

# 河北张麻井矿床的矿物学研究及其对铀钼成因关系的启示\*

朱斌, 黄志新, 钟军, 东前, 焦永玲

(中核集团铀资源勘查与评价重点实验室 核工业北京地质研究院, 北京 100029)

**摘要** 张麻井铀钼矿床是中国北方地区最大的火山岩型铀钼矿床。为探讨该矿床的铀钼成因关系,对浸染状铀(钼)矿石开展了矿物学和元素地球化学研究。除沥青铀矿外,铀石也是该矿床的一种重要铀矿物,常呈他形粒状,与胶硫钼矿、闪锌矿共生。元素面扫描结果显示,铀与钼元素的空间分布范围非常一致,表明铀和钼可能为同一期成矿作用的产物。此外,相较于矿化的核部,边部的铀含量降低,钼含量升高,反映存在一期独立的富钼流体成矿作用。结合矿床地质特征和岩石地球化学特征,认为张麻井矿床中浸染状矿体具有斑岩型矿化的特点,暗示其早期铀(钼)矿化可能为斑岩型矿化。

**关键词** 地球化学;火山岩型铀钼矿;成因关系;斑岩型矿化;张麻井矿床

**中图分类号**: P618.65; P619.14

**文献标志码**: A

## Mineralogical study of Zhangmajing deposit, Hebei Province: Implications for genetic relationship between U and Mo

ZHU Bin, HUANG ZhiXin, ZHONG Jun, DONG Qian and JIAO YongLing

(CNNC Key Laboratory of Uranium Resources Exploration and Evaluation Techniques, Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China)

### Abstract

The Zhangmajing U-Mo deposit is the largest volcanic type uranium deposit in North China. In order to constrain the genetic relationship between uranium and molybdenum in the orebody, the authors carried out mineralogical and geochemical study of disseminated Mo-(U) ore. In addition to pitchblende, coffinite is also an important uranium mineral in the deposit, which usually coexists with jordisite and sphalerite as anhedral grains. Element scanning of thin sections shows that the spatial distribution of uranium and molybdenum is well consistent, indicating that uranium and molybdenum enrichment was probably formed in the same mineralization. In addition, compared with the core of the mineralization, the uranium content in the rim is relatively lower while the molybdenum content is relatively higher, which indicates the existence of an independent molybdenum-rich fluid mineralization. Combined with other geological and geochemical characteristics, the authors hold that the disseminated orebody in the Zhangmajing deposit has the features of porphyry mineralization, which may indicate a porphyry genesis for the early Mo-(U) mineralization.

**Key words:** geochemistry, volcanic uranium-molybdenum deposit, genetic relationship, porphyry mineralization, Zhangmajing deposit

\* 本文得到国防科工局核能开发项目(编号: HD037-3)、国家自然科学基金面上项目(编号: 41772082)和中国核工业地质局铀矿地质项目(编号: 201931)联合资助

第一作者简介 朱斌,男,1989年生,博士,高级工程师,从事铀矿地质勘查与科研工作。Email: zhubin2016@126.com

收稿日期 2020-05-29; 改回日期 2020-12-22。秦思婷编辑。

张麻井(460)铀钼矿床是中国北方地区最大的火山岩型铀矿床,其中,铀矿、钼矿资源量均达大型规模(邱沙等,2016)。迄今,诸多学者对该矿床的成岩成矿年龄(李耀崧,1989;张振强,2001;巫建华等,2015;2017)、蚀变矿化特征(周德安,1988;罗毅,1993;1994;陈东欢等,2011a;孟艳宁等,2014)、构造环境特征(罗毅,1993;1994;任之鹤等,1997)、成矿流体特征(陈安福等,1987;陈东欢等,2011b;黄志新等,2014)、矿床成因(沈光银,2007;刘学武等,2010;芮果桢,2010)、成矿模式(张振强,2001;罗毅,1993;1994)以及铀的富集机制(周德安,1989;郭鸿军等,2009)等方面开展了较为全面的研究。总体上看,张麻井铀钼矿床是发育于火山塌陷盆地中的热液型铀钼矿床,其成矿岩浆是古太平洋板块向欧亚板块俯冲过程中诱发基底变质岩重熔形成的,矿体受断裂及流纹斑岩体控制明显,垂向上发育3期铀矿化,成矿流体具有中高温-低温演化的特点。然而,关于矿石中铀和钼的成因关系仍不清楚,特别是早期浸染状钼(铀)矿体的成因,这严重制约了对张麻井铀钼矿的成因认识。

矿床成因直接决定了矿区的找矿思路与找矿方向,是指导矿产勘查的重要依据。20世纪90年代以来,核工业地勘单位在沽源及其邻区陆续开展了一系列地表和深部勘查工作,却始终没有新的找铀矿突破。矿床成因方面的研究不足是制约该地区铀矿资源量扩大的主要原因。通常,不同类型矿床具有不同的成矿矿物种类及矿物组合,且成矿矿物和赋矿岩石的元素地球化学特征往往存在显著差异,因此,对矿床开展详细的矿物学及元素地球化学研究,可有效制约成矿元素的共伴生关系,进而为矿床成因提供约束。本文对张麻井铀钼矿床中的浸染状钼(铀)矿石开展了较为详细的矿物学和元素地球化学研究,探讨了铀钼矿的成因关系,并对矿床成因提出了新的认识和见解。

## 1 区域地质背景

研究区位于华北陆块北缘(图1a)燕辽火山岩带上,该带是中国重要的火山岩型铀矿带,由众多火山岩盆地组成。沽源火山岩盆地位于该带西段,整体呈NE向展布,为一不对称断陷式盆地。盆地边界受SN向赤城-沽源-哈巴嘎区域深断裂、EW向崇礼-赤城深断裂和NE向张北断裂所控制(图1b)。

沽源火山盆地发育典型的二元结构,基底为新太古界谷咀子群和红旗营子群变质岩系,盖层为中生代火山岩和沉积岩,局部发育海西期花岗岩、燕山期流纹斑岩、石英斑岩、正长斑岩等(巫建华等,2015)。基底谷咀子群为一套海相基性火山岩建造,发育角闪岩相-麻粒岩相变质作用,形成角闪斜长片麻岩、二辉斜长麻粒岩和磁铁石英岩;红旗营子群为一套浅海相含碳砂泥岩、碳酸盐岩及中基性火山岩建造,发育绿片岩相-角闪岩相变质作用,形成黑云变粒岩、浅粒岩、片麻岩、斜长角闪岩、大理岩和钾质混合岩。在钾质混合岩形成过程中,伴有铀、钍、钾的明显增加,形成一些局部的富铀基底,为后期的铀成矿奠定了基础(刘小宇等,1996)。下白垩统张家口组是该区最主要的火山岩盖层,为一套中酸性火山岩建造(巫建华等,2015;2017),主要由火山熔岩(粗面岩和流纹岩)组成,间夹少量凝灰岩和角砾岩。全岩的Sr-Nd同位素及锆石的Hf同位素组成均表明,张家口组火山岩为基底红旗营子群部分熔融的产物(杨进辉等,2006;张亚菲等,2016)。新近纪时期,盆地东侧围场地区和西侧张北地区发育汉诺坝组玄武岩。

## 2 矿床地质特征

张麻井铀钼矿床位于沽源火山盆地西部(图1b)。矿区地层由下白垩统张家口组二段的粗面岩和张家口组三段的流纹质火山岩和火山沉积岩组成,二者以 $F_{45}$ 断裂为界呈断层接触(图2a)。张家口组三段酸性火山岩共分为8层,3个火山旋回,岩性包括流纹岩、熔结凝灰岩、晶屑凝灰岩、火山角砾岩等,是矿区内除流纹斑岩以外的重要赋矿层位(图2a、b)。

矿区内断裂构造发育,其中,NEE向 $F_{45}$ 断裂为区域性基底伸展断裂,形成于燕山早期;NW向 $F_3$ 为 $F_{45}$ 的次级张扭性断裂,形成于燕山晚期;NNE向的 $F_2$ 、 $F_4$ 、 $F_5$ 、 $F_6$ 和NNW向的 $F_7$ 均为燕山晚期形成的走滑断裂,规模较小(罗毅,1993)。该矿床的主要控矿断裂为 $F_3$ 断裂,在其和 $F_{45}$ 的复合部位,发育着控制矿体的流纹斑岩,呈NW向产出(图2a),向NE陡倾(图2b)。矿体主要发育于流纹斑岩体内部,远离岩体,矿化迅速减弱或消失(周德安,1988)。总体来看,铀钼矿化严格受岩体(流纹斑岩)和构造控制。

