correlation coefficients of trace elements and uranium in the Qianjiadian uranium deposit

 $n-2=65 \quad \gamma_{0.05}=0.241$

| U | Th | Re | Sc | V | Co | Ni | Cu | Pb | Zn | Se | Sr | Y | Mo | Ba | S |
|---|-------|-------|--------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|
| 1 | 0.203 | 0.762 | -0.173 | 0.198 | 0.327 | 0.659 | 0.091 | 0.828 | 0.551 | 0.039 | 0.210 | 0.566 | 0.693 | 0.319 | 0.782 |
| | 1 | 0.178 | 0.545 | 0.202 | 0.524 | 0.467 | 0.125 | 0.334 | 0.374 | -0.041 | 0.111 | 0.384 | 0.297 | 0.208 | 0.303 |
| | | 1 | -0.194 | -0.004 | 0.126 | 0.651 | -0.041 | 0.517 | 0.679 | -0.033 | -0.184 | 0.505 | 0.863 | 0.274 | 0.909 |
| | | | 1 | 0.488 | 0.586 | 0.260 | 0.092 | 0.053 | 0.301 | 0.025 | -0.102 | 0.382 | -0.128 | -0.081 | -0.131 |
| | | | | 1 | 0.574 | 0.443 | 0.140 | 0.392 | 0.195 | 0.558 | 0.410 | 0.515 | 0.061 | 0.108 | 0.076 |
| | | | | | 1 | 0.732 | 0.183 | 0.550 | 0.427 | 0.091 | 0.331 | 0.637 | 0.315 | 0.328 | 0.367 |
| | | | | | | 1 | 0.082 | 0.705 | 0.731 | 0.063 | 0.183 | 0.671 | 0.655 | 0.303 | 0.756 |
| | | | | | | | 1 | 0.010 | 0.275 | 0.010 | 0.001 | 0.117 | 0.030 | 0.629 | 0.010 |
| | | | | | | | | 1 | 0.453 | 0.164 | 0.427 | 0.656 | 0.540 | 0.325 | 0.660 |
| | | | | | | | | | 1 | 0.081 | -0.105 | 0.468 | 0.509 | -0.051 | 0.594 |
| | | | | | | | | | | 1 | 0.262 | 0.275 | 0.028 | 0.004 | -0.035 |
| | | | | | | | | | | | 1 | 0.121 | 0.009 | 0.332 | 0.169 |
| | | | | | | | | | | | | 1 | 0.639 | 0.462 | 0.619 |
| | | | | | | | | | | | | | 1 | 0.684 | 0.946 |
| | | | | | | | | | | | | | | 1 | 0.518 |
| | | | | | | | | | | | | | | | 1 |

在钱家店矿区,辉绿岩脉分布广泛,这种辉绿岩脉的K-Ar年龄为51 Ma(马汉峰,2009),并在矿床中出现脉状硅化、碳酸盐化、黄铁矿化、赤铁矿化等热液蚀变,这种热蚀变作用控制了微脉状富铀矿物的分布,其U-Pb等时线年龄为 (40 ± 3) Ma,与辉绿岩活动时期相当。因此,推测矿床的形成热源可能来源于辉绿岩岩浆活动期。

综上所述,钱家店矿床成矿流体的来源可能存在油气流体渗出、大气降水渗入、下地壳岩浆热液“三源”成矿流体来源。

3.2 成矿温度

董文明等(2005)对43件方解石样品的流体包裹体进行了均一温度测定,表明铀矿床盐水包裹体形成温度范围为 $100 \sim 220^\circ\text{C}$,其中温度为 $140 \sim 180^\circ\text{C}$ 的样品集中,占有多数,反映了矿床经历了中低温热改造作用的事实。

3.3 成矿时代

为了查明矿床成矿时代,本次分别采集了粉砂泥岩型铀矿石、灰白色砂岩型铀矿石及热液脉状铀矿石共计31件样品。应用质谱方法测试了矿石的U-Pb同位素组成,测试仪器为Isoprobe热电离子质谱仪,测试误差小于十万分之五。并分别进行了U-Pb等时线处理,获得粉砂泥岩型铀矿石U-Pb等时线年龄为 (96 ± 14) Ma,灰白色砂岩型铀矿石U-Pb等时线年龄为 (67 ± 5) Ma,热液脉状铀矿石U-Pb等时线年龄为 (40 ± 3) Ma(图11、图12、图13)。这

