

doi: 10.12029/gc20201021001

艾尔提肯·阿不都克玉木, 宋昊, 陈友良, 赵子超, 李巨初, 张成江. 2024. 捷克波西米亚盆地斯特拉砂岩型铀矿床成矿特征及成矿模式[J]. 中国地质, 51(3): 951-964.

Aiertiken Abudukeyumu, Song Hao, Chen Youliang, Zhao Zichao, Li Juchu, Zhang Chengjiang. 2024. Metallogenic characteristics and model of sandstone-type uranium deposits in Straz area, Bohemia Basin, Czech Republic[J]. Geology in China, 51(3): 951-964(in Chinese with English abstract).

捷克波西米亚盆地斯特拉砂岩型铀矿床成矿特征及成矿模式

艾尔提肯·阿不都克玉木¹, 宋昊^{1,2}, 陈友良^{1,2}, 赵子超¹, 李巨初¹, 张成江^{1,2}

(1. 成都理工大学地球与行星科学学院, 四川 成都 610059; 2. 地学核技术四川省重点实验室, 四川 成都 610059)

摘要:【研究目的】捷克波西米亚盆地斯特拉地区是著名的铀成矿区, 区内砂岩型铀矿床的成矿作用复杂, 厘定其成矿特征和成矿模式对于完善砂岩型铀矿成矿理论研究、对中国同类型矿床找矿勘查具有重要借鉴意义。

【研究方法】本文在总结前人对斯特拉地区砂岩铀矿床地质特征和成矿条件的基础上, 对其铀源、成矿阶段以及矿床成因进行综合研究并对中国松辽盆地同类砂岩型铀矿进行了对比研究。【研究结果】斯特拉矿床根据其矿物组合特征可划分为 6 个成矿阶段, 分别是炭质-伊利石阶段、赤铁矿-高岭土阶段、铀富集阶段、多金属成矿阶段、褐铁矿化阶段以及赤铁矿-石英阶段。通过研究认为, 出露于盆地东北部的元古代和古生代的黑云母花岗岩闪长岩和斑状黑云母花岗岩较低的 Th/U 值表明, 这两类岩石中部分铀以活性铀形式存在, 是成矿潜在的铀源。斯特拉矿床是以白垩系富铀沉积层位为基础, 在其上叠加了早阿尔卑斯期岩浆热液作用, 后因壳幔缓慢上升, 导致铀重新活化, 进一步在盆地内层间氧化带局部叠加铀成矿作用, 形成板状、脉状、卷状 3 种铀矿体共存的砂岩型铀矿床。【结论】本文提出了成矿模式: 斯特拉地区砂岩型铀矿床属于多铀源—以盆地基底原始铀源为主、多阶段大地构造控矿—以早阿尔卑斯期(~70 Ma)造山运动为主、多成因复合成矿—以早阿尔卑斯期岩浆热液叠加成矿为主的“三多三主”复合成因砂岩型铀矿床。

关键词: 砂岩型铀矿; 成矿特征; 成矿模式; 斯特拉地区; 波西米亚盆地; 捷克共和国; 矿产勘查工程

创新点: 对比国内外同类型砂岩型铀矿床, 提出“三多三主”型砂岩型铀矿成矿模式。

中图分类号: P611.2*2 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2024)03-0951-14

Metallogenic characteristics and model of sandstone-type uranium deposits in Straz area, Bohemia Basin, Czech Republic

Aiertiken ABUDUKEYUMU¹, SONG Hao^{1,2}, CHEN Youliang^{1,2}, ZHAO Zichao¹,
LI Juchu¹, ZHANG Chengjiang^{1,2}

(1. College of Earth and Planetary Science, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 2. Key Laboratory of Nuclear Techniques in Geosciences of Sichuan Province, Chengdu 610059, Sichuan, China)

收稿日期: 2020-10-21; 改回日期: 2021-01-12

基金项目: 国家自然科学基金(42173072、U1967207)和中国核工业地质局项目“铀资源大数据分析 with 找矿战略研究”(201928-3)联合资助。

作者简介: 艾尔提肯·阿不都克玉木, 男, 1996 年生, 硕士生, 主要从事地球化学方面的研究; E-mail: aiertiken_a@163.com。

通讯作者: 宋昊, 男, 1986 年生, 教授, 主要从事地球化学及矿床地质方面的研究; E-mail: songhao@cdu.edu.cn。

Abstract: This paper is the result of mineral exploration engineering.

[Objective] Straz area (Bohemia Basin, Czech Republic) is a well-known uranium metallogenic area. The mineralization of sandstone-type uranium deposits is complex. Determining its metallogenic characteristics and metallogenic model is of great significance to perfect the metallogenic theory of sandstone-type uranium deposits and know the prospecting and exploration of the similar uranium deposits in China. **[Methods]** On the basis of summarizing the geological characteristics and metallogenic conditions of sandstone-type uranium deposits in the Straz area, this study focus on the uranium source, metallogenic stage and genesis of the deposits, and comparative studies are conducted by the similar sandstone-type uranium deposits in Songliao Basin. **[Results]** The Straz deposit can be divided into six metallogenic stages according to its mineral assemblage characteristics, i.e., carbon-hydromica, hematite-kaolinite, uranium, polymetallic, limonite and hematite-quartz stage. Proterozoic and Paleozoic igneous, metasedimentary, and sedimentary rocks outcropping to the northeast of the Bohemia Basin are considered potential sources for uranium. The Lusatian Massif contains biotite granodiorite and porphyritic biotite granite with. The low Th/U ratios suggest that part of the uranium is probably present in leachable form and these rocks constitute viable uranium sources. **[Conclusions]** The metallogenic model of the Straz area belongs to the “three factors and three majors”: Multi uranium source-basin basement primary uranium source, multi stage tectonic ore controlling-early Alps (about 70 Ma) orogenic movement, multi genetic composite mineralization-early Alps magmatic hydrothermal superimposed mineralization.

Key words: sandstone-type uranium deposit; metallogenic characteristics; metallogenic model; Straz area; Bohemia Basin; Czech Republic; mineral exploration engineering

Highlights: By comparison of the same type of sandstone-type uranium deposits in China with those in foreign countries, the metallogenic model of sandstone-type uranium deposits with “three factors and three majors” is put forward.

About the first author: Aiertiken ABUDUKEYUMU, male, born in 1996, master candidate, mainly engaged in geochemistry and ore deposit geology research; E-mail: aiertiken_a@163.com.

About the corresponding author: SONG Hao, male, born in 1986, professor, mainly engaged in geochemical and deposit geology research; E-mail: songhao@cdut.edu.cn.

Fund support: Supported by the projects of National Natural Science Foundation of China (No.42173072, No.U1967207) and China Nuclear Geology “Big Data Analysis of Uranium Resources and Research on Prospecting Strategy” (No.201928-3).

1 引 言

砂岩型铀矿因地浸开采技术的广泛应用已成为最经济的铀资源之一(Lehmann, 2008; Xue et al., 2010; Zammit et al., 2014),是目前中国铀矿勘查工作的主攻方向和研究重点(付勇等, 2016)。前人研究表明,砂岩型铀矿床的形成具有复杂性、渐进性等特点(宋昊等, 2016; Song et al., 2019),其成因通常被认为是表生的含氧含铀流体与渗透性砂岩层位中还原剂相互作用的结果:溶解度较大的 U^{6+} 随着地下水等流体沿着砂岩层迁移,在氧化-还原界面附近被植物碎屑、烃类和硫化物等还原为 U^{4+} 沉淀进而富集成矿(Curiale et al., 1983; Cai et al., 2007)。最近的研究表明,砂岩型铀矿床可能与沉积盆地中的深源热液流体活动密切相关(Ingham et al., 2014; Zhang et al., 2017),例如在部分砂岩型铀

矿床中发现了铀矿床与深部油气和中基性岩脉的密切空间组合(林双幸等, 2017)。经热液改造的铀矿床在矿体形态、铀矿物类型及蚀变矿物组合等方面与典型的层间氧化带型砂岩型铀矿床有较大差异(樊爱萍等, 2007)。但热液活动在砂岩型铀矿床中的作用仍然不清楚(张金带, 2016; 王飞飞等, 2017),有关砂岩型铀矿床成矿过程中热液活动对成矿的作用和意义仍需进一步研究。

斯特拉地区(Straz area)是捷克波西米亚盆地内最主要的铀成矿区。对斯特拉地区砂岩型铀矿床的成因,传统观点多基于层间氧化带理论和大地构造理论,认为斯特拉地区在其铀富集过程中构造运动是最主要的因素(刘翔, 1996),但这种观点很难合理地解释该地区的一些成矿地质问题,例如为何存在不同产状的铀矿体、矿石成矿年龄相差较大等。区内砂岩型铀矿明显受到多阶段构造演化、多成矿铀源和多成因复合成矿等因素的控制(刘翔, 1996;

Dahlkamp, 2016), 故对其铀源、成矿阶段、矿床成因及模式进行综合研究, 对中国同类型铀矿床找矿勘查具有重要意义。本文在综合前人研究的基础上, 分析斯特拉地区砂岩型铀矿床的成矿特征及成矿模式, 不仅可以为大型富铀成矿区复成因成矿模式的研究提供实例证据, 也对丰富中国砂岩型铀矿床的理论研究具有重要借鉴意义。