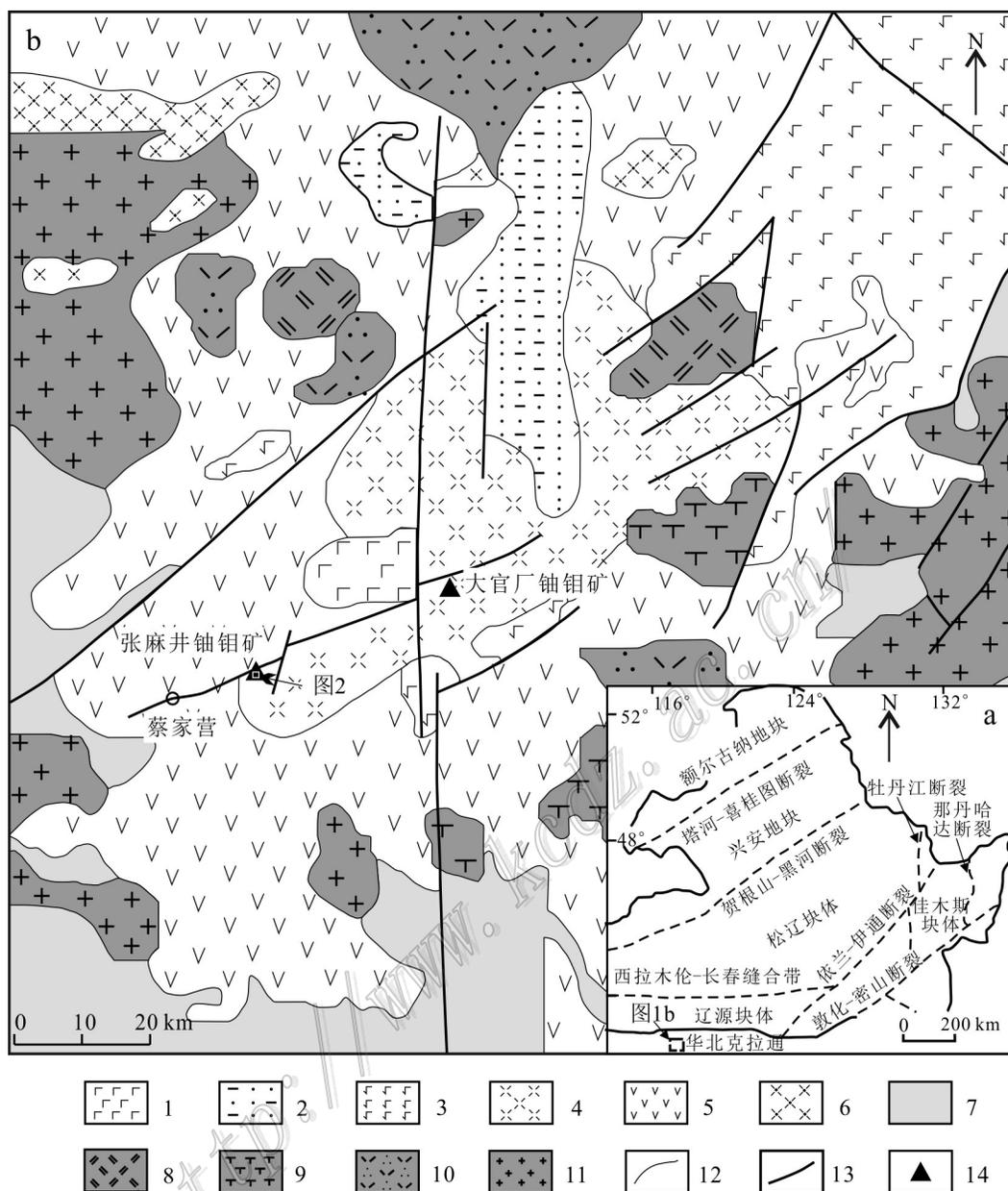


图1 沽源地区大地构造位置(a, 据李真真等, 2014)和沽源地区地质简图(b, 据巫建华等, 2015)

1—新近系汉诺坝组; 2—下白垩统青石砬组; 3—下白垩统义县组; 4—下白垩统张家口组第三段; 5—下白垩统张家口组第二段; 6—下二叠统大石寨组; 7—新太古界红旗营子群; 8—燕山早期二长斑岩; 9—燕山早期正长斑岩; 10—燕山早期石英斑岩; 11—海西期花岗岩; 12—地质界线; 13—断裂; 14—铀钼矿床

Fig. 1 Tectonic map (a, modified after Li et al., 2014) and simplified geological map (b, modified after Wu et al., 2015) of Guyuan area

1—Neogene Hannuoba Formation; 2—Lower Cretaceous Qingshila Formation; 3—Lower Cretaceous Yixian Formation; 4—The third member of the Lower Cretaceous Zhangjiakou Formation; 5—The second member of the Lower Cretaceous Zhangjiakou Formation; 6—Lower Permian Dashizhai Formation; 7—Neoproterozoic Hongqiyingzi Group; 8—Early Yanshanian monzonite porphyry; 9—Early Yanshanian syenite porphyry; 10—Early Yanshanian quartz porphyry; 11—Hercynian granite; 12—Geological boundary; 13—Fault; 14—Uranium and molybdenum deposit

张麻井矿床的铀矿化具有埋藏浅、品位高、分布集中、与钼矿化紧密共生的特点。垂向上, 具有明显的分带性。自地表向深部可划分为次生淋滤形成的

蓝黑色铀钼矿体(1508 m附近)、原生黑色细脉状-浸染状贫铀矿体(1349~1527 m)和后生红色脉状富铀矿体(1476~1067 m)(周德安, 1988)(图2b), 3个矿

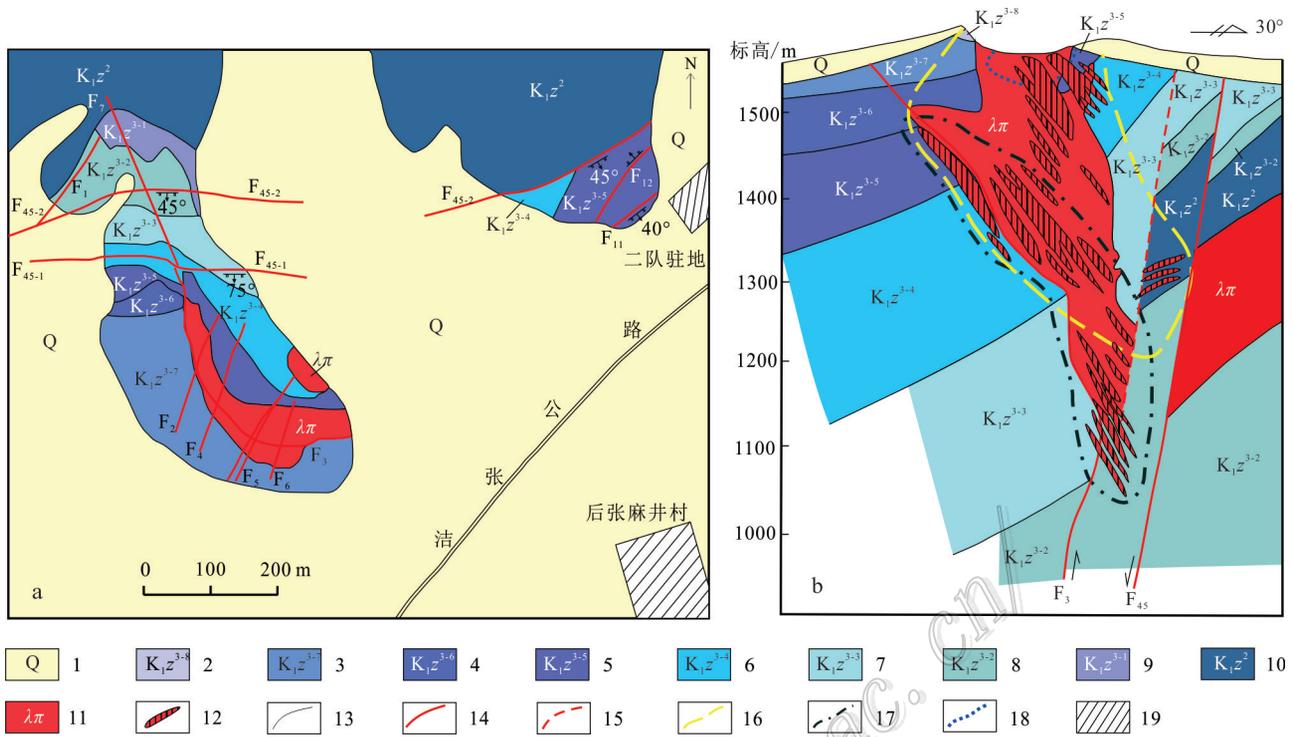


图2 张麻井铀钼矿床地质简图(a)和剖面示意图(b)(据周德安,1988;罗毅,1993)

