

准噶尔盆地东部构造抬升剥蚀对铀成矿的控制

韩效忠, 吴兆剑, 林中湘, 王行军, 蒋 喆, 季 辉, 来 强, 胡 航

(中国煤炭地质总局特种技术勘探中心 中煤地质集团有限公司, 北京 100042)

摘 要: 构造与成矿具有密切的动态耦合关系, 长期研究发现目标层形成和之后的构造抬升剥蚀事件对砂岩型铀矿的形成和定位具有明显控制作用。为了详细地、较为合理地刻画不同类型、不同层位铀矿形成的机理和过程, 实现理论模式向找矿模型的转化, 建立一种可便于操作的远景预测新方法和新途径, 以准噶尔盆地东部卡拉麦里山周缘铀矿床(点)为研究对象, 采用盆地构造格架划分、埋藏与剥蚀史研究和蚀源区磷灰石裂变径迹模拟的方法, 开展了系列研究工作。研究发现卡拉麦里山周缘不同类型的铀矿床(点)是其抬升剥蚀演化这同一成矿系统作用下的不同产物。盆地沉降曲线和蚀源区磷灰石裂变径迹模拟显示准噶尔盆地东部在中晚侏罗世以来经历了160~140、90~70和约20 Ma以来的3次快速隆升剥蚀阶段, 这些构造事件均诱发了明显的铀成矿作用, 其构造抬升剥蚀的强度控制了铀成矿的规模, 其期次严格地控制了铀成矿的期次。在铀成矿过程中构造发展演化起到了主导作用, 规模铀成矿主要发育在有完整成矿系统的构造斜坡带上, 如喀木斯特进积式(剥蚀)多期次同向叠加和北三台退积式远源铀成矿模式往往能形成大型矿床; 构造形态复杂多变的区段一般不会发育规模铀成矿, 如卡拉麦里山南缘山前地区。上述区域构造抬升、铀成矿序列和控矿组合等规律的总结, 为该区铀成矿远景预测提供了科学依据, 可推广应用到其他盆地砂岩型铀矿找矿当中。

关键词: 准噶尔盆地东部; 卡拉麦里山; 构造抬升剥蚀; 砂岩型铀矿; 煤岩型铀矿

中图分类号: P619.14 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2023)09-3471-12

Control of tectonic uplift and denudation on uranium mineralization in the eastern Junggar Basin

HAN Xiaozhong, WU Zhaojian, LIN Zhongxiang, WANG Xingjun, JIANG Zhe, JI Hui, LAI Qiang, HU Hang

(Special Technology Exploration Center of China Coal Geology Bureau, China Coal Geology Engineering Corporation, Beijing 100042, China)

Abstract: There is a close dynamic coupling relationship between tectonic and mineralization. Long-term research and observation have found that the formation and location of sandstone-type uranium deposits are obviously controlled by the formation of target layer and the subsequent tectonic uplift and denudation events. In order to describe the formation mechanism and process of different types and horizons of uranium deposits in detail and more reasonably, realize the transformation from theoretical model to prospecting model, and establish a new method and approach for target prediction that can be easily applied, a series of studies has been carried out on the uranium deposits (points) around the Kalamari Mountain in the eastern part of Junggar Basin. The study adopts the methods of the basin structural framework division, the research on burial and denudation history and the apatite fission track simulation in the source area. It is found

收稿日期: 2022-09-28 修回日期: 2023-02-22 责任编辑: 韩晋平 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2022.1399

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42202088); 国家重点研发计划资助项目(2018YFC0604204)

作者简介: 韩效忠(1973—), 男, 甘肃通渭人, 教授级高级工程师, 博士。E-mail: geohxz@163.com

引用格式: 韩效忠, 吴兆剑, 林中湘, 等. 准噶尔盆地东部构造抬升剥蚀对铀成矿的控制[J]. 煤炭学报, 2023, 48(9): 3471-3482.

HAN Xiaozhong, WU Zhaojian, LIN Zhongxiang, et al. Control of tectonic uplift and denudation on uranium mineralization in the eastern Junggar Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(9): 3471-3482.