2 地质背景

波西米亚盆地(图 1)基底为晚元古代花岗岩与变质岩, 上覆上白垩统森诺曼阶和土伦阶与基底不

整合接触(刘翔, 1996; Ekert and Muzak, 2010)。其中森诺曼阶的两个沉积旋回由海相和陆相组成。陆相沉积主要为泥质粉砂岩、砾岩夹薄层煤和砂砾岩, 含有机质, 陆相沉积岩石属滨海相、河流相和冲积相沉积, 厚 0~33 m。海相沉积由 3 个亚旋回序列组成, 其中下部为海侵半咸水相的不同粒度砂岩, 沉积在下部地层冲刷面上, 富含炭化木, 厚度 0~6 m; 中部为海相的浅灰色中砂岩, 胶结疏松, 厚 20~30 m; 上部为滨海沼泽相粉砂岩, 含炭化木、透镜状煤层等有机质。森诺曼阶为斯特拉地区含矿目的层, 铀矿化主要赋存在陆相地层、海相地层的

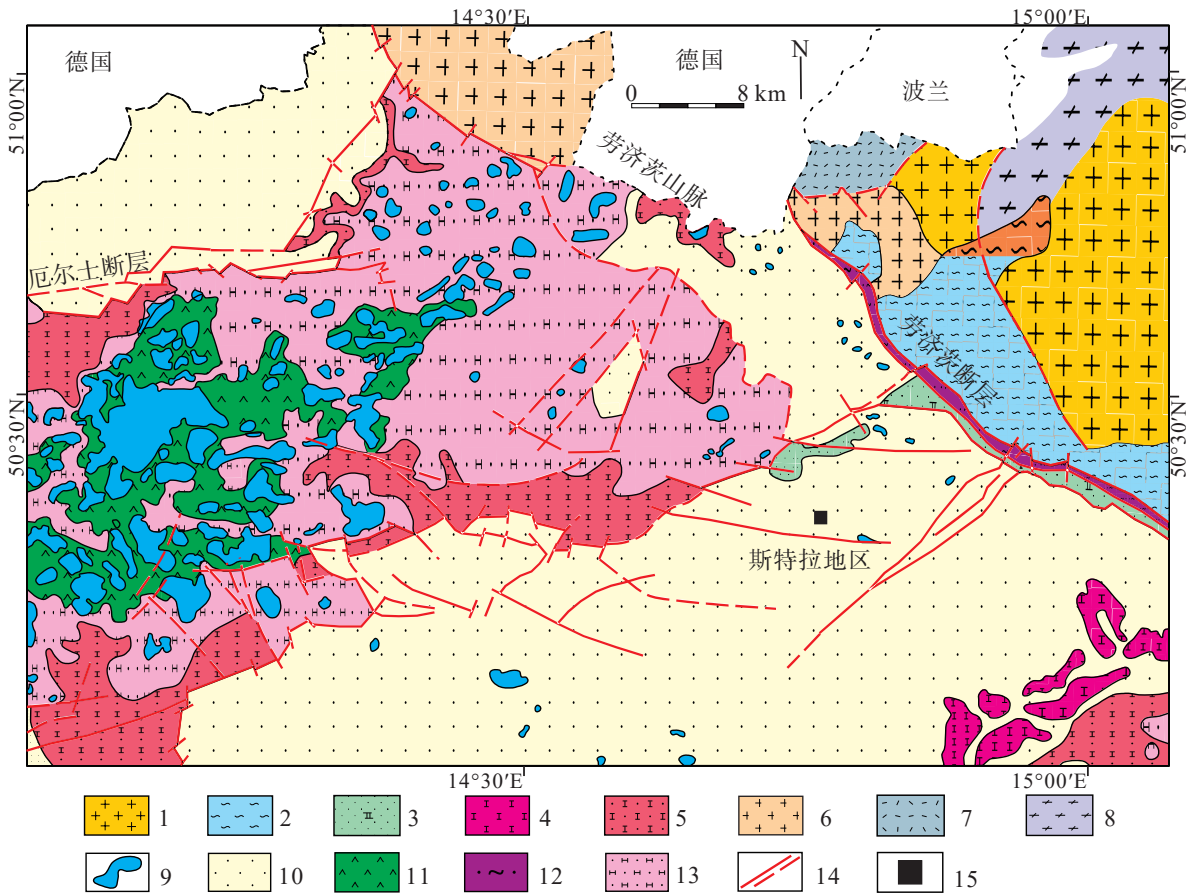


图 1 波西米亚盆地北部地质图(据 Novak, 2001; Ekert and Muzak, 2010; Dahlkamp, 2016)

1—花岗岩; 2—新元古代—古生代千枚岩; 3—早土伦期钙质和砂质粉砂岩; 4—晚土伦期泥灰岩、黏土岩和硅质岩; 5—土伦期—康尼亚期泥灰岩、黏土岩、硅质岩和砂岩; 6—花岗闪长岩; 7—古近纪—新近纪陆相沉积岩; 8—新元古代—古生代片麻岩; 9—古近纪—新近纪熔岩、火山碎屑角砾岩; 10—中土伦期中粗粒砂岩; 11—古近纪—新近纪灰岩、层凝灰岩; 12—晚森诺曼期含藻类砂岩于具有生物成因岩藻结构的细粒砂岩; 13—康尼亚克期泥灰岩、黏土岩、硅质岩和砂岩; 14—已证实或假设的断层; 15—斯特拉地区

Fig.1 Geological map of North Bohemian Basin (after Novak, 2001; Ekert and Muzak, 2010; Dahlkamp, 2016)

1—Granite; 2—Neoproterozoic–Paleozoic phyllite; 3—Early Turonian calcareous and sandy siltstone; 4—Late Turonian marl, claystone, siltstone; 5—Turonian–Coniacian marl, claystone, siltstone, sandstone; 6—Granodiorite; 7—Paleogene–Neogene continental sedimentary rock; 8—Neoproterozoic–Paleozoic gneiss; 9—Paleogene–Neogene lava, pyroclastic breccia; 10—Middle Turonian medium–coarse–grained sandstone; 11—Paleogene–Neogene tuff, tuffite; 12—Late Cenomanian fucoid sandstone, fine–grained sandstone with biogenic fucoid texture; 13—Coniacian marl, claystone, siltstone and sandstone; 14—Proven or assumed fault; 15—Straz area

下部和中部层位。土伦阶主要为海相泥灰岩、黏土质-砂质粉砂岩等,厚 80~120 m(赵凤民, 1991; Troger, 2017)。中新世的全球性构造运动对世界砂岩型铀矿床的时空分布有显著影响,而斯特拉砂岩型铀矿床表现很明显,所有的晚白垩世地层被古新世(~60 Ma)和渐新世—中新世(36~17 Ma)的两次火山作用产生的碱性玄武岩脉和岩墙等侵入,并且部分被熔岩所覆盖(李田港, 1997; Jin et al., 2016; Cheng et al., 2019)。

斯特拉地区位于波西米亚盆地北部,面积约 230 km²(图 1),受 NW-SE 向的拉贝断裂和 NE-SW 向的厄尔士断裂所影响。铀矿床主要产出于深大断裂的交汇处,大部分矿化赋存于与主构造平行、近平行或者与主构造复合的破碎带中,且以 NW-SE 向的矿带和矿脉中铀矿化居多。断裂对地层和火山岩的分布起重要的控制作用,碱性玄武岩岩浆沿着 NE 向和 NW 向断裂的交汇部位上升,喷溢至地表并部分充填其中。部分断裂具有同生断裂性质且位移方向不断发生变化,使地层和岩性在各个块体中表现出不一致性。区内矿床包括(从北东至南西方向):克里赞尼、布列夫尼斯特、奥塞克纳柯特尔、南北哈姆尔、斯特拉、斯日尼普塔克、帕夫林、弗拉诺夫等矿床。其中斯特拉和哈姆尔矿床是其中最大的两个矿床,占斯特拉地区探明和预估储量的一半以上(约 45000 t 铀)(Dahlkamp, 2016)。

3 控矿因素

3.1 盆地构造演化

盆地内中—新生代沉积物的铀成矿作用及含铀性取决于盆地边缘岩石的含铀性。国内外各产铀盆地周缘岩石或基底岩石常分布大量铀含量较高的花岗岩、酸性火山岩等,例如松辽盆地基底古生代地层及蚀源区各期花岗岩体具有较高的含铀性,为该盆地沉积物中铀的预富集和后期铀富集沉淀提供充足的铀源(王帆, 2018)。

波西米亚盆地基底为新太古代—古元古代沉积的一套富铀的含有有机质及硫化物的黑色页岩层系经晚泥盆世海西造山运动强烈褶皱引起的区域变质作用变质形成的片麻岩、花岗片麻岩和角闪岩结晶基底,海西造山运动使基底发生大规模花岗岩侵位并隆起抬升,使早期断裂发生活化并形成新的

断裂带,并最终形成构造盆地。盆地基底中长英质岩石成为了成熟的富铀基底,为该区铀成矿提供了充足的物质基础(李田港, 1995)。早白垩世盆地处于拗陷期,深断裂重新活动,形成呈西北向的海槽,白垩纪的陆相、海相沉积覆盖于基底的片麻岩和花岗岩之上,形成了数百米厚的泥岩、砾岩和砂岩建造,为铀矿床提供构造-沉积环境(刘翔, 1996)。