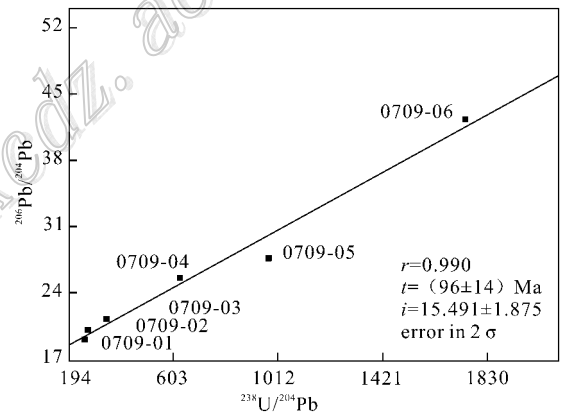


图11 粉砂泥岩型铀矿石U-Pb等时线年龄图解
(i 代表 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 初始比)

Fig. 11 U-Pb isochron diagrams of uranium ore in silty mudstone

3组数据点构成很好的U-Pb等时线,相关系数均达到0.99,误差为 2σ ,说明测试结果可信。

(96 ± 14) Ma的成矿年龄与含矿层晚白垩世姚家组形成期相当,属同生沉积成矿期 (67 ± 5) Ma的成矿年龄与晚白垩世嫩江期末反转隆升剥蚀期相当,处于大气水渗入氧化作用与油气流体渗出还原作用 (40 ± 3) Ma的成矿年龄与区内古近纪始新世的辉绿岩岩浆活动的晚期相当。数据结果中成矿年龄数据与地质构造变动期相吻合,而且等时线年龄的相关性很好,各成矿作用阶段中,U、Pb处于相对封闭体系中。

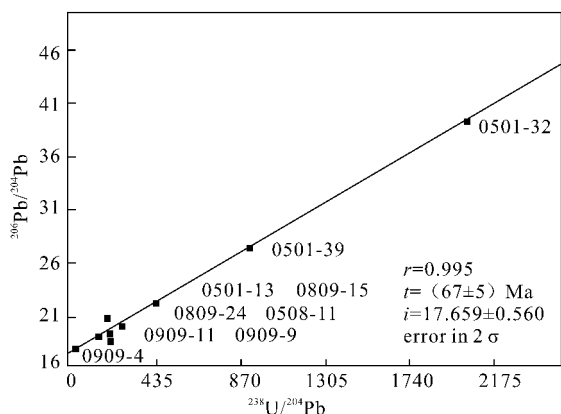


图 12 灰白色砂岩型铀矿石 U-Pb 等时线年龄图解
(i 代表 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 初始比)

Fig. 12 U-Pb isochron diagrams of uranium ore in gray sandstone

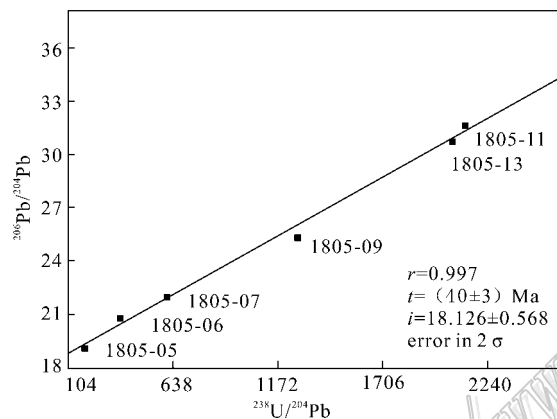


图 13 热叠造铀矿石 U-Pb 等时线年龄图解
(i 代表 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 初始比)

Fig. 13 U-Pb isochron diagrams of hydrothermal superimposed transformation ore

4 松辽盆地钱家店铀矿成矿模式

在矿床成矿地质特征、主控因素研究的基础上, 用“三位一体”构造环境叠合区成矿理论将矿床成矿特点、成矿过程、成矿物质来源串联在一起, 构成松辽盆地钱家店砂岩型铀矿床多源混合叠造复成因成矿模式图(陈肇博等, 2002; 2003; 迟元林等, 2002)(图 14)。

矿床成矿模式可概括为晚白垩世姚家期同生沉积成岩铀预富集成矿作用、晚白垩世嫩江期末反转隆升剥蚀区构造天窗含氧含铀水渗入及沿贯通性断裂油气流体渗出的氧化还原叠加铀成矿作用及古近纪岩浆热液叠加铀成矿作用 3 个阶段(罗毅等, 2009)。

(1) 晚白垩世姚家期蚀源区富铀的酸性火山岩、花岗岩类为富铀建造提供了丰富的物源及铀源, 在干旱、湿热古气候环境影响下, 大量的含氧含铀水汇聚于辫状河道洼地, 并被辫状河道洼地中的有机质、草莓状黄铁矿吸附沉淀, 发生铀的预富集成矿作用, $\alpha(\text{U})$ 为 $(20 \sim 100) \times 10^{-6}$, U-Pb 等时线年龄为 $(96 \pm 14) \text{Ma}$, 与上白垩统姚家组沉积成岩年龄相当。