1—第四系沉积物;2—下白垩统张家口组三段第八层球粒纹岩;3—下白垩统张家口组三段第七层熔结凝灰岩;4—下白垩统张家口组三段第六层角砾凝灰岩;5—下白垩统张家口组三段第五层细纹状流纹岩;6—下白垩统张家口组三段第四层角砾凝灰岩;7—下白垩统张家口组三段第三层钾质流纹岩;8—下白垩统张家口组三段第二层细纹状流纹岩;9—下白垩统张家口组三段第一层熔结凝灰岩;10—下白垩统张家口组二段粗面岩;11—早白垩世流纹斑岩;12—矿体;13—地质边界;14—实测断层;15—推测断层;16—原生黑色浸染状矿化带;17—后生红色脉状矿化带;18—表生蓝黑色淋滤矿化带;19—村庄

Fig. 2 Geological sketch map (a) and geological section (b) of the Zhangmajing U-Mo deposit (modified after Zhou, 1988; Luo, 1993)

1—Quaternary deposits; 2—Spheroidal rhyolite in the third member of the Lower Cretaceous Zhangjiakou Formation; 3—Lava breccia in the third member of the Lower Cretaceous Zhangjiakou Formation; 4—Tuff breccia in the third member of the Lower Cretaceous Zhangjiakou Formation; 5—Thin laminated rhyolite in the third member of the Lower Cretaceous Zhangjiakou Formation; 6—Tuff breccia in the third member of the Lower Cretaceous Zhangjiakou Formation; 7—K-rhyolite in the third member of the Lower Cretaceous Zhangjiakou Formation; 8—Thin laminated rhyolite in the third member of the Lower Cretaceous Zhangjiakou Formation; 9—Lava breccia in the third member of the Lower Cretaceous Zhangjiakou Formation; 10—Trachyte in the second member of the Lower Cretaceous Zhangjiakou Formation; 11—Early Cretaceous rhyolite porphyry; 12—Ore body; 13—Geological boundary; 14—Fault; 15—Inferred fault; 16—Original black disseminated mineralization belt; 17—Epigenetic red vein-like mineralization belt; 18—Secondary bluish black mineralization belt; 19—Village

化带的总垂向幅度达500 m。从矿物组成上看,原生浸染状矿石主要由胶硫钼矿、辉钼矿、胶状黄铁矿、闪锌矿、沥青铀矿和萤石组成,矿石中钼品位较高(0.55%),而铀品位较低(0.05%~0.20%)(罗毅,1993),为钼(铀)矿体;近地表的次生淋滤钼钼矿体是原生浸染状矿体叠加改造的产物,以胶硫钼矿氧化为蓝钼矿为主要特点。后生脉状矿石是叠加于早期原生浸染状矿体的产物,主要由沥青铀矿、金属硫化物和玉髓组成,铀品位高(一般为0.3%,富矿可达1%~2%),是该矿床最主要的铀矿体。此外,钼矿化

在垂向上也具有分带性,矿床的中上部以浸染状的胶硫钼矿为主,下部以脉状的辉钼矿为主(罗毅,1993)。

流纹斑岩体发育不同程度的热液蚀变,由深向浅依次为赤铁矿化-钾化带(1476 m标高以下)、水云母化-蒙脱石化带(1527~1476 m标高之间)和褐铁矿化-硅化带(1527 m标高以上)。从蚀变组合及空间分布上看,其与斑岩型矿床的钾化带、泥化带和顶部的硅化带相对应。从矿化与蚀变的关系来看,钼矿化主要与红色、灰黑色硅化有关,为深部钾交代去硅

作用形成的硅质流体向上迁移的产物;赤铁矿化主要发育在矿床的中、下部,是脉状铀矿化最重要的近矿蚀变,在空间上和成因上与沥青铀矿和多金属硫化物矿脉密切伴生(罗毅,1993)。

### 3 样品采集和分析方法

系统采集了张麻井铀钼矿床的典型浸染状铀矿,包含4块地表采坑样品(HB14-125、HB14-126、HB14-128和HB14-143)及5块钻孔岩芯样品(HB14-184、HB14-185、HB14-188、HB14-193和HB14-194),样品标高位于1333~1520 m,为原生黑色细脉状-浸染状富钼贫铀矿体的主要分布标高。矿石原岩为流纹斑岩,呈蓝黑色至黑色,块状构造,斑状结构,斑晶主要由钾长石和石英组成(图3a、b)。钾长石呈自形板状-半自形粒状,粒径2~5 mm,含量约5%,长石斑晶多发育绢云母化、黏土化,部分斑晶蚀变严重仅保留斑状晶型(图3a);石英斑晶多呈自形-半自形粒状,粒径2~4 mm,含量约10%。基质由细小石英和长石微晶组成,部分为玻璃质。另外,岩石中还有大量不透明金属矿物(1%),主要为钛铁矿和黄铁矿(图3c、d)。

虽然矿石中铀含量较高(能谱测量eU可达 $1725.05 \times 10^{-6}$ ),但手标本尺度下,肉眼无法识别出铀矿物。在光学显微镜下,薄片中的铀矿物和钼矿物十分细小,难以判别其矿物类型,因此,利用电子探针对矿石中铀、钼矿物类型及元素分布范围开展研究。光薄片矿物的成分特征及元素面扫描信息在核工业北京地质研究院分析测试中心的电子探针实验室完成。采用日本JEOL JXA-8100型电子探针,分析测试条件为:加速电压20 kV,束流 $1 \times 10^{-8}$  A,分析束斑直径2  $\mu\text{m}$ 。

### 4 分析结果

张麻井铀钼矿床中铀矿物和钼矿物的粒径都很小(通常不足10  $\mu\text{m}$ ),并且矿物种类繁多,在光学显微镜下难以识别和区分,因此,其矿相学研究主要基于电子显微镜开展。前人研究表明,本区的铀矿物主要为沥青铀矿(周德安,1988;罗毅,1993;1994)。本次研究发现在浸染状矿石中,除沥青铀矿外,铀石是最重要的铀矿物。电子探针分析结果(表1)显示,铀矿物中的 $w(\text{SiO}_2)$ 较高,为0.63%~

27.02%,平均 $w(\text{SiO}_2)$ 高达9.82%。此外,铀矿物中 $\text{SiO}_2$ 含量与氧化物总量之间具有较好的正相关性,即 $\text{SiO}_2$ 含量越高,氧化物总量越接近100%,满足铀石( $\text{U}(\text{SiO}_4)_{1-x}(\text{OH})_{4x}$ )的化学组成特征。BSE(背散射)图像(图4b~d)显示,铀石通常发育在绢云母化和钼矿化强烈的部位,通常与胶硫钼矿、闪锌矿共生,呈他形粒状,粒度极微小,较大的为2~5  $\mu\text{m}$ ,大部分小于1  $\mu\text{m}$ ,大多数薄片中的铀均以铀石的形式存在,仅在1个硅化-萤石化强烈的铀矿化样品中,发现铀矿物以沥青铀矿的形式为主,呈他形粒状或团块状,1~10  $\mu\text{m}$ ,发育在硅化-萤石化强烈的部位或萤石脉边缘。钼矿物主要为胶硫钼矿,呈细脉状、胶状和细粒浸染状。在地表矿坑矿石样品中,可见胶硫钼矿氧化为蓝钼矿。除胶硫钼矿外,还发现有少量钼铅矿,呈细脉状切穿黄铁矿和胶硫钼矿。

通过电子探针原位分析手段,对浸染状钼(铀)矿石薄片开展了微观元素含量面扫描,测定了铀钼矿化区域内铀和钼的分布和丰度。从元素分布范围来看(图5),铀与钼的空间分布范围非常一致,在全部的扫描样品中,二者均非常吻合的分布在同一空间,这种对应关系同样表明铀和钼应为同一期成矿作用的产物。从含量来看,多数样品(区域)中钼含量均大于铀含量,表明以钼矿化为主。对比同一铀钼矿化区域的铀钼含量分布特征可以发现,多数情况下,相较于核部,边部的钼含量更高,而铀含量相对降低(图5),反映存在1期富钼流体成矿作用,叠加作用于早期的钼(铀)成矿作用之上。