3.2 活动性深断裂带交汇处控制矿床(矿体)分布

波西米亚盆地北部斯特拉地区内分布一系列 NW、NE 向的深断裂带,其断裂构造活动强烈,并且具有长期性、周期性和持续性等特点,对斯特拉地区砂岩型铀矿床的形成具有特殊意义(图 2):(1)深大断裂的长期周期性活动有利于多期多阶段的成矿作用的叠加;(2)深大断裂中有岩浆向上迁移的通道;(3)深大断裂及其配套的不同阶段、部位和级别的构造起控矿作用。受早阿尔卑斯期(~70 Ma)构造活动影响,白垩纪地层发育褶皱,并被东北和西南向断层错动,在不同方向构造交汇处,充填有玄武岩、辉绿岩等岩浆岩,内生和外生混合溶液沿着成矿断裂带形成铀和稀土热液矿化。晚阿尔卑斯期构造运动相对减弱,盆地中含氧水在渗透性地层中发生强烈渗入作用,在透水层形成于层间氧水带有关的渗入型铀矿体。

3.3 有利的岩相建造控制铀矿化富集

斯特拉地区白垩系土伦阶和森诺曼阶厚度在 150~350 m,平均为 220 m。矿体主要赋存于森诺曼期沉积岩层中(图 3)。森诺曼地层沉积始于大陆相,之后是滨海相沉积。土伦阶为浅海相沉积。这些沉积岩系中铀丰度较高,含铀黄铁矿和有机质等都可以提供铀源,并且在其成矿过程中,也可以提供有利的铀沉淀环境,是砂岩型铀矿床形成的有利层位。

铀矿主岩主要产出在上白垩统森诺曼阶的 3 个岩相中:(1)浅海相松散砂岩,含砂屑、砾岩层;(2)滨海相,主要是分选性和成层性较差的粉砂岩—砂岩组成,晶质铀矿碎屑可能聚集在各个岩性中;(3)底部陆相沉积,高渗透性的粉砂岩、砂岩、砾岩,局部由砂和黏土胶结的角砾岩等,沉积在盆地基底凹陷中和风化-构造的下部层位。赋矿岩石侧向和垂向变化较大,岩石中含有丰富的黄铁矿和有机质。

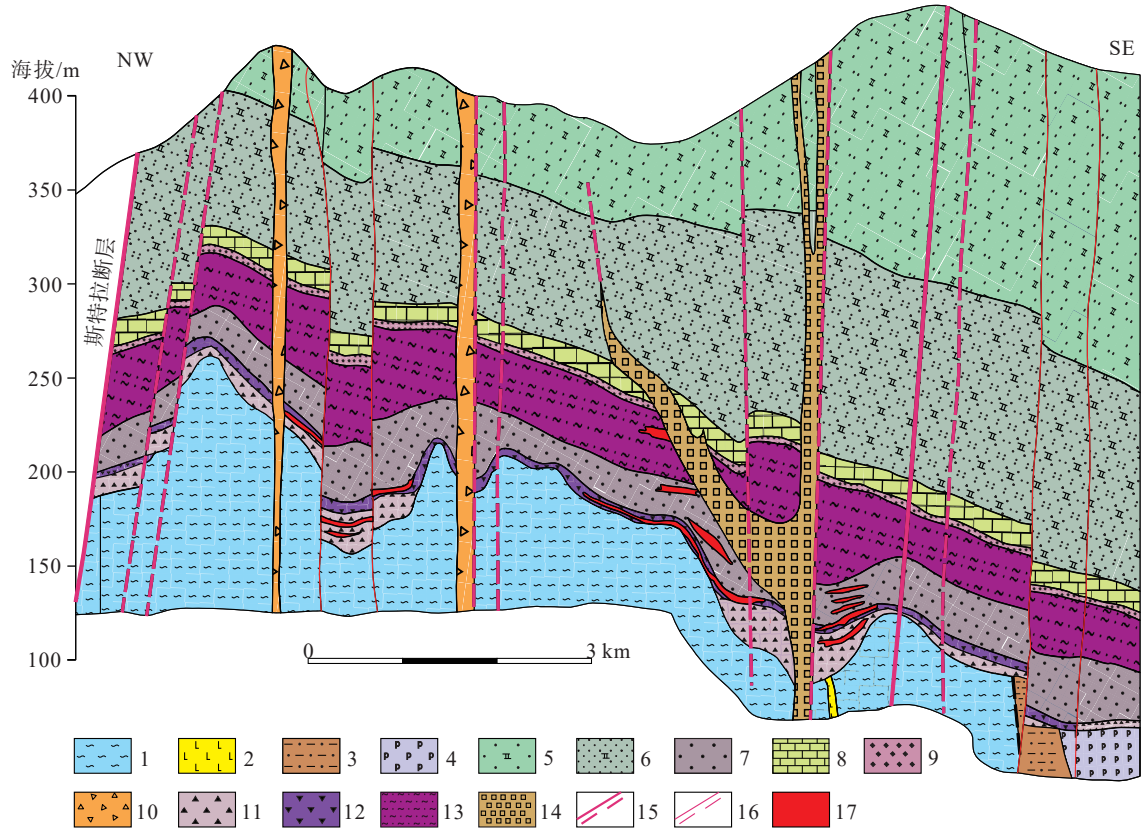


图 2 斯特拉地区西北-东南剖面示意图(据 Dahlkamp, 2016)

1—新元古代—古生代千枚岩; 2—二叠纪玄武岩; 3—二叠纪泥岩、砾岩; 4—二叠纪石英斑岩; 5—中土伦期钙质粉砂岩; 6—早土伦期钙质和砂质粉砂岩; 7—晚森诺曼期脆性砂岩; 8—早土伦期泥质灰岩、泥灰岩、碎屑岩; 9—过渡相、黏土质粉砂岩; 10—古近纪—新近纪火山碎屑角砾岩; 11—早森诺曼期陆相碎屑岩; 12—晚森诺曼期滨海相细碎屑岩; 13—晚森诺曼期含藻类砂岩; 14—古近纪—新近纪岩脉、橄榄煌斑岩; 15—已证实或假设的大型位移断层; 16—已证实或假设的中型位移断层; 17—铀矿化

Fig.2 Schematic diagram of NW-SE section in Straz area (after Dahlkamp, 2016)

1-Neoproterozoic-Paleozoic phyllite; 2-Permian basalt; 3-Permian mudstones and psephites; 4-Permian quartz porphyry; 5-Middle Turonian calcareous siltstone; 6-Early Turonian calcareous and sandy siltstone; 7-Late Cenomanian friable sandstone; 8-Early Turonian argillaceous limestone, marl, siltstone; 9-Transition facies, argillaceous siltstone; 10-Paleogene-Neogene pyroclastic breccia; 11-Early Cenomanian continental facies clastic rocks; 12-Late Cenomanian coastal facies clastic rocks; 13-Late Cenomanian friable sandstone; 14-Paleogene-Neogene dyke and olivine lamprophyre; 15-Major displacement fault, proven/assumed; 16-Medium fault, proven/assumed; 17-Uranium mineralization

3.4 水文地质条件

斯特拉地区的地下水文系统很复杂, 主要发育两个地下透水层, 即中土伦期砂岩和森诺曼期砂岩, 它们被下土伦阶(泥灰岩)隔开。岩石发育较多孔隙, 且几乎所有的地下水的流动和聚集都发生在这两个透水层(Novak, 2001)。

土伦期含水层与中土伦阶相连, 岩性为细粒—粗粒砂岩。在研究区内, 土伦期含水层厚度约 70 m。在整个斯特拉地区, 土伦期含水层为一非承压地下水层位, 并且含水层通过雨水得到补给。

森诺曼期含水层与森诺曼期海相砂岩相连, 其底部为低渗透性砂岩和其他陆源沉积岩。森诺曼

期含水层厚约 70 m, 其上部的下土伦期隔水层(约 60 m 厚)将其与土伦期含水层分割开来。森诺曼期含水层主要靠劳济茨断层补给, 为该区域一承压含水层。在该地区铀矿开采之前, 森诺曼期含水层地下水的自然流向是东北-西南向, 目前地下水流动方向主要是朝北哈姆尔、斯特拉两个矿床方向。与层间氧化作用有关的卷状矿体主要产在透水性较好的层位中, 处在褐铁矿化岩石和石英硅化岩石之间的氧化-还原部位。

总的来说, 区内水文地质条件对铀成矿起促进作用, 主要依据有以下几点: (1) 中—新生代波西米亚盆地地壳缓慢上升, 局部形成自流型盆地, 主要

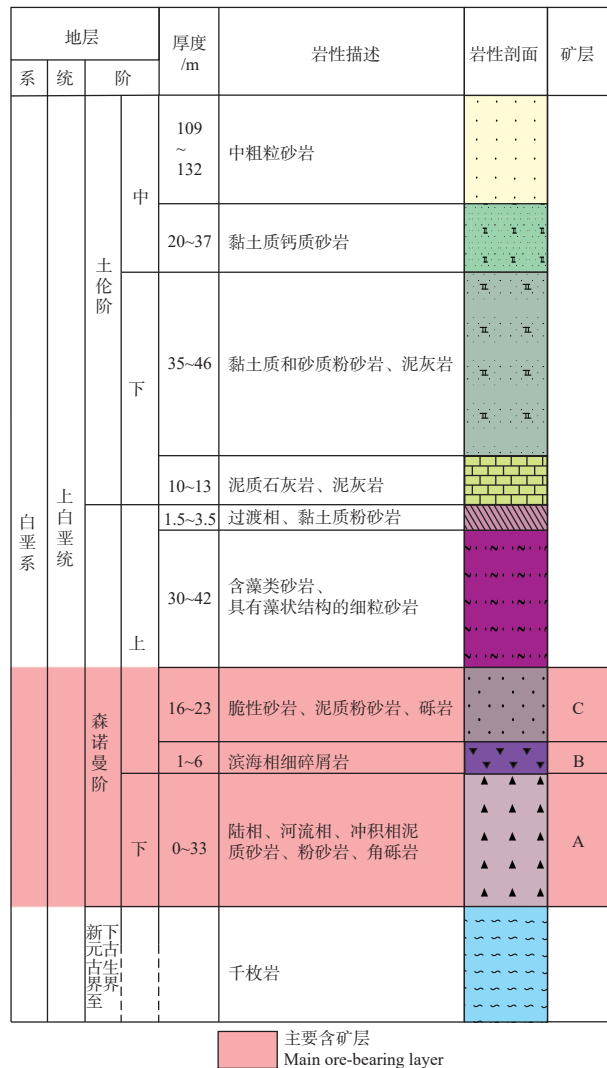


图3 斯特拉地区砂岩型铀矿床岩性地层柱状图(据 Dahlkamp, 2016; Troger, 2017)