(2) 晚白垩世嫩江期末反转隆升剥蚀及贯通性断裂活动, 在隆升区形成箕状断陷, 地表含氧含铀水沿箕状断陷斜坡带渗入产生层间氧化, 深部油气流体 (H_2S 、 CO_2 、 CH_4) 沿贯通性基底断裂带渗出还原, 二者汇聚区发生氧化还原铀叠加成矿作用, 铀矿化 U-Pb 等时线年龄为 $(67 \pm 5) \text{Ma}$, 与晚白垩世嫩江期末反转构造活动期相当 (73Ma)。含矿岩石显灰绿色, 富含 CH_4 , 碳酸盐化(方解石、铁白云石)及胶黄铁矿等, 反映了油气渗出还原特征。

(3) 古近纪时期, 继嫩江期末反转隆升构造活动, 表现为强烈的隆起掀斜剥蚀构造活动及辉绿岩脉岩浆活动, 在矿区东北部形成几十平方公里的姚家组剥蚀构造天窗, 含氧含铀水再一次渗入演化, 形成广泛的黏土蚀变改造了先成铀矿, 另一方面, 辉绿岩脉岩浆活动导致热叠加铀成矿作用, 表现为中低温硅化、碳酸盐化、块状黄铁矿、微晶石英硅化、黄铜矿化蚀变, $\alpha(\text{U})$ 达到 1.6%, 铀矿化 U-Pb 等时线年龄为 $(40 \pm 3) \text{Ma}$, 成矿时代为古近纪始新世。

上述成矿模式的构建, 是对松辽盆地钱家店砂岩型铀矿的矿化地质特征、控矿因素、成矿规律的高度概括, 它有别于乌兹别克斯坦、哈萨克斯坦、美国等国家的典型层间氧化带型铀矿成矿地质特征及成矿模式(Austin, 1970; Adler, 1974; Adams et al., 1985; 夏毓亮等 2002)。因此, 它是一个具中国东部成矿特征的多源复成因的矿床成矿模式。该成矿模式强调同生沉积预富集成矿作用及渗出油气流体、渗入流体、热流体等多源流体叠合成矿作用, 而不是单一的层间氧化成矿作用。因此, 这一成矿模式的提出, 对本区乃至中国东部油、煤气盆地的铀矿找矿, 铀资源潜力评价均具有重要的意义。

5 结 论

(1) 钱家店砂岩型铀矿体受晚白垩世姚家期辫状河道洼地、晚白垩世嫩江期末反转隆升剥蚀构造天窗、NNE 向贯通基底断裂“三位一体”控制。

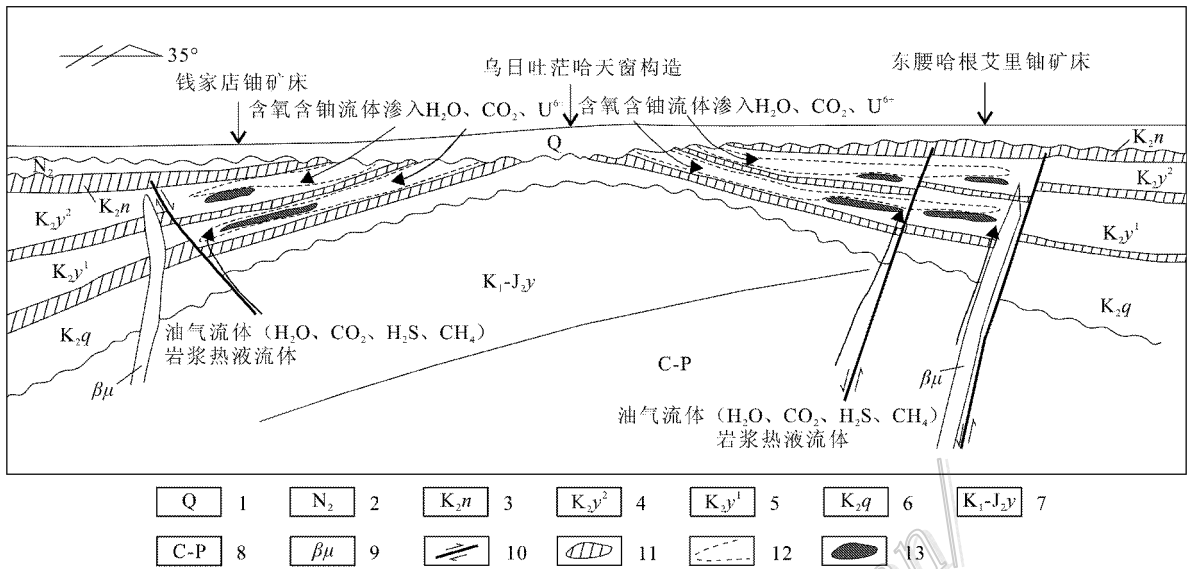


图 14 钱家店三源复成因砂岩型铀矿成矿模式图

1—第四系；2—新近系；3—上白垩统嫩江组；4—上白垩统姚家组上段；5—上白垩统姚家组下段；6—上白垩统青山口组；7—下白垩统—中侏罗统；8—石炭系—二叠系；9—古近纪辉绿岩脉；10—断裂；11—泥岩隔水层；12—层间氧化带；13—铀矿体