## 5 讨论

### 5.1 铀和钼的成因关系

全岩的微量元素组成显示,浸染状矿石中铀和钼的含量具有良好的正相关关系,且其Pearson相关系数达0.87(相关系数为1时代表完全相关),具有很高的相关性(黄志新等,2016),表明二者应为同一期矿化的产物。

从矿物的元素组成上看(表1),浸染状矿石中铀和钼总是相伴产出。铀矿物中均含有较高的钼含量(0.46%~46.91%),钼含量高时形成铀钼矿(化学式为: $\text{U}(\text{MoO}_4)_2$ ,在理想条件下, $w(\text{UO}_2)$ 为48.4%; $w(\text{MoO}_3)$ 为51.6%)。相对的,铀也以类质同象的形式分布于胶硫钼矿之中(孟艳宁等,2014)。矿物产出状态显

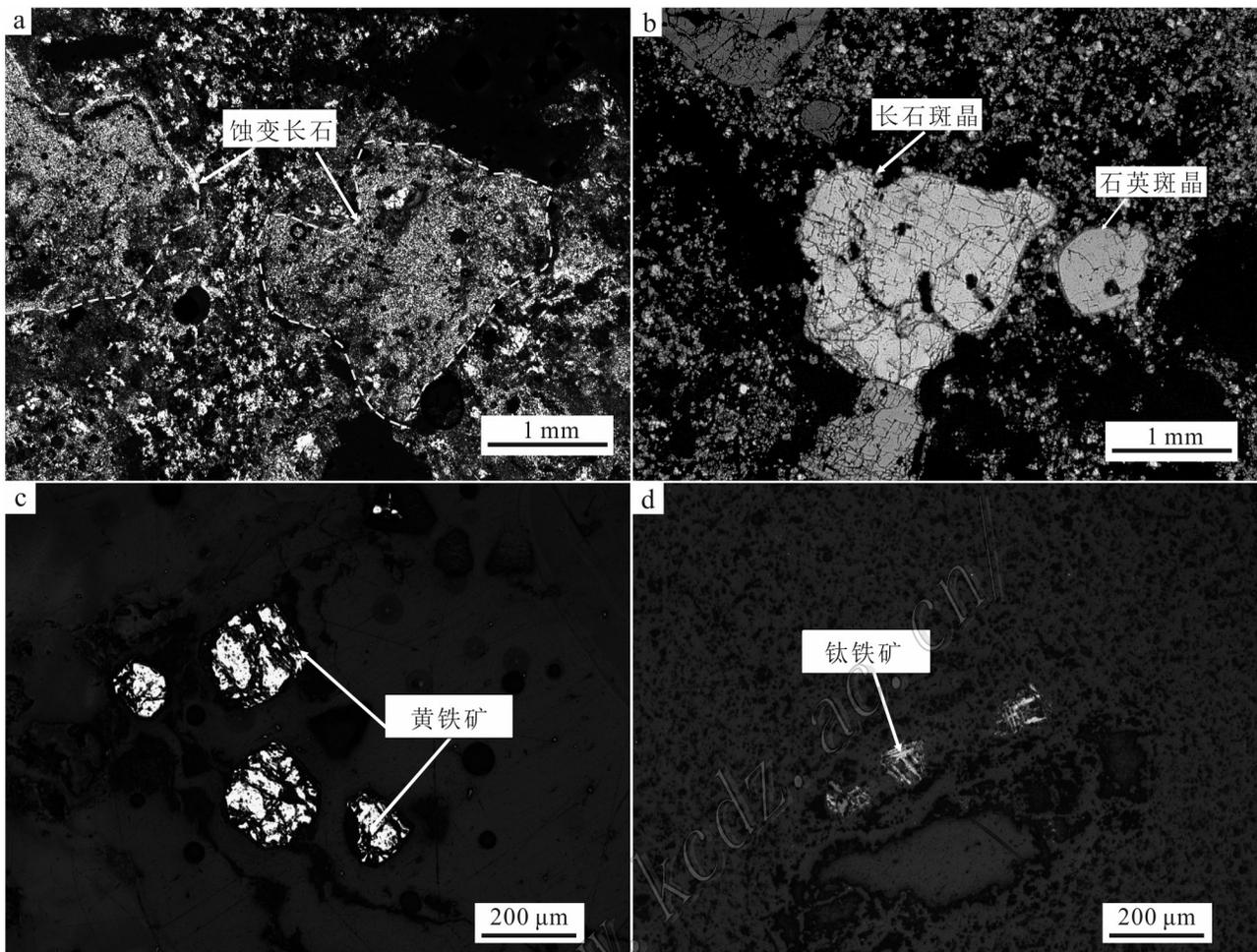


图3 矿化流纹斑岩的岩相学特征

a. 钾长石斑晶发育强烈的黏土化; b. 新鲜的钾长石和石英斑晶; c. 流纹斑岩中的黄铁矿; d. 流纹斑岩中的钛铁矿

Fig. 3 Petrological characteristics of mineralized rhyolite porphyry

a. Intensive clayization of K-feldspar phenocryst; b. Fresh K-feldspar and quartz phenocrysts; c. Pyrite in rhyolite porphyry; d. Ilmenite in rhyolite porphyry

示, 铀石与胶硫钼矿颗粒呈接触共生的典型现象(图4b、c), 未观察到铀矿物与钼矿物间的包裹关系; 此外, 铀矿物和钼矿物的颗粒大小也不存在明显差异。上述均表明, 浸染状矿石中铀和钼应为同一期矿化的产物。

从矿石中铀和钼元素分布特征来看, 铀与钼的空间分布范围非常一致, 二者均非常吻合的分布在同一空间(图5), 这种对应关系同样表明铀和钼应为同一期成矿作用的产物。

值得注意的是, 同一铀钼矿化区域的铀钼含量分布特征显示, 相较于核部, 边部的钼含量更高, 而铀含量相对降低(图5), 反映存在1期富钼流体成矿作用, 叠加作用于早期的钼(铀)成矿作用之上。这

一观点与钼(铀)矿体外围发育1层单钼型矿化(宋凯等, 2019)相吻合。前人的研究表明, 早期浸染状矿化(88~103 Ma)后, 张麻井矿床发育1期脉状铀矿化(24 Ma)(李耀崧, 1989; 张振强, 2001)。从元素含量上看, 脉状矿体相比于浸染状矿体具有更高的铀含量和较低的钼含量(周德安, 1988; 罗毅, 1994), 表明此次矿化为单钼型矿化。若富钼流体成矿作用发生于脉状铀矿化之后, 则脉状矿石相比于浸染状矿石不应具有较低的钼含量, 因此, 钼矿化作用应介于早期浸染状钼(铀)矿化与晚期脉状单钼型矿化之间。

## 5.2 矿床成因

钻探揭露显示, 垂向上铀钼矿体分带明显, 呈3

表1 张麻井铀钼矿床赋铀矿物电子探针成分分析结果

Table 1 EPMA result of representative uranium minerals in the Zhangmajing U-Mo deposit