Fig.3 Lithostratigraphic histogram of sandstone-type uranium, Straz area (after Dahlkamp, 2016; Troger, 2017)

靠大气降水补给,有利于含氧含铀流体进入渗透性能较好的砂岩层位形成与层间氧化作用有关的卷状矿体;(2)含矿层位渗透性及孔隙度较好,森诺曼阶渗透性主要为多孔-裂隙,有利于含矿流体的活化和迁移;(3)含矿地层结构为泥岩-砂岩-基底,森诺曼期含水层砂体厚度约70 m与上覆下土伦期隔水层泥岩(厚约60 m)泥/砂比近似1,含矿含水层具有一定厚度与泥砂比是成矿物质基础(夏彧, 2017)。

3.5 围岩蚀变对成矿的指示作用

在波西米亚盆地北部的森诺曼和土伦阶中,氧化带沿地下水层边界发育,并与铀矿化有关(图4),

而盆地南部则不见发育。氧化还原作用影响了整个可渗透的森诺曼期地层,形成了部分重叠的区域(图4)。受还原作用影响的区域表现出赤铁矿-伊利石化、炭质-伊利石化、高岭石化和硅化;氧化带蚀变表现为赤铁矿化、褐铁矿化和硅化。蚀变分带显示以下特征:

(1)赤铁矿-伊利石带:渗透性沉积物被自生赤铁矿-伊利石(粉红色沉积岩)和伊利石(灰色沉积物)形成过渡蚀变,粉红色沉积物逐步转化成紫色。当它们完全还原时,会变成绿-灰绿色,并且铁耗尽。相关的新矿物包括绿泥石、高岭石、石英,少量菱铁矿和黄铁矿。

(2)炭质-伊利石带:多期的伊利石-炭质蚀变过程形成了若干个共生组合。最普遍的是0.1~0.5 mm厚的鳞片状云母带,其与有机质伴生,见于细砂岩和粉砂岩的夹层中。碳沥青中含有微细浸染状的铀矿物、方铅矿、黄铁矿、闪锌矿等。这种蚀变组合通常出现在海岸相和陆相碎屑岩中并含有有机质。在黏土-粉砂岩夹层附近,铀矿物和黄铁矿的含量增加。

(3)高岭石带:高岭石化优先影响含水层位。碳酸盐、伊利石和细微浸染状泥质物质几乎被完全破坏。这一带的岩石多孔洞、易碎且铁含量很低。自生高岭石集中在夹层表面,呈放射状沉淀。锐钛矿、黄铁矿和沥青铀矿经常交代高岭石的边缘和裂隙。高岭石在森诺曼沉积物中很常见,但其强度随岩石成分的变化而变化。

(4)硅化带:高渗透性层发育较强的硅化作用,基质和碎屑石英颗粒被侵蚀,碎屑石英、蛋白石和玉髓发生高岭石化,并胶结岩石。碎屑石英颗粒加大边的生长在高岭石带界面最为突出。硅化带多呈灰色且易碎多孔,这种硅化模式发生在还原条件下,显然是发生在氧化作用之前。

3.6 物质来源

波西米亚盆地东北部的元古宙、古生代的花岗岩、变质碎屑岩和沉积岩等被认为是潜在的铀来源。主要为劳济茨断层发育的黑云母花岗闪长岩(U含量 5.7×10^{-6} ; Th含量 10.0×10^{-6} ; Th/U比值为1.75)和斑状黑云母花岗岩(U含量 6.3×10^{-6} ; Th含量 12.3×10^{-6} ; Th/U比值为1.95)。地壳岩石Th/U平均值为3.5(Wedepohl, 1995),波西米亚盆地较低

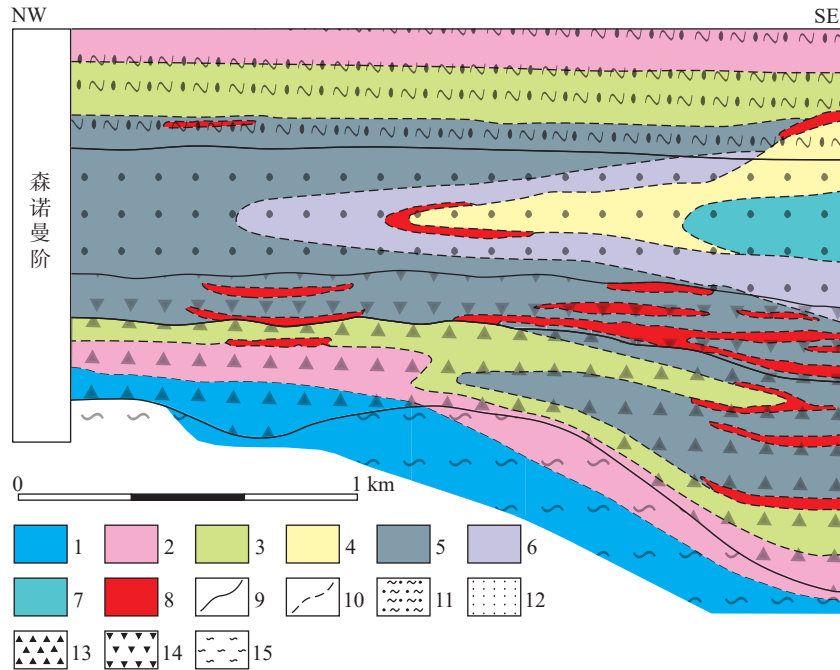


图 4 斯特拉地区区森诺曼期地层中蚀变与铀矿化关系剖面示意图(据 Dahlkamp, 2016)

1—赤铁矿-伊利石(带); 2—伊利石(带); 3—炭质-伊利石(带); 4—褐铁矿(带); 5—高岭石和有机质(带); 6—二氧化硅/石英(带); 7—赤铁矿-硅化(带); 8—铀矿; 9—岩性边界; 10—蚀变边界; 11—含藻类砂岩; 12—脆性砂岩; 13—滨海相细碎屑岩; 14—陆相碎屑岩; 15—千枚岩

Fig.4 Schematic diagram of the relationship between alteration and uranium mineralization in the Cenomanian strata, Straz area (after Dahlkamp, 2016)

1—Hematite-hydromica; 2—Hydromica; 3—Carbon-hydromica; 4—Limonite; 5—Kaolinite with organics; 6—Silica/quartz; 7—Hematite-silica; 8—Uranium ore; 9—Lithologic boundary; 10—Alteration boundary; 11—Fucoid sandstone; 12—Friable sandstone; 13—Coastal facies clastic rocks; 14—Continental facies clastic rocks; 15—Phyllite

的 Th/U 比值表明, 部分铀以活性铀形式存在, 因此这些花岗质岩石构成了盆地有利的铀源。

铀的来源仍存在争议。推测包括含矿沉积物中的侵入岩脉或含高含量 Zr 的花岗岩。由于许多岩脉被高岭土化作用强烈地影响下部分或完全蚀变, 铀可能在蚀变过程中已经被释放出来。

前人将斯特拉地区砂岩型铀矿床的 U-Zr 演化过程总结为: 一些铀有可能会在孤岛、湿地和沼泽中预先富集。铀矿化发育在 90~3 Ma, 表明矿化具有较大时间跨度。斯特拉地区有两种主要的矿化类型, 即纯铀矿化和铀-钍矿化。铀-钍矿化基本在空间上与斯特拉断层相邻, 这引起一个问题, 即这种成矿作用是否是多个过程的产物。铀的早期阶段之后, 随着含钍溶液的后期侵入, 导致铀矿物部分溶解, 铀重新活化及迁移, 并与钍结合, 生成铀-钍组合(Scharm, 1991)。

前人提出了一个铀-钍矿化形成的地球化学模型(Dahlkamp, 2016): 铀的迁移和沉淀可以发生在

广泛的 Eh 和 pH 条件下, 但钍和钽在天然水中的活度非常低, 对成矿的地球化学条件有明显的限制作用。有机质和硫化物的存在证明了低氧化还原电位, 铀和钍在含氟性溶液中的低氧化还原电位下迁移。磷酸盐矿物(纤磷钙铝石、人形石等)的存在可以推断出, 在矿化过程中存在 pH 值升高的现象。这种 pH 值升高促使氟络合物发生分解, 并导致溶解组分的水解和固体矿物相的演化。除水解作用外, 有机质的吸附和还原作用也对铀富集具有重要作用。此外, 后期构造活动导致的地下水动态的变化, 使铀发生再活化和重新分布。