Fig. 14 Metallogenic model of the Qianjiadian polygenetic and compound uranium deposit

1—Quaternary；2—Neogene；3—Upper Cretaceous Nenjiang Formation；4—Upper Member of Upper Cretaceous Yaojia Formation；5—Lower Member of Upper Cretaceous Yaojia Formation；6—Upper Cretaceous Qingshankou Formation；7—Lower Cretaceous-Middle Jurassic；8—Permian-Carboniferous；9—Paleogene diabase dike；10—Fault；11—Mudstone waterproof layer；12—Interlayer oxidation zone；13—Uranium ore body

(2) 矿体为似层状、透镜状，矿床矿物组合为草莓状黄铁矿、胶黄铁矿-沥青铀矿组合及方解石-石英-沥青铀矿组合，矿床蚀变主要为高岭石、伊利石、蒙脱石化及硅化、碳酸盐化、黄铁矿化、赤铁矿化 2 种类型；U 元素与 Pb、S、Re、Mo、Ni、Zn、Co、Ba 等元素呈正相关，相关系数 ($\gamma_{0.05}$) 均大于 0.241，其中 U 与 Pb、Re、Mo 相关性密切。

(3) 矿床成矿铀源主要来自于蚀源区富铀花岗岩和含矿层姚家组本身，成矿流体来源于深部油气流体和大气水，成矿温度为中低温。

(4) 矿床成矿时代主要为晚白垩世 (96 ± 14) Ma、晚白垩世晚期 (67 ± 5) Ma 及古近纪 (40 ± 3) Ma 三个时期。

(5) 成矿作用经历了晚白垩世姚家期的同生沉积预富集作用、晚白垩世嫩江期末反转隆升剥蚀构造天窗、贯通性断裂控制的渗出与渗入的双混合铀成矿作用及古近纪辉绿岩岩浆热叠造铀成矿作用等 3 个阶段，为复成因砂岩型铀矿床类型。

参考文献/References

陈肇博, 赵凤民. 2002. 可地浸型铀矿床的形成模式和在中国的找矿前景 [J]. 铀矿地质, 19(3): 127-133.

陈肇博, 陈祖伊, 李胜祥. 2003. 层间氧化带砂岩型与古河谷砂岩型铀矿成矿地质特征对比 [J]. 世界核地质科学, 20(1): 1-10.

迟元林, 云金表, 蒙启安. 2002. 松辽盆地深部结构及成盆动力学与油气聚集 [M]. 北京: 石油工业出版社.

董文明, 李子颖, 郭庆银, 高大裘. 2005. 内蒙古西胡里吐盆地构造-水文地质演化与砂岩型铀成矿作用 [J]. 铀矿地质, 21(3): 283-286.

高瑞祺, 蔡希源. 1997. 松辽盆地油气田形成条件与分布规律 [M]. 北京: 石油工业出版社.

李胜祥. 2002. 松辽盆地地质演化史与砂岩型铀矿找矿方向研究 [博士学位论文]. 核工业北京地质研究所. 159-163.

罗毅, 马汉峰, 何中波. 2009. 松辽盆地砂岩型铀矿成矿条件分析与成矿远景预测 [A]. 核工业北京地质研究院科技论文集 [C]. 北京: 地质出版社. 99-107.

马汉峰. 2009. 松辽盆地钱家店铀矿床成矿机理研究 [博士学位论文]. 核工业北京地质研究所. 76-79.

王东坡, 刘立, 张立平, 吕传江. 1995. 松辽盆地白垩纪古气候沉积旋回层序地层 [M]. 长春: 吉林大学出版社.

夏毓亮, 等. 2002. 中国北方主要产铀盆地砂岩铀矿成矿年代学、地质学及探测技术 [M]. 北京: 原子能出版社. 166-177.

Adams S S and Cramer R T. 1985. Data-process-criteria model for roll-type uranium deposit [A]. Vienna: Iaea-Tecdoc-328, 383-399.

Adler H H. 1974. Concept of uranium-ore formation in reducing environments in sandstones and other sediments, in formation of uranium ore deposits [C]. Vienna: Atomic Energy Agency. 141-168.

Austin S R. 1970. Some patterns of sulfur isotope distribution in uranium deposits: Wyoming Geological Association [C]. Earth Science Bulletin, 3(2): 5-22.