组分	HB14-125		HB14-126		HB14-128		HB14-143	HB14-184	
	铀石	铀石	铀石	铀钼矿	铀石	铀石	铀石	铀石	铀石
	<i>w(B)/%</i>								
SiO <sub>2</sub>	22.62	15.24	4.56	5.82	7.42	13.55	7.96	5.38	9.69
TiO <sub>2</sub>	0.57	/	0.69	0.73	1.76	0.65	0.26	0.25	/
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.48	0.63	0.06	0.58	0.43	0.23	0.40	1.40	0.49
FeO	1.65	3.95	0.67	0.27	0.18	0.16	0.40	0.42	0.21
CaO	1.60	0.53	0.39	0.08	1.68	0.37	1.05	0.77	1.23
K <sub>2</sub> O	0.29	0.41	0.52	0.27	0.33	0.29	0.37	0.91	0.57
Na <sub>2</sub> O	/	/	0.07	0.04	0.17	0.09	0.15	0.58	0.42
MoO <sub>3</sub>	5.07	0.88	5.90	41.91	13.53	9.07	6.79	10.79	10.00
UO <sub>2</sub>	65.45	66.42	74.28	44.36	62.47	62.92	71.87	61.58	64.94
ThO <sub>2</sub>	0.87	0.34	/	0.04	1.30	0.54	0.68	/	/
PbO	/	0.79	/	/	/	/	/	/	/
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.78	1.05	/	0.06	0.73	0.38	/	0.09	2.77
As <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	/	/	/	/	1.66	2.71	1.10	1.97	1.67
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.47	1.66	/	0.40	3.08	0.93	0.45	0.50	1.50
总和	99.85	91.90	87.14	94.56	94.74	91.89	91.48	84.64	93.49
组分	HB12-184	HB14-185		HB14-188		HB14-193		HB14-194	
	铀石	铀石	铀石	铀石	铀石	铀石	沥青铀矿	沥青铀矿	沥青铀矿
	<i>w(B)/%</i>								
SiO <sub>2</sub>	10.10	7.48	4.76	27.02	15.41	16.39	0.63	1.35	1.32
TiO <sub>2</sub>	2.51	3.28	1.45	0.31	0.09	0.27	0.27	0.43	0.39
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.53	0.24	0.18	0.51	0.50	0.51	0.09	0.11	0.26
FeO	0.54	0.11	0.57	0.17	0.25	0.12	1.09	0.89	0.87
CaO	1.23	1.14	1.58	1.53	1.31	0.86	0.56	0.95	1.52
K <sub>2</sub> O	0.39	0.38	0.41	0.38	0.39	0.40	0.42	0.56	0.46
Na <sub>2</sub> O	0.04	0.87	1.02	0.10	0.42	0.46	0.26	0.14	0.13
MoO <sub>3</sub>	1.32	1.43	2.03	2.04	3.01	1.90	0.88	0.46	0.50
UO <sub>2</sub>	55.92	77.28	76.32	57.13	61.39	59.36	61.99	78.13	77.64
ThO <sub>2</sub>	0.17	/	/	/	0.17	0.12	/	/	/
PbO	/	0.09	0.31	/	0.48	/	1.98	3.40	3.33
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.32	0.47	0.30	3.14	3.06	6.91	/	/	/
As <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.08	0.67	0.79	0.24	0.50	0.10	0.65	0.49	0.69
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	3.00	1.32	0.89	2.54	2.16	1.77	0.94	1.44	1.51
总和	86.15	94.76	90.61	95.11	89.14	89.17	69.76	88.35	88.62

注:“/”代表检测限以下。

期矿化,自深部向地表可划分为后生红色脉状富铀矿体(铀矿的主体)、原生黑色浸染状钼(铀)矿体和表生叠加淋滤形成的蓝黑色铀钼矿体(周德安, 1988)(图1b)。脉状铀矿体的形成年龄(24 Ma)与该区广泛发育的汉诺坝组玄武岩的喷发时代(王慧芬等, 1985; Zhao et al., 2013)一致,且得到了热液矿物中流体包裹体的 He-Ar 同位素组成的支持(<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He 为 0.64~6.73 Ra,成矿流体以幔源为主)(朱

斌等, 2019)。表生淋滤型铀钼矿体的形成年龄(10~2 Ma)与喜马拉雅造山期研究区逐渐抬升的构造事件相吻合。早期浸染状钼(铀)矿体的形成年龄(88~103 Ma)明显小于赋矿流纹斑岩的年龄(138 Ma),存在显著的岩、矿时差,这是大多数学者将张麻井矿床划归为火山岩型铀矿床(热液脉型铀矿)的一个重要原因。然而,浸染状钼(铀)矿体的形成年龄,在该地区缺乏地质构造事件的响应。值得注意的是,由于

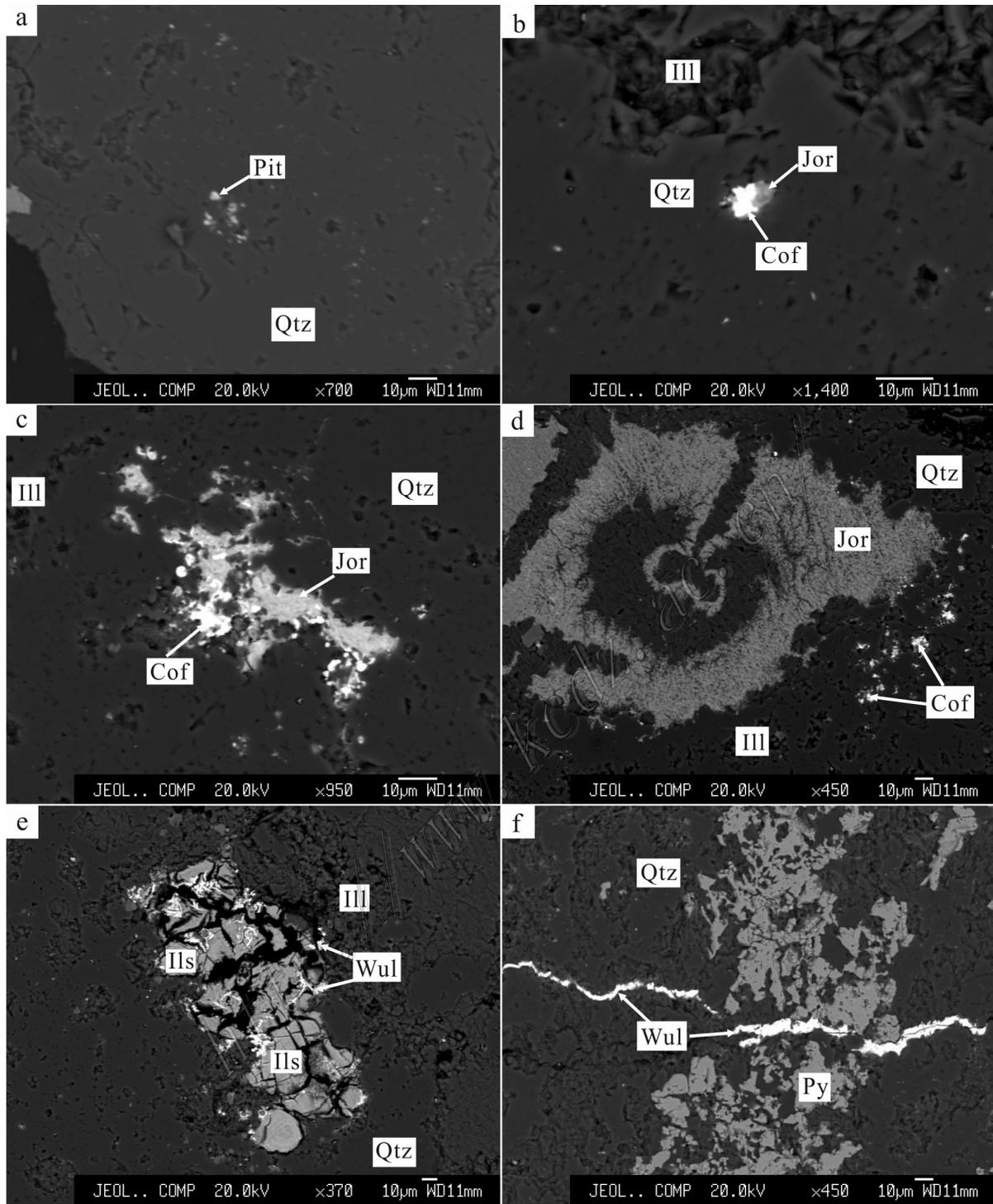


图4 张麻井铀钼矿床中铀、钼矿物的电子探针背散射图像

a. 细小的沥青铀矿颗粒; b. 铀石与胶硫钼矿接触共生; c. 胶硫钼矿与铀石接触共生; d. 胶硫钼矿和细小的铀石颗粒; e. 次生的蓝钼矿及钼铅矿; f. 脉状钼铅矿切穿黄铁矿

Pit—沥青铀矿; Cof—铀石; Jor—胶硫钼矿; Ils—蓝钼矿; Wul—钼铅矿; Qtz—石英; Ill—伊利石; Py—黄铁矿

Fig. 4 BSE images of uranium and molybdenum minerals in the Zhangmajing U-Mo deposit

a. Tiny pitchblende particles; b. Coexisting of coffinite and jordanite; c. Coexisting of jordanite and coffinite; d. Jordanite and tiny coffinite particles; e. Secondary wulfenite and ilsemannite; f. Pyrite cut by wulfenite vein

Pit—Pitchblende; Cof—Coffinite; Jor—Jordanite; Ils—Ilsemannite; Wul—Wulfenite; Qtz—Quartz; Ill—Illite; Py—Pyrite