4 成矿特征

4.1 矿床成因及典型矿床

4.1.1 成矿特征及矿床成因

区内各砂岩型铀矿床有以下特点: (1) 矿床均位于波西米亚盆地内隆起块体的边缘部分, 矿床的分布受切穿基底并长期活动的两组深断裂带控制; (2)

矿床的产出受控于一定的层位,例如斯特拉矿床就分布于上白垩统地层中;(3)铀成矿具多阶段性,前人通过铀矿物同位素年代学测出三组年龄,集中于90~3 Ma,包括(25±3) Ma和(6±3) Ma(Dahlkamp, 2016),多阶段多期的成矿作用,使铀矿化得以叠加富集,形成超大型铀矿床。

对于矿床成因,一种观点认为其属于淋积成因,该观点认为铀源自劳济茨地块中的酸性火成岩和原始地幔物质等,含铀流体的铀含量达到 5×10^{-5} g/L以上,最终铀在还原条件下沉淀成矿(赵凤民, 1991);另一种观点则认为矿床属复成因型:首先在沉积成岩阶段在富含有机质的砂岩层位产生铀的初步富集并形成层状矿化体,其年龄为(100±40) Ma;其次,古新世至始新世的火山作用产生热液活动,在含矿层中广泛发育黏土化(如高岭石、伊利石和绿泥石等)、黄铁矿化和铀矿化(铀石等),含铀热液叠加在早期形成的铀矿体之上并受有机质还原得到进一步富集形成层状铀矿;最后,地壳缓慢上升成为盆地,当层间氧化带叠加在原先形成的铀矿体上时导致铀的重新活化,形成卷状和部分层状矿体,三次铀成矿(富集)所产生的铀矿体组成了斯特拉地区现今的砂岩型铀矿床(李田港, 1997)。

4.1.2 典型矿床

据前文所述,斯特拉地区存在多个铀矿床(表1)。

斯特拉地区内主要的铀矿床是南北哈姆尔矿床和斯特拉矿床。南、北哈姆尔矿床两者相距1.5~2 km,斯特拉矿床位于北哈姆尔矿床西南约3 km。

北哈姆尔矿床:矿床面积约 $1.2 \times 1.5 \text{ km}^2$,埋深100~200 m,主要是由一个单一的、2~12 m厚的板状矿体组成。其矿化很复杂,主要铀矿物包括铀黑、沥青铀矿、人形石和含铀水锆石。原始可开采

储量约22000 t,采矿平均品位为0.11%,但原始储量的1/3超过平均品位的两倍。开采方式主要是通过地下开采。

南哈姆尔矿床:矿床由2~6个不同厚度的堆积矿体组成,埋深约150~200 m。铀矿化相对简单,铀矿物主要为铀黑和沥青铀矿。其原始可开采储量为18400 t,现剩余储量约17000 t,开采平均品位为0.08%~0.15%。

斯特拉矿床:矿床矿化范围约 $3 \text{ km} \times 3 \text{ km}$,并且向西和西南两个方向延伸,埋深为150~220 m。其地质背景在控矿地层和岩性上于哈姆尔矿床相同。铀在150~200 m的深度出现于多达11个叠加的矿石透镜体中,这些透镜体位于30 m厚的地层剖面中。成矿作用较为复杂,铀矿物包括人形石、铀黑、沥青铀矿和含铀水锆石。其原始可采储量约为24000 t,从1967年至1995年,共提取了17525 t铀,其中15562 t铀是通过地浸技术开采的。

以上所列举的3个铀矿床均赋存于森诺曼期陆相沉积层,其上为十余米厚富含有机质和黄铁矿的海相地层。

4.2 铀矿化特征

斯特拉地区砂岩型铀矿床主要铀矿物为黑色铀氧化物(铀黑)、变胶状含铀水锆石,次要矿物为铀石、胶斜锆石、人形石、沥青铀矿和含铀锆白钛矿(含U 0.6%~12.9%, Zr 0.1%~14.4%),铀矿物颗粒大小在0.001~0.01 mm,少量达0.1 mm,通常以微细颗粒和胶状块体形式散布在主岩的基质和孔隙中,或者以微碎屑的形式出现。铀氧化物、铀石和人形石常见于与碳质或黄铁矿伴生的细粒—中粒岩石中。含铀水锆石主要存在于高岭石和中粗粒砂岩中。石英是矿石中主要的脉石矿物,钛矿物、电气石、黄玉是主要的副矿物。主要的自生围岩是高岭土、碳化物质、硅石、石英和黄铁矿。表2简要概

表1 斯特拉地区主要铀矿床(据Dahlkamp, 2016)

Table 1 Main uranium deposits in Straz area (after Dahlkamp, 2016)

矿床	含矿地层	含矿岩性	铀品位/%	铀产量/t	开采方法
北哈姆尔	白垩系森诺曼阶	砂岩、粉砂岩	0.11	22000	UG
南哈姆尔	白垩系森诺曼阶	砂岩、粉砂岩	0.08~0.15	18400	UG
斯特拉	白垩系森诺曼阶	砂岩、粉砂岩	0.15~0.2	17525	ISL
克里赞尼	白垩系森诺曼阶	砂岩、粉砂岩	0.09	5800	UG
欧赛克纳柯特	白垩系森诺曼阶	砂岩、粉砂岩	0.1~0.15	14400	UG

注:UG—地下开采;ISL—地浸开采。

括了沉积成岩阶段碎屑矿物组分和自生矿物。沥青铀矿的晶格常数为 5.380~5.394, 铀黑为 5.36。碎屑含铀矿物有磷灰石、金红石、铀钍石、含铀钛酸盐(钛铀矿、镧铀钛铁矿)和锆石。伴生硫化物以黄铁矿、闪锌矿等矿物为主。钍主要赋存于磷钙钍石、铀钍石中, 在磷稀土矿中很少出现, 其在矿石中的含量也很低。

斯特拉地区铀相关的矿化作用依次分为 6 个阶段(图 5):

(1) 炭质-伊利石阶段: 在沉积和早期成岩作用过程中, 煤质、伊利石和高岭石, 与微量铁硫化物、石英和铀氧化物优先形成于云母岩中。铀氧化物作为微细颗粒与煤质和 Ti 矿物等伴生, 呈不均匀分布的条带, 并被黏土条带分开存在于陆相和海岸相

沉积层中。

(2) 赤铁矿-高岭土化阶段: 碳化物质、伊利石、黄铁矿和硅质形成之后高岭土化和部分赤铁矿化, 这两种蚀变影响了沉积岩和火山岩脉, 部分玄武岩质岩脉被完全的分解成泥质岩石。这一阶段的矿化由浸染或带状黑色铀氧化物组成, 这些铀氧化物集中在炭质-伊利石带与伊利石带的界面或高岭土化带内。这一阶段的过程对复杂蚀变的形成起了重要作用。

(3) 铀富集阶段: 主要矿物有锐钛矿、伊利石、高岭石、黄铁矿和石英, 变胶状含铀水锆石, 并且存在少量铀氧化物、煤化有机质、铁白云石和磷灰石。这一阶段产生了具有经济意义的含铀水锆石矿石, 他们出现在第三阶段蚀变带中部的高岭土

表 2 斯特拉地区砂岩型铀矿床矿物组合特征 (据 Dahlkamp, 2016)

Table 2 Mineral assemblage characteristics of sandstone-type uranium deposits, Straz area (after Dahlkamp, 2016)

沉积成岩阶段碎屑矿物			自生矿物				
非矿	矿石+伴生	铀矿物	不含铀矿物				
重晶石	石英	独居石	钙铀云母	磷灰石	萤石	方硫铁镍矿	白钛石
黑云母	磷灰石	金红石	黑色铀氧化物	重晶石	石膏	水磷钙钍石	褐铁矿
绿泥石	板钛矿	十字石	铀石	板钛矿	水黑云母	黄铜矿	磁铁矿
长石	锡石	榍石	人形石	碳酸盐	伊利石	方铅矿	白铁矿
海绿石	石榴子石	钛磁铁矿	沥青铀矿	玉髓	伊利石	针铁矿	白云母
白云母	金矿	黄玉	氟磷铀矿	绿泥石	高岭石	赤铁矿	辉钼矿
蛋白石	褐铁矿	电气石	水铀钒族		蒙脱石	含水针铁矿	黄铁矿
植物碎片	蓝晶石	钛铀矿			钛板钛矿	水赤铁矿	闪锌矿
石英	白钛石	磷钇矿			石英		
	磁铁矿	锆石、水锆石			绢云母		

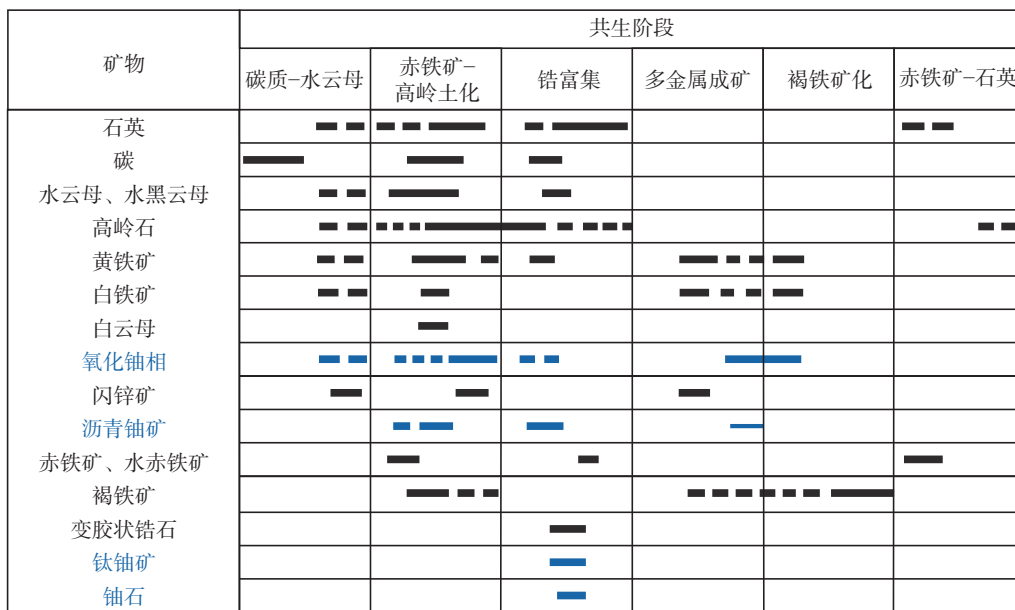


图 5 斯特拉地区森诺曼期沉积物中后生和成岩矿物共生模式(据 Dahlkamp, 2016)

Fig.5 Scheme of epigenetic and diagenetic mineral parageneses in Cenomanian sediments, Straz area (after Dahlkamp, 2016)

化、多孔岩石中。

(4)多金属成矿阶段:似脉状 Fe\Pb\Zn 硫化物、沥青铀矿、重晶石和石英形成。

(5)褐铁矿化阶段:较年轻的含氧流体沿着透水路渗透,交代硫化物,形成铁氢氧化物和含铀水锆石。铀不仅在氧化还原边界上被释放和沉淀,而且还在富含黄铁矿的岩石中也出现同样的情况。铀矿物以浸染状及不规则带状产出。

(6)赤铁矿-石英阶段:为最后一个阶段,此阶段形成玉髓、高岭石和石英。

5 成矿模式

根据上述成矿大地构造背景、控矿因素以及成矿特点分析,提出该成矿区的成矿模式属于“三多三主”的复成因成矿模式(图6)。“一多”指多铀源:即元古代和古生代的基底岩浆岩、变质岩原始铀源,白垩纪砂岩沉积-成岩期富集铀源,渗入型自流盆地含铀流体铀源;“一主”是以基底原始铀源为主;“二多”是多阶段的大地构造控矿:中-新生代,波西米亚盆地经历了长期的、复杂的多次构造运动,为斯特拉成矿区提供了有利成矿构造背景;“二主”是以早阿尔卑斯期构造运动为主;“三多”是多因复合成矿,即白垩纪砂岩沉积成矿、早阿尔卑斯期岩浆热液叠加成矿以及渗入型层间氧化带成矿;“三主”是早阿尔卑斯期岩浆热液叠加成矿为主,铀矿化主要沿断裂带分布,多赋存于深大断裂带下盘或断裂交汇部位(斯特拉矿床)。

6 与中国砂岩型铀矿的对比研究

松辽盆地是中国重要的砂岩型铀矿富集区域(图7),产出于该盆地东南部通辽地区的各砂岩型铀矿因其特殊的构造背景和控矿因素而被国内学者命名为“通辽式砂岩型铀矿”,其中以钱家店矿床最为出名。钱家店砂岩型铀矿床与国内外典型层间氧化带砂岩铀矿床不同,其主要受到基底断裂、反转构造等多因素控制成矿,是一个主要矿化类型为沉积成岩型或沉积成岩富集叠层间氧化(或潜水氧化)而形成的多成因矿床(罗毅等,2007,2012;单芝波等,2022)。这与本文所研究的斯特拉地区砂岩型铀矿床存在诸多相似之处,有必要将两者进行对比研究。通过对捷克波西米亚盆地斯特拉地区砂岩型铀矿床(哈姆尔矿床)和中国松辽盆地典型

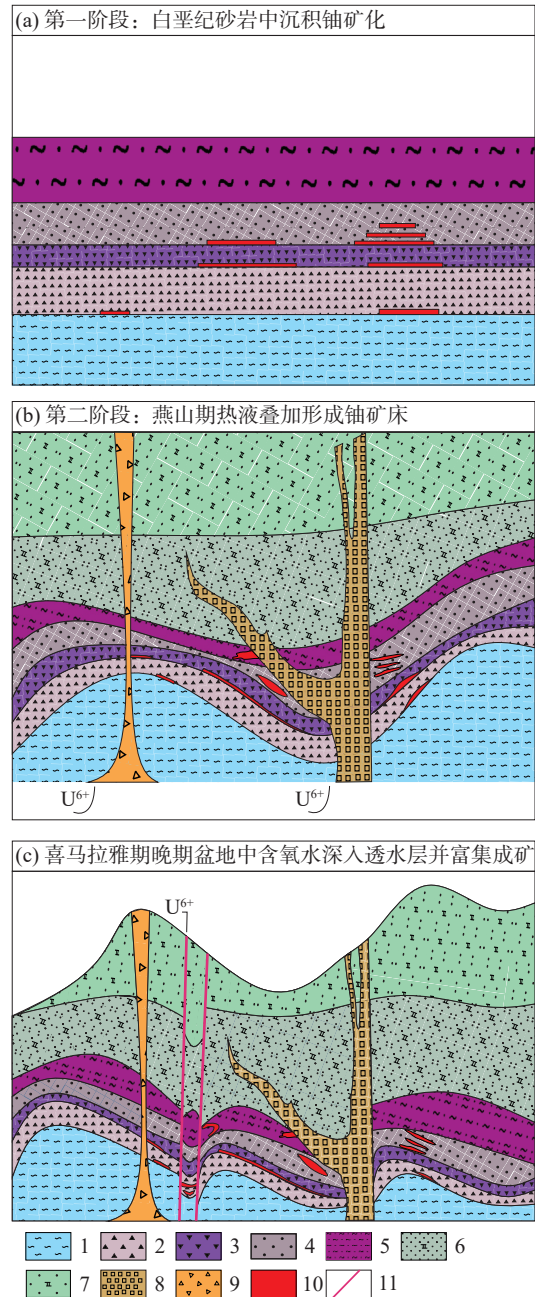


图6 斯特拉地区铀成矿模式

1—新元古代—古生代基底;2—陆相碎屑岩;3—滨海相细碎屑岩;4—脆性砂岩;5—含藻类砂岩;6—黏土质粉砂岩;7—黏土质钙质砂岩;8—古近纪—新近纪岩脉、橄榄煌斑岩;9—古近纪—新近纪火山碎屑角砾岩;10—铀矿化;11—断层

Fig.6 Uranium metallogenetic model in Straz area

1-Neoproterozoic-Paleozoic basement; 2-Continental facies clastic rocks; 3-Costal facies clastic rocks; 4-Friable sandstone; 5-Fucoid sandstone; 6-Argillaceous siltstone; 7-Argillaceous calcareous sandstone; 8-Paleogene-Neogene dyke and olivine lamprophyre; 9-Paleogene-Neogene pyroclastic breccia; 10-Uranium mineralization; 11-Fault

铀矿床(钱家店矿床)进行对比研究(表3),两个矿



图 7 波西米亚盆地哈姆尔矿床与松辽盆地钱家店矿床在全球的位置(王飞飞等, 2017)

Fig.7 The global position of Hamr deposit (Bohemia Basin) and Qianjiadian deposit (Songliao Basin) (after Wang Feifei et al., 2017)

表 3 波西米亚盆地和松辽盆地砂岩型铀矿床对比研究

Table 3 Comparative study on sandstone-type uranium deposits in Bohemia Basin and Songliao Basin

地质要素		波西米亚盆地	松辽盆地
区域地质背景	大地构造位置	捷克波西米亚盆地北部斯特拉地区	中国东北松辽盆地钱家店凹陷
	基底特征	新元古界—下古生界千枚岩、海西期花岗岩等	下构造层: 前寒武纪中深变质岩系和片麻花岗岩 上构造层: 晚古生代浅变质岩系和各时期花岗岩
	古构造背景	强烈挤压	弱伸展、弱挤压构造
矿床地质	沉积相	陆相—滨海相—浅海相	辫状河
	主要构造	NW—SE和NE—SW构造	NNE向、NW断裂构造
	主要地层	上白垩统森诺曼阶、土伦阶	上白垩统青山口组、姚家组、嫩江组
	赋矿层位	上白垩统森诺曼阶	上白垩统姚家组
矿体地质	砂岩类型	灰色脆性砂岩、泥质粉砂岩等	灰色长石岩屑砂岩
	铀存在形式	以独立铀矿物为主	吸附铀为主
	矿物组合	矿石矿物成分相当复杂(表2), 多达130余种矿物, 有些矿物为世界上首次发现, 一些矿物稀土含量高, 伴有稀土元素矿化	微晶石英—方解石—沥青铀矿组合
	矿体形态	板状、卷状	板状
成矿演化	矿化规模	超大型	大型
	铀矿化年龄	37 Ma, (25Ma±3)Ma, (6±3)Ma	以中新世为主, 多小于20 Ma
	围岩蚀变	赤铁矿—伊利石化、炭质—伊利石化、高岭石化、硅化	高岭石化、赤铁矿化、碳酸盐化、黄铁矿化、重晶石化、后生氧化铁化
	构造	NW—SE向的拉贝断裂和NE—SW向的厄尔士断裂	受构造天窗控制, 还与NNE向、NW向断裂构造及辉绿岩脉密切相关
控矿因素	岩性—岩相	浅海相砂岩、滨海相泥质粉砂岩、陆相粉砂岩	三角洲、滨浅湖相粉砂岩、泥岩、杂, 砾岩
	古气候	干旱	整体干旱—半干旱夹局部潮湿
	水文地质	土伦阶潜水与森诺曼阶承压水	完整的补—径—流体系
	油气还原条件	不发育	发育
成矿演化	铀源	沉积预富集铀源、元古代和古生代花岗岩等	加里东、海西期酸性火山岩、燕山期花岗岩为主
	矿床成因	沉积+热液改造+层间氧化带渗入改造复成因型	渗入水层间氧化和油田水上升还原混合成矿
典型矿床		哈姆尔矿床	钱家店矿床