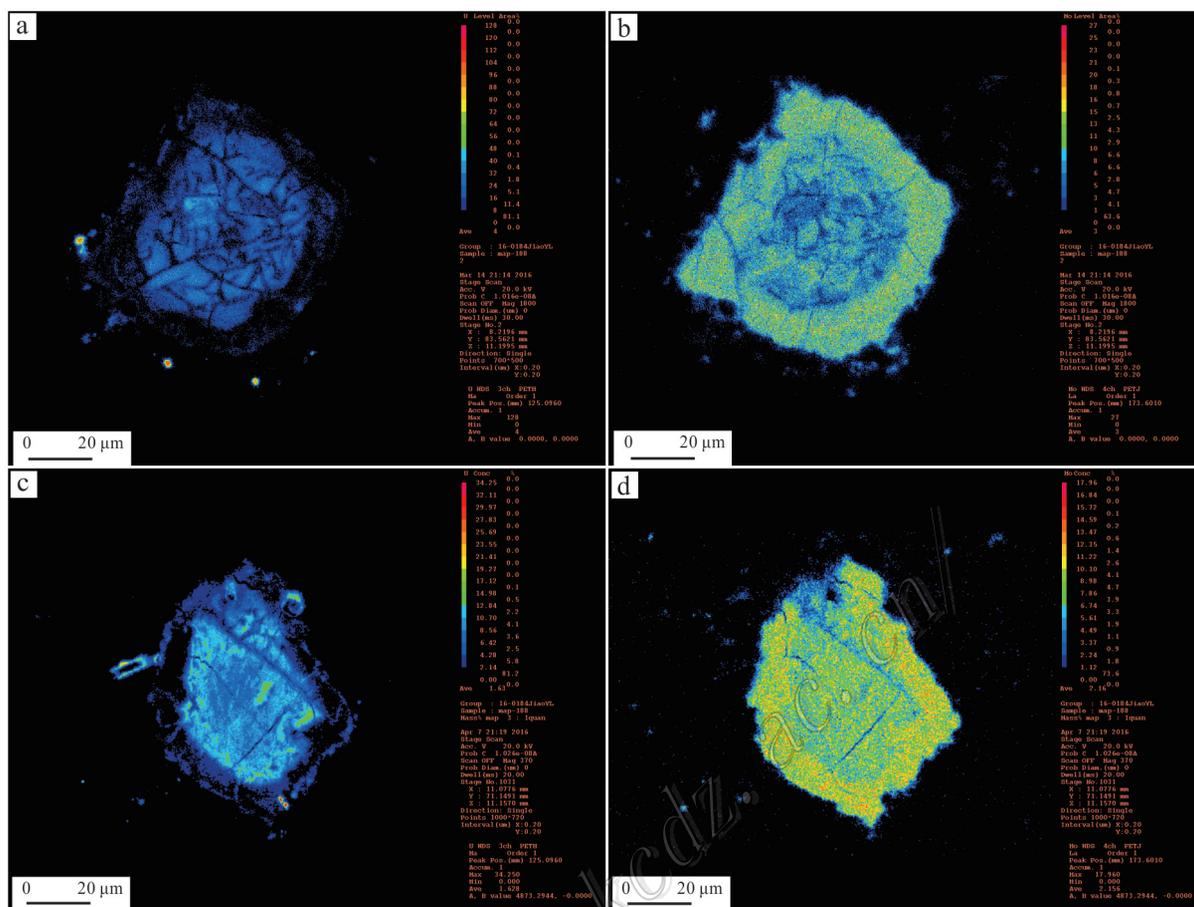


图 5 张麻井(460)铀钼矿床矿石薄片扫描铀(a、c)、钼(b、d)元素含量分布

Fig. 5 Element scanning of thin sections showing the spatial distribution of U (a, c) and Mo (b, d) in the Zhangmajing U-Mo deposit

沥青铀矿的U-Pb同位素体系封闭性差,前人通过浸染状钼(铀)矿石全岩和其包含的沥青铀矿获得的U-Pb年龄数据质量并不高。张振强(2001)与李耀崧(1989)获得的浸染状钼(铀)矿石的年龄差距很大(103.4 Ma和88 Ma),因此,浸染状铀矿化的年龄并不可靠。其实,不难理解,沥青铀矿的U-Pb同位素体系封闭性较差,张麻井矿床在24 Ma发育1期脉状铀矿化,必然会对早期的浸染状矿体产生一定程度的改造,导致其年龄偏小。推测浸染状钼(铀)矿体的形成时代与流纹斑岩接近,可能并不存在显著的岩、矿时差。

此外,浸染状钼(铀)矿体与脉状铀矿体中的铀矿化存在显著差异。在早期浸染状矿体中,以钼矿化为主,铀矿化较弱,且多呈细脉浸染状,铀矿物除沥青铀矿外,还含有大量的铀石和铀钼矿;而晚期脉状矿体中,钼矿化较弱,铀矿化强烈,多呈脉状,铀矿

物以沥青铀矿为主。铀矿化特征的差异表明,早期浸染状矿体与晚期脉状矿体(火山热液脉型铀矿)可能具有不同的成因。

任之鹤等(1997)基于赋矿岩石为流纹斑岩以及铀钼矿体受斑岩体控制的特点,将张麻井矿床划归为斑岩型铀钼矿床,但该观点一直没有得到其他学者的支持。通过对张麻井矿床进行野外考察以及室内研究发现,其浸染状矿体符合斑岩型矿床的一些基本地质特征,依据如下:

(1) 在时间上、空间上、成因上与斑状结构的中酸性浅成或超浅成的小侵入体有关,张麻井矿床的铀钼矿体受流纹斑岩体控制,在斑岩体外围,矿化明显减弱至消失。目前唯一不足的是缺少精确的浸染状矿体的钼、铀成矿年龄数据,难以建立铀钼成矿年代与流纹斑岩的时间联系;

(2) 矿床受区域断裂-构造控制,矿体常受次一

级构造控制。张麻井矿床产于区域断裂 $F_{45}$ 上,受其次级断裂 $F_3$ 控制;

(3) 矿体的围岩多为致密的硅铝质岩石,可作为岩体顶盖的“隔挡层”,使矿液不易流通和散失,利于成矿。张麻井矿床的顶部围岩为张家口组三段的酸性流纹岩,岩石致密,是很好的顶盖“隔挡层”,同时,也成为该矿床铀矿化的一个潜在铀源;

(4) 矿床的围岩蚀变发育,常具有明显的水平和垂直分带,多数情况自岩体向外壳分为钾化带-石英绢云母化带-泥化带-青磐岩化带,4个带不一定全部都存在,最重要的是钾化带和石英绢云母化带。张麻井矿床中也发育有强烈的围岩蚀变。其核部发育强烈的钾长石化,向外发育硅化+绢云母化+黄铁矿化(对应斑岩型矿床的绢英岩化)带,蒙脱石化+水云母化(对应斑岩型矿床的泥化);

(5) 矿体多呈细脉浸染状、脉状、条带状等;金属矿物有黄铜矿、辉钼矿、方铅矿、闪锌矿等,常伴有黄铁矿。张麻井矿床中,早期浸染状矿石中的铀钼矿化呈细脉浸染状,且在矿体的底部,发育辉钼矿(斑岩型钼矿中的典型钼矿物),上部为胶硫钼矿(辉钼矿的低温相),反映成矿流体从高温向低温演化。此外,矿石中亦发育有黄铁矿和少量方铅矿、闪锌矿;

(6) 斑岩型矿床中,金属硫化物多数形成于 $350\sim 250^{\circ}\text{C}$ ,并一直延续到低温阶段。张麻井矿床浸染状矿体中,热液矿物的流体包裹体测温结果显示其成矿阶段流体的均一温度为 $250\sim 310^{\circ}\text{C}$ (罗毅,1993),为中-高温热液,与斑岩型矿床中金属硫化物的形成温度一致。晚期脉状钼矿石的成矿流体为 $150\sim 250^{\circ}\text{C}$ ,为中低温热液(罗毅,1993;黄志新等,2016),与典型的热液脉型铀矿化温度一致。