数据来源: 陈戴生等, 2003, 2011; 刘志飞和胡修桐, 2003; 夏毓亮等, 2003; 张金带等, 2005, 2010; 陈祖伊等, 2010; 金若时和覃志安, 2013; 闫枫, 2018; 程银行等, 2020。

床具有诸多异同点。

其共同点有:(1)哈姆尔矿床和钱家店矿床都是位于北纬 40°~60°范围内的多因复成矿床砂岩型铀矿床,都存在多控矿因素、多铀源及多成因等特点;(2)构造在成矿过程中都具有重要的作用,含铀流体都会流经构造或构造所造成的裂隙中,并最终移入储矿砂岩层中富集成矿;(3)赋矿层位都位于上白垩统,含矿岩性为灰色砂岩、粉砂岩等,矿体形态以板状居多,并且蚀变在成矿过程中起重要作用;(4)成矿过程都存在预富集成矿-改造富集成矿-层间渗入成矿 3 个重要阶段;(5)成矿古气候条件相似。

其不同点有:(1)古构造背景哈姆尔矿床为强烈挤压而钱家店矿床却为弱伸展—弱挤压构造;(2)哈姆尔矿床的铀以独立铀矿物的形式存在,而钱家店矿床以吸附铀形式存在;(3)哈姆尔矿床不存在油气的作用,而钱家店矿床在新近纪时期存在油气还原保护阶段,该时期的断裂构造活动强烈,深部的还原性流体沿断裂向上逸散并产生大量后生油气蚀变现象,产生的还原产物一方面由于还原作用而产生,另一方面又加剧了赋矿层位的还原性;(4)沉积相存在差异:哈姆尔矿床为浅海—滨海—大陆沉积,钱家店矿床为辫状河沉积相。

7 结 论

(1)波西米亚盆地斯特拉成矿区的成矿分布受切穿基底并长期活动的北西向深断裂带控制,北西向深断裂带与北东向深断裂带的交汇区控制了矿体的定位。铀矿床在空间上、成因上与早阿尔卑斯期岩浆活动及其后的各种脉岩关系密切。铀矿主要产于晚白垩世的 3 个岩相中。

(2)矿化分为炭质—伊利石、赤铁矿—高岭土、锆富集、多金属成矿、褐铁矿化及赤铁矿—石英等 6 个阶段。矿石集中在透水层和不透水层的接触处。

(3)斯特拉成矿区的成矿模式属于多铀源、盆地基底原始铀源为主、多阶段大地构造控矿、以阿尔卑斯期造山运动为主、多成因复合成矿、早阿尔卑斯期岩浆热液叠加成矿为主的“三多三主”复成因成矿模式。

(4)松辽盆地钱家店砂岩型铀矿床与波西米亚盆地哈姆尔矿床砂岩型铀矿床在控矿因素、成矿条件及成矿模式方面具有众多相似之处,但在铀的存

在形式上明显不同,哈姆尔矿床为独立铀矿物、而钱家店矿床以吸附铀为主。

References

- Cai C F, Dong H L, Li H T, Xiao X J, Ou G X, Zhang C M. 2007. Mineralogical and geochemical evidence for coupled bacterial uranium mineralization and hydrocarbon oxidation in the Shashagetai deposit, NW China[J]. *Chemical Geology*, 236(1/2): 167–179.
- Chen Daisheng, Li Shengxiang, Cai Yuqi. 2003. A discussion on research situation and development direction of sandstone-type uranium deposits in the Meso–Cenozoic basin of China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 21(1): 113–117 (in Chinese with English abstract).
- Chen Daisheng, Liu Wusheng, Jia Licheng. 2011. Paleo-climate evolution in China and its control on the metallization of sandstone type uranium deposit of Meso–Cenozoic basins[J]. *Uranium Geology*, 27(6): 113–117 (in Chinese with English abstract).
- Chen Zuyi, Chen Daisheng, Gu Kangheng, Wang Yajing. 2010. The regional distribution regularities of ore-hosting horizon, deposit type and mineralization age of China's sandstone-hosted uranium deposits[J]. *Uranium Geology*, 26(6): 321–327 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Y H, Wang S Y, Jin R S, Li J G, Ao C, Teng X M. 2019. Global Miocene tectonics and regional sandstone-style uranium mineralization[J]. *Ore Geology Reviews*, 106: 238–250.
- Cheng Yinhang, Zhang Tianfu, Zeng Wei, Hu Peng, Liu Xing, Yang Jun, Qu Kai, Wang Shaoyi, Cheng Xianyu, Ao Cong, Jin Ruoshi, Miao Peisen. 2020. Driving forces for sandstone-type uranium super-enrichment in Meso–Cenozoic basin, North China[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 44(4): 590–606 (in Chinese with English abstract).
- Curiale J A, Bloch S, Rafalska–Bloch J, Harrison W E. 1983. Petroleum-related origin for uriferous organic-rich nodules of southwestern Oklahoma[J]. *AAPG Bulletin*, 67(4): 588–608.
- Dahlkamp F J. 2016. *Uranium Deposits of the World*[M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 129–143.
- Ekert V, Muzak J. 2010. Mining and remediation at the Straz pod Ralskem Uranium deposit[J]. *Geoscience Engineering*, (3): 1–6.
- Fan Aiping, Liu Yiqun, Yang Renchao, Feng Qiao, Zhang Fuxin, Han Zuozhen. 2007. Study on diagenesis of sandstone type uranium deposits in Dongsheng area of Ordos Basin[J]. *Science in China: Earth Science*, 37(S1): 166–172 (in Chinese).
- Fu Yong, Wei Shuaichao, Jin Ruoshi, Li Jianguo, Ao Cong. 2016. Current status and existing problems of China's sandstone-type uranium deposits[J]. *Acta Geologica Sinica*, 90(12): 3519–3544 (in Chinese with English abstract).
- Ingham E S, Cook N J, Cliff J, Ciobanu C L, Huddleston A. 2014. A combined chemical, isotopic and microstructural study of pyrite