此外,同一成矿带上红山子地区小东沟钼矿为典型的斑岩型钼矿床,其辉钼矿的Re-Os同位素定年结果为 $135\sim 138\text{ Ma}$ (聂凤军等,2007;覃峰等,2008),与赋矿花岗斑岩的形成年龄一致,不存在岩矿时差。更为重要的是,小东沟矿床的花岗斑岩与沽源地区的流纹斑岩不仅形成时代一致,且具有一致的地球化学特征(富硅、富碱、贫铝、贫钙,燕式稀土元素配分,高Ga/Al比值等),均为伸展背景下的A型花岗岩(张连昌等,2008;覃锋等,2009;Zeng et al.,2010;2011;张亚菲等,2016)。

在很多火山岩型铀矿中,均发育铀钼共生的特点(张龙等,2020),且矿床深部多为辉钼矿,浅部为

胶硫钼矿(与辉钼矿化学成分一致,只是形成温度低),这是成矿流体温度降低的直接体现,在矿床类型上有从斑岩型向浅成低温热液型过渡的特点。此外,流体包裹体研究表明,斑岩型矿床的成矿流体多具有岩浆热液与天水(大气降水)混合的特征(Sillitoe,2010)。火山岩型铀钼矿床中,矿体常与超浅成的流纹斑岩有关,形成深度浅,更有利于天水的混合。当岩浆热液与天水(特别是氧化性的天水)混合后,导致成矿流体的温度降低,流体的氧逸度升高,进而将流纹斑岩及其围岩(多为酸性的火山岩,且一般具有较高的铀含量)中的铀元素萃取出来,并在特定的物理化学条件下沉淀成矿。

## 6 结 论

(1) 除沥青铀矿外,铀石和铀钼矿是张麻井矿床浸染状钼(铀)矿石中非常重要的铀矿物。

(2) 早期浸染状矿体中铀和钼的分布范围非常一致,铀钼矿化应为同一期矿化的产物。

(3) 存在一期独立的钼矿化作用介于早期浸染状钼(铀)矿化与晚期脉状单铀型矿化之间。

(4) 早期浸染状钼(铀)矿化具有斑岩型矿化的特点。

## References

- Chen A F. 1987. Study on the fluid inclusion of the No. 460 deposit[R]. Beijing Research Institute of Uranium Geology(in Chinese).
- Chen D H, Fan H H, Wang F G and He D B. 2011a. The alteration characteristics of uranium deposits in Guyuan-Hongshanzi area[J]. Uranium Geology, 27(2): 88-94(in Chinese with English abstract).
- Chen D H, Fan H H, Wang F G and He D B. 2011b. Multivariate isotope tracer in Guyuan-Hongshanzi uranium polymetallic belt[R]. Progress Report on China Nuclear Science and Technology, 2: 611-617(in Chinese with English abstract).
- Guo H J and Ma S K. 2009. Analysis of the ore-control factors and peripheral prospecting for the Zhangmajing U-Mo deposits in Guyuan, Hebei Province[J]. Geological Survey and Research, 33(3): 210-215(in Chinese with English abstract).
- Huang Z X, Li Z Y, Fan H H and Jiao Y L. 2014. Hot spot uranium mineralization in Guyuan area[J]. Mineral Deposits, 33(Supp.): 695-696(in Chinese).
- Huang Z X, Zhu B and Sun X C. 2016. Comprehensive evaluation of uranium polymetallic deposits in the western part of the northern margin of North China Block[R]. Beijing: Beijing Research Insti-

- tute of Uranium Geology(in Chinese).
- Li Y S. 1989. Isotope age of principal mineralization period in uranium deposit No. 460[J]. Uranium Geology, 5(4): 203-208(in Chinese with English abstract).
- Li Z Z, Li G M, Meng Z J, Qin K Z, Song G X, Jin L Y, Kan X S, Wang J and Zhang X N. 2014. Petrofacies classification, characteristics and formation mechanism of breccia in Chalukou giant molybdenum deposit of Da Hinggan Mountains[J]. Mineral Deposits, 33(3): 607-624(in Chinese with English abstract).
- Liu X W, Wang S Q and Fan B H. 2010. Discussion on the genesis of uranium-molybdenum ore deposit No. 460 in Guyuan, Hebei Province[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 25(1): 36-42(in Chinese with English abstract).
- Liu X Y and Chen Z B. 1996. Continental volcanism and uranium mineralization[M]. Beijing: Atomic Energy Press. 39-41(in Chinese).
- Luo Y. 1993. The structure-mineralization zoning and an approach to the metallogenetic model for volcanic type molybdenum-uranium deposit No.460[J]. Uranium Geology, 9(1): 23-28(in Chinese with English abstract).
- Luo Y. 1994. Study on the vertical zoning of structure mineralization and metallogenic model of the large-scale volcanic type uranium-molybdenum deposit No.460[J]. Mineral Deposits, 13(Supp.): 64-66(in Chinese).
- Meng Y N, Fan H H, Chen D H and Wang S Y. 2014. Existing forms of ore minerals in the No.460 deposit in Guyuan area, Hebei Province[J]. Mineral Deposits, 33(Supp.): 551-552(in Chinese).
- Nei F J, Zhang W Y, Du A D, Jiang S H and Liu Y. 2007. Re-Os isotopic dating on molybdenite separates from the Xiaodonggou porphyry Mo deposit, Hexigten Qi, Inner Mongolia[J]. Acta Geologica Sinica, 81(7): 898-905(in Chinese with English abstract).
- Qin F, Liu J M, Zeng Q D and Zhang R B. 2008. The metallogenic epoch and source of ore-forming materials of the Xiaodonggou porphyry molybdenum deposit, Inner Mongolia[J]. Geoscience, 22(2): 173-180(in Chinese with English abstract).
- Qin F, Liu J M, Zeng Q D and Luo Z H. 2009. Petrogenetic and metallogenic mechanism of the Xiaodonggou porphyry molybdenum deposit in Hexigten Banner, Inner Mongolia[J]. Acta Petrologica Sinica, 25(12): 3357-3368(in Chinese with English abstract).
- Qiu S, Guo Z P and Peng Z B. 2016. Experimental study on treating refractory complex jordsite ore with oxidative roasting-acid leaching process[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 36(2): 80-83(in Chinese with English abstract).
- Ren Z H and Wang T F. 1997. Metallogenic tectonic setting of the uranium deposit No.460[J]. Uranium Geology, 13(3): 154-158(in Chinese with English abstract).
- Rui G Z. 2010. Discussion on metallogenic characteristics and genesis of large U-Mo deposit No.460[J]. World Nuclear Geoscience, 27(3): 149-154(in Chinese with English abstract).
- Shen G Y. 2007. Ore controlling factors of the No.460 U-Mo deposit and its genesis discussion[J]. Mineral Resources and Geology, 21(5): 509-514(in Chinese with English abstract).
- Sillitoe R H. 2010. Porphyry copper systems[J]. Econ. Geol., 105(1): 3-41.
- Song K, Wu J H, Guo H F and Guo G L. 2019. Superimposed mineralization of Zhangmajing uranium-molybdenum deposit in northern Hebei Province: Constraints from mass balance migration calculation of ore geochemistry[J]. Mineral Deposits, 38(3): 599-619 (in Chinese with English abstract).
- Wang H F, Dai T M, Fan S K and Yang X C. 1985. K-Ar dating of Hanuoba Basalts at Zhangjiakou[J]. Geochimica, 3: 206-215(in Chinese with English abstract).
- Wu J H, Ding H, Niu Z L, Wu R G, Zhu M Q, Guo G L, Liu S and Yu D G. 2015. SHRIMP zircon U-Pb dating of country rock in Zhangmajing U-Mo deposit in Guyuan, Hebei Province, and its geological significance[J]. Mineral Deposits, 34(4): 757-768(in Chinese with English abstract).
- Wu J H, Zhang J Y, Jiang S, Xie K R, Guo G L and Wu R G. 2017. Geochronology, geochemical characteristics and petrogenesis of trachytes in the Guyuan uranium ore field, north Hebei Province[J]. Geochimica, 46(2): 105-122(in Chinese with English abstract).
- Yang J H, Wu F Y, Shao J A, Xie L W and Liu X M. 2006. In-situ U-Pb dating and Hf isotopic analyses of zircons from volcanic rocks of the Houcheng and Zhangjiakou Formations in the Zhang-Xuan area, northeast China[J]. Earth Science, 31(1): 71-80(in Chinese with English abstract).
- Zeng Q D, Liu J M, Qin F and Zhang Z L. 2010. Geochronology of the Xiaodonggou porphyry Mo deposit in northern margin of North China Craton[J]. Resource Geology, 60: 192-201.
- Zeng Q D, Liu J M, Zhang Z L, Chen W J and Zhang W Q. 2011. Geology and geochronology of the Xilamulun molybdenum metallogenic belt in eastern Inner Mongolia, China[J]. International Journal of Earth Sciences, 100: 1791-1809.
- Zhang L, Li X F and Wang G. 2020. The characteristics, research progresses and prospects of volcanogenic uranium deposits[J]. Acta Petrologica Sinica, 36(2): 575-588(in Chinese with English abstract).
- Zhang L C, Chen Z G, Wu H Y, Wan B and Zeng Q D. 2008. Features of granites of the Xilamulun Cu-Mo metallogenic belt in Inner Mongolia, and its metallogenic specialization[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 27(Supp.): 242-243(in Chinese).
- Zhang Y F, Wu J H, Jiang S, Liu X, Wu R G, Liu S and Guo G L. 2016. SHRIMP U-Pb geochronology, geochemistry and Sr-Nd isotopes of the uranium-(molybdenum) related rhyolite and granitic porphyry, Datan, northern Hebei[J]. Acta Petrologica Sinica, 32(1): 193-211(in Chinese with English abstract).
- Zhang Z Q. 2001. Geochemical characteristics and metallogenic mechanism of Uranium deposit No.460[J]. Liaoning Geology, 18(1): 27-33(in Chinese with English abstract).
- Zhao X M, Zhang H F, Su F, Hu Z C, Lo C H, Wang Y, Yang S H and Guo J H. 2013. Phlogopite  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  geochronology of mantle xenoliths from the North China Craton: Constraints on the eruption

- ages of Cenozoic basalts[J]. *Gondwana Research*, (23): 208-219.
- Zhou D A. 1988. The superimposed metallogenesis in the formation of rich ores in uranium deposit No.460[J]. *Uranium Geology*, 4(3): 139-144(in Chinese with English abstract).
- Zhou D A. 1989. Geological development and the evolutions of uranium and thorium in volcanic basin No.460[J]. *Uranium Geology*, 5 (1): 1-7(in Chinese with English abstract).
- Zhu B, Huang Z X, Li Z Y and Sun X C. 2019. He-Ar isotopes tracing of Zhangmajing uranium-molybdenum deposit in Guyuan, Hebei Province[J]. *Uranium Geology*, 27(2): 88-94(in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 陈安福. 1987. 460矿床包裹体研究[R]. 核工业北京地质研究院.
- 陈东欢, 范洪海, 王凤岗, 何德宝. 2011a. 沽源-红山子地区火山岩型铀矿床蚀变特征[J]. *铀矿地质*, 27 (2): 88-94.
- 陈东欢, 范洪海, 王凤岗, 何德宝. 2011b. 沽源-红山子地区铀多金属成矿带多元同位素示踪[J]. *中国核科学技术进展报告*, 2: 611-617.
- 郭鸿军, 马申坤. 2009. 河北省沽源县张麻井铀矿控矿因素分析及外围找矿前景探讨[J]. *地质调查与研究*, 33(3): 210-215.
- 黄志新, 李子颖, 范洪海, 焦永玲. 2014. 沽源热点铀成矿作用[J]. *矿床地质*, 33(增刊): 695-696.
- 黄志新, 朱斌, 孙小聪. 2016. 华北陆块北缘西段铀多金属矿综合评价技术研究[R]. 北京:核工业北京地质研究院.
- 李耀崧. 1989. 460铀矿床主要矿化期的同位素年龄[J]. *铀矿地质*, 5 (4): 203-208.
- 李真真, 李光明, 孟昭君, 秦克章, 宋国学, 金露英, 阙学胜, 王进, 张夏楠. 2014. 大兴安岭岔路口巨型斑岩铀矿床角砾岩相的划分、特征及成因[J]. *矿床地质*, 33(3): 607-624.
- 刘小宇, 陈肇博. 1996. 大陆火山作用与铀成矿[M]. 北京: 原子能出版社. 39-41.
- 刘学武, 王胜权, 樊秉鸿. 2010. 河北沽源460铀矿床成因探讨[J]. *地质找矿论丛*, 25(1): 36-42.
- 罗毅. 1993. 460火山岩型铀-钼矿床的构造-矿化分带及成矿模式研究[J]. *铀矿地质*, 9(1): 23-28.
- 罗毅. 1994. 460大型火山岩型铀-钼矿床的构造-矿化垂向分带及成矿模式研究[J]. *矿床地质*, 13(增刊): 64-66.
- 孟艳宁, 范洪海, 陈东欢, 王生云. 2014. 河北省沽源地区460矿床铀石矿物存在形式研究[J]. *矿床地质*, 33(增刊): 551-552.
- 聂风军, 张万益, 杜安道, 江思宏, 刘妍. 2007. 内蒙古小东沟斑岩型钼矿床辉钼矿-钼-钨同位素年龄及地质意义[J]. *地质学报*, 81 (7): 898-905.
- 覃峰, 刘建明, 曾庆栋, 张瑞斌. 2008. 内蒙古小东沟斑岩型钼矿床的成矿时代及成矿物质来源[J]. *现代地质*, 22(2): 173-180.
- 覃锋, 刘建明, 曾庆栋, 罗照华. 2009. 内蒙古克什克腾旗小东沟斑岩型钼矿床成岩成矿机制探讨[J]. *岩石学报*, 25(12): 3357-3368.
- 邱沙, 郭志鹏, 彭志兵. 2016. 复杂难选胶硫钼矿氧化焙烧-酸浸试验研究[J]. *矿冶工程*, 36(2): 80-83.
- 任之鹤, 万天丰. 1997. 460铀矿床成矿构造背景[J]. *铀矿地质*, 13 (3): 154-158.
- 芮果桢. 2010. 460大型铀-钼矿床成矿地质特征及成因探讨[J]. *世界核地质科学*, 27(3): 149-154.
- 沈光银. 2007. 460铀-钼矿床控矿因素及矿床成因探讨[J]. *矿产与地质*, 21(5): 509-514.
- 宋凯, 巫建华, 郭恒飞, 郭国林. 2019. 冀北张麻井铀矿床叠加成矿: 矿石地球化学质量平衡迁移计算的制约[J]. *矿床地质*, 38 (3): 599-619.
- 王慧芬, 戴檀谟, 范嗣昆, 杨学昌. 1985. 张家口汉诺坝玄武岩K-Ar年龄计时[J]. *地球化学*, 3: 206-215.
- 巫建华, 丁辉, 牛子良, 吴仁贵, 祝民强, 郭国林, 刘帅, 余达途. 2015. 河北沽源张麻井铀-钼矿床围岩SHRIMP锆石U-Pb定年及其地质意义[J]. *矿床地质*, 34(4): 757-768.
- 巫建华, 张婧妍, 姜山, 解开瑞, 郭国林, 吴仁贵. 2017. 冀北沽源铀矿田粗面岩的年代学、地球化学特征及岩石成因[J]. *地球化学*, 46 (2): 105-122.
- 杨进辉, 吴福元, 邵济安, 谢烈文, 柳小明. 2006. 冀北张-宣地区后城组、张家口组火山岩锆石U-Pb年龄和Hf同位素[J]. *地球科学*, 31(1): 71-80.
- 张连昌, 陈志广, 吴华英, 万博, 曾庆栋. 2008. 内蒙古西拉木伦铜-钼成矿带花岗岩特征及成矿专属性[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 27(增刊): 242-243.
- 张龙, 李晓峰, 王果. 2020. 火山岩型铀矿床的基本特征、研究进展与展望[J]. *岩石学报*, 36(2): 575-588.
- 张亚菲, 巫建华, 姜山, 刘玄, 吴仁贵, 刘帅, 郭国林. 2016. 冀北大滩盆地铀(钼)成矿流纹岩-花岗斑岩SHRIMP锆石U-Pb定年、地球化学及Sr-Nd同位素特征[J]. *岩石学报*, 32(1): 193-221.
- 张振强. 2001. 460铀矿床地球化学特征及成矿机理探讨[J]. *辽宁地质*, 18(1): 27-33.
- 周德安. 1988. 460矿床富矿形成中的叠加成矿作用[J]. *铀矿地质*, 4 (3): 139-144.
- 周德安. 1989. 460火山岩盆地的地质发展与铀、钍演化[J]. *铀矿地质*, 5(1): 1-7.
- 朱斌, 黄志新, 李子颖, 孙小聪. 2019. 河北沽源张麻井铀矿床的He-Ar同位素示踪[J]. *铀矿地质*, 27(2): 88-94.