- from roll-front uranium deposits, Lake Eyre Basin, South Australia[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 125: 440–465.
- Jin R S, Miao P S, Sima X Z, Li J G, Zhao H L, Zhao F Q, Fen X X, Chen Y, Chen L L, Zhao L J, Zhu Q. 2016. Structure styles of Mesozoic–Cenozoic U-bearing rock series in Northern China[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 90(6): 2104–2116.
- Jin Ruoshi, Qin Zhi'an. 2013. Study on the exploration sequence of sandstone-hosted uranium deposits in North China[J]. *Geological Survey and Research*, 36(2): 81–84 (in Chinese with English abstract).
- Lehmann B. 2008. Uranium ore deposits[J]. *Economic Geology*, 2: 16–26.
- Li Tiangang. 1995. Uranium deposit in the Bohemian block (I)[J]. *Overseas Uranium and Gold Geology*, 12(4): 289–291 (in Chinese).
- Li Tiangang. 1997. Uranium deposit in the Bohemian block (III)[J]. *Overseas Uranium and Gold Geology*, (1): 1–7 (in Chinese).
- Lin Shuangxing, Gong Xiaofeng, Zhang Tieling. 2017. Deep geofluid and uranium metallogenies in Meso–Cenozoic basin[J]. *Uranium Geology*, 33(6): 321–328 (in Chinese with English abstract).
- Liu Xiang. 1996. Characteristics of the superlarge polygenetic compound uranium deposits in the Bohemian Massif and geotectonic background of the mineralization[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, (4): 298–309 (in Chinese).
- Liu Zhifei, Hu Xiumian. 2003. Extreme climates events in the Cretaceous and Paleogene[J]. *Advance in Earth Sciences*, 18(5): 681–690 (in Chinese with English abstract).
- Luo Yi, He Zhongbo, Ma Hanfen, Sun Xiang. 2012. Metallogenic characteristics of Qianjiadian sandstone uranium deposit in Songliao Basin[J]. *Mineral Deposits*, 31(2): 391–400 (in Chinese with English abstract).
- Luo Yi, Ma Hanfeng, Xia Yuliang, Zhang Zegui. 2007. Geologic characteristics and metallogenic model of Qianjiadian uranium deposit in Songliao Basin[J]. *Uranium Geology*, 23(4): 193–200 (in Chinese with English abstract).
- Novak J. 2001. Groundwater remediation in Straz Leaching operation[J]. *Mine Water and the Environment*, (20): 158–167.
- Scharm B. 1991. Mineralogy of sandstone-type uranium district of northern Bohemia (Czechoslovakia)[C]// *Primary Radioactive Paragenetic (The Textural Patterns of Radioactive Mineral Paragenetic Associations)*, 289–315.
- Shan Zhibo, Lei Angui, Song Bairong, Ao Cong, Yang Songlin, Han Hongdou. 2022. Features of clay minerals in the Upper Cretaceous Yaojia Formation sandstones of the Qianjiadian Area in the Songliao Basin and its relation to uranium mineralization[J]. *Geology in China*, 49(1): 271–283 (in Chinese with English abstract).
- Song H, Ni S J, Chi G X, Zhang C J, Hou M C, Liu H X, Wang G, Yan W Q. 2019. Systematic variations of H–O–C isotopes in different alteration zones of sandstone-hosted uranium deposits in the southern margin of the Yili Basin (Xinjiang, China): A review and implications for the ore-forming mechanisms[J]. *Ore Geology Reviews*, 107: 615–628.
- Song Hao, Ni Shijun, Hou Mingcai, Zhang Chengjiang, Shi Zhiqiang, Wang Guo, Yang Bin, Hu Yuan, Chen Yuejiao. 2016. The characteristic of clay minerals in sandstone-type uranium deposit in the Yili Basin, NW China and its relationship with uranium mineralization[J]. *Acta Geologica Sinica*, 90(12): 3352–3366 (in Chinese with English abstract).
- Troger K. 2017. Facies changes in the Cenomanian (Cretaceous) of the northwestern Elbe Valley near Dresden (Saxony, Germany)[J]. *Acta Geologica Polonica*, 61(1): 135–144.
- Wang Fan. 2018. Analysis of Metallogenic Conditions of Sandstone-type Uranium Deposits in Northwest Area of Songliao Basin[D]. Nanchang: East China University of Technology, 1–99 (in Chinese with English abstract).
- Wang Feifei, Liu Chiyang, Qiu Xinwei, Guo Pei, Zhang Shaohua, Cheng Xianghu. 2017. Characteristics and distribution of worlds identified sandstone-type uranium resources[J]. *Acta Geologica Sinica*, 91(9): 2021–2046 (in Chinese with English abstract).
- Wedepohl K H. 1995. Composition of the continental crust[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(7): 1217–1232.
- Xia Yu. 2017. The Simulation Research of Interlayered Oxidized Zone Sand Type Uranium Deposit's Mineralization Geological Condition[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 1–67 (in Chinese with English abstract).
- Xia Yuliang, Lin Jinrong, Liu Hanbin, Fan Guang, Hou Yanxian. 2013. Research on geochronology of sandstone-hosted uranium formation in major uranium productive basins, northern China[J]. *Uranium Geology*, (3): 126–136 (in Chinese with English abstract).
- Xue C J, Chi G X, Xue W. 2010. Interaction of two fluid systems in the formation of sandstone-hosted uranium deposits in the Ordos Basin: Geochemical evidence and hydrodynamic modeling[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 106: 226–235.
- Yan Feng. 2018. Petrology and Geochemistry of the Qianjiadian Sandstone-type Uranium Deposit in the Southwest of Songliao Basin[D]. Xi'an: Northwest University, 1–84 (in Chinese with English abstract).
- Zammit C M, Brugger J, Southam G, Reith F. 2014. In situ recover of uranium—the microbial influence[J]. *Hydrometallurgy*, 150: 236–244.
- Zhang Jindai. 2016. Innovation and development of metallogenic theory for sandstone type uranium deposit in China[J]. *Uranium Geology*, 32(6): 321–332 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jindai, Xu Gaozhong, Chen Anping, Wang Cheng. 2005. Preliminary discussion on uranium metallogenic models of China's in situ leachable sandstone type uranium deposits[J]. *Uranium Geology*, 21(3): 139–145 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jindai, Xu Gaozhong, Lin Jinrong, Peng Yunbiao, Wang Guo. 2010. The implication of six kinds of new sandstone-type uranium deposits to uranium resources potential in North China[J]. *Geology*

- in China, 37(5): 1434–1449 (in Chinese with English abstract).
- Zhang L, Liu C Y, Fayek M, Wu B L, Lei K Y, Cun X N, Sun L. 2017. Hydrothermal mineralization in the sandstone-hosted Hangjinqi uranium deposit, North Ordos Basin, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 80: 103–115.
- Zhao Fengmin. 1991. Geological survey of uranium deposit in Czech block[J]. *Overseas Uranium and Gold Geology*, (3): 1–9.
- ### 附中文参考文献
- 陈戴生, 李胜祥, 蔡煜琦. 2003. 我国中新生代盆地砂岩型铀矿研究现状及发展方向的探讨[J]. *沉积学报*, 21(1): 113–117.
- 陈戴生, 刘武生, 贾立城. 2011. 我国中新生代古气候演化及其对盆地砂岩型铀矿的控制作用[J]. *铀矿地质*, 27(6): 321–327.
- 陈祖伊, 陈戴生, 古抗衡, 王亚婧. 2010. 中国砂岩型铀矿容矿层位、矿化类型和矿化年龄的区域分布规律[J]. *铀矿地质*, 26(6): 321–330.
- 程银行, 张天福, 曾威, 胡鹏, 刘行, 杨君, 曲凯, 王少轶, 程先钰, 奥琮, 金若时, 苗培森. 2020. 中国北方中新生代盆地砂岩型铀超常富集的驱动力[J]. *大地构造与成矿学*, 44(4): 590–606.
- 樊爱萍, 柳益群, 杨仁超, 冯乔, 张复新, 韩作振. 2007. 鄂尔多斯盆地东胜地区砂岩型铀成矿成岩作用研究[J]. *中国科学 (D 辑: 地球科学)*, 37(S1): 166–172.
- 付勇, 魏帅超, 金若时, 李建国, 奥琮. 2016. 我国砂岩型铀矿分带特征研究现状及存在问题[J]. *地质学报*, 90(12): 3519–3544.
- 金若时, 覃志安. 2013. 中国北方含煤盆地砂岩型铀矿找矿模式层序研究[J]. *地质调查与评价*, 36(2): 81–84.
- 李田港. 1995. 波希米亚地块铀矿床 (一)[J]. *国外铀金地质*, 12(4): 289–291.
- 李田港. 1997. 波希米亚地块铀矿 (三)[J]. *国外铀金地质*, (1): 1–7.
- 林双幸, 宫晓峰, 张铁岭. 2017. 中新生代盆地深部地质流体及成矿作用[J]. *铀矿地质*, 33(6): 321–328.
- 刘翔. 1996. “波希米亚地块”超大型多成因成铀矿床特征及其成矿大地构造背景[J]. *大地构造与成矿学*, (4): 298–309.
- 刘志飞, 胡修棉. 2003. 白垩纪至早第三纪的极端气候事件[J]. *地球科学进展*, 18(5): 681–690.
- 罗毅, 何中波, 马汉峰, 孙祥. 2012. 松辽盆地钱家店砂岩型铀矿床成矿地质特征[J]. *矿床地质*, 31(2): 391–400.
- 罗毅, 马汉峰, 夏毓亮, 张泽贵. 2007. 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*, 23(4): 193–200.
- 单芝波, 雷安贵, 宋柏荣, 奥琮, 杨松林, 韩洪斗. 2022. 松辽盆地钱家店地区姚家组砂岩黏土矿物特征及其与铀矿化的关系[J]. *中国地质*, 49(1): 271–283.
- 宋昊, 倪师军, 候明才, 张成江, 时志强, 王果, 杨斌, 胡媛, 陈月娟. 2016. 新疆伊犁盆地砂岩型铀矿床层间氧化带中粘土矿物特征及与铀矿化关系研究[J]. *地质学报*, 90(12): 804–819.
- 王帆. 2018. 松辽盆地西北地区砂岩型铀矿成矿条件分析[D]. 南昌: 东华理工大学, 1–99.
- 王飞飞, 刘池洋, 邱欣卫, 郭佩, 张少华, 程相虎. 2017. 世界砂岩型铀矿探明资源的分布及特征[J]. *地质学报*, 91(9): 2021–2046.
- 夏彘. 2017. 层间氧化带砂岩型铀矿成矿条件的模拟研究[D]. 成都: 成都理工大学, 1–67.
- 夏毓亮, 林锦荣, 刘汉彬, 范光, 侯艳先. 2003. 中国北方主要产铀盆地砂岩型铀矿成矿年代学研究[J]. *铀矿地质*, (3): 126–136.
- 闫枫. 2018. 松辽盆地西南部钱家店砂岩型铀矿床岩石学和矿床地球化学研究[D]. 西安: 西北大学, 1–84.
- 张金带. 2016. 我国砂岩型铀矿成矿理论的创新和发展[J]. *铀矿地质*, 32(6): 321–332.
- 张金带, 徐高中, 陈安平, 王成. 2005. 我国可地浸砂岩型铀矿成矿模式初步探讨[J]. *铀矿地质*, 21(3): 139–145.
- 张金带, 徐高中, 林锦荣, 彭云彪, 王果. 2010. 中国北方 6 种新的砂岩型铀矿对铀资源潜力的提示[J]. *中国地质*, 37(5): 1434–1449.
- 赵凤民. 1991. 捷克地块铀矿地质概况[J]. *国外铀金地质*, (3): 1–9.