移动阅读

that different types of uranium deposits (spots) in the periphery of the Kalamari Mountain are different products of the same metallogenic system, namely, uplift and denudation evolution. The basin subsidence curve and apatite fission track simulation in the source area show that the eastern Junggar basin has experienced 160–140, 90–70 Ma and about 20 Ma three rapid uplift and denudation stages since the Middle and Late Jurassic. These tectonic events have induced obvious uranium mineralization. The scale and stage of uranium mineralization are controlled strictly by the intensity and stage of tectonic uplift and denudation. In the process of uranium mineralization, tectonic development and evolution play a leading role. Large-scale uranium mineralization is mainly developed in the structural slope zone with a complete mineralization system. For example, the Kamusite progradation (denudation) multi-period same-direction superposition and the Beisantai retrogradation far source uranium mineralization model can often form some large-scale deposits. In general, a large-scale uranium mineralization will not develop in the sections with complex and variable structural forms, such as the piedmont area at the southern edge of the Kalamari Mountain. The summary of the above regional tectonic uplift, uranium mineralization sequence and ore-control combination provide a scientific basis for the prediction of uranium mineralization prospect in this area, and can be applied to the prospecting of sandstone-type uranium deposits in other basins.

Key words: eastern Junggar Basin; Kalamari Mountain; tectonic uplift and denudation; sandstone type uranium deposit; coal rock type uranium deposit

准噶尔盆地是我国西部重要的能源盆地之一,其内发育大量的石油、天然气和煤。长期来,铀矿地质工作者在该盆地进行了大量工作,在盆地围缘发现了系列铀异常、矿点^[1-2],未能发现大型铀矿床,这显然与大盆地成大铀矿的基本特征不相符合。

通过近 10 a 来铀煤兼探工程的实施,在卡拉麦里山北坡前缘带头屯河组 (J_2t) 中落实了喀木斯特大型砂岩型铀矿产地^[3-4],实现了准噶尔盆地铀矿找矿的突破;同时在帐篷沟背斜西翼八道湾 (J_2b) 中发现了砂岩型铀矿体。受国家重点研发计划资助,笔者所在的项目团队实施了深地资源勘查与开采示范工程,于 2020 年底在卡拉麦里山南坡前缘斜坡带沙湾组 (N_1s) 发现了北三台深部砂岩型铀矿体,实现了新层位铀矿找矿的突破,进一步拓展了铀矿找矿深度。核工业部门在长期的铀矿找矿当中,发现了发育在西山窑组 (J_2x) 中的大庆沟煤岩型铀矿床和发育在头屯河组 (J_2t) 中的将军庙等砂岩型铀矿点。这些发现为揭示本区铀成矿规律提供了良好条件。

构造与成矿具有密切的动态耦合关系,前人从不同的侧面对构造与成矿关系进行富有成效的研究。陈宣华等^[5]通过对西准噶尔成矿带构造体系特征研究,提出了“多”字型和“入”字型构造控矿类型及规律,周圣生^[6]指出中国已知的层控矿床明显地受其大地构造特点控制,张连昌等^[7]对西天山构造演化与优势矿产成矿规律进行了研究,建立了西天山主要成矿区带的成矿模式,王双明^[8]通过鄂尔多斯盆地叠合演化及构造对成煤作用的控制研究,指出构造背景和沉积作用转换是控制煤炭资源形成的重要地质条件。构造与成矿关系研究突显了构造对成矿的控制作

用,砂岩型铀矿的形成也离不开构造发展演化的控制作用。

准噶尔盆地东部铀矿发育层位多、类型较全、时代跨度大,使之该区成为铀成矿规律研究的热点地区。从地理位置讲,上述铀矿体均分布在卡拉麦里山南、北坡前缘带,其成矿与卡拉麦里山关系如何?多种成矿类型是否是同一成矿作用下的不同表现?这些科学问题的回答有助于深化本区成矿规律,有助于铀矿找矿更大突破。笔者从准噶尔盆地东部,特别是卡拉麦里山中新代构造抬升剥蚀事件深入研究入手,揭示本区区域构造抬升、铀成矿序列和控矿组合等规律,为该区铀成矿远景预测提供科学依据。

1 区域地质概况

研究区位于准噶尔盆地东部,在构造分区上,以卡拉麦里山为界,北部区属于陆梁隆起和乌伦古拗陷,其内发育乌伦古南斜坡带铀成矿有利区,南部区属于东部隆起,其内卡拉麦里山前带为轴向南北向的五彩湾凹陷、沙帐断褶带、石树沟凹陷相间排列带^[9],向南则为北三台斜坡带铀成矿有利区。

研究区出露的古生界地层有奥陶系、志留系、泥盆系、石炭系和二叠系,其中出露最广的地层为泥盆系和石炭系,构成了卡拉麦里山主体,而奥陶系和志留系只在前山以残片的形式呈东西向断续分布在断裂带中;中生界由三叠系、侏罗系、白垩系、古近系、新近系和第四系构成(图 1)。

因本区铀成矿主要由侏罗纪以来地层构成,下面重点介绍其基本特征。

(1) 侏罗系。出露在卡拉麦里山南北缘,层位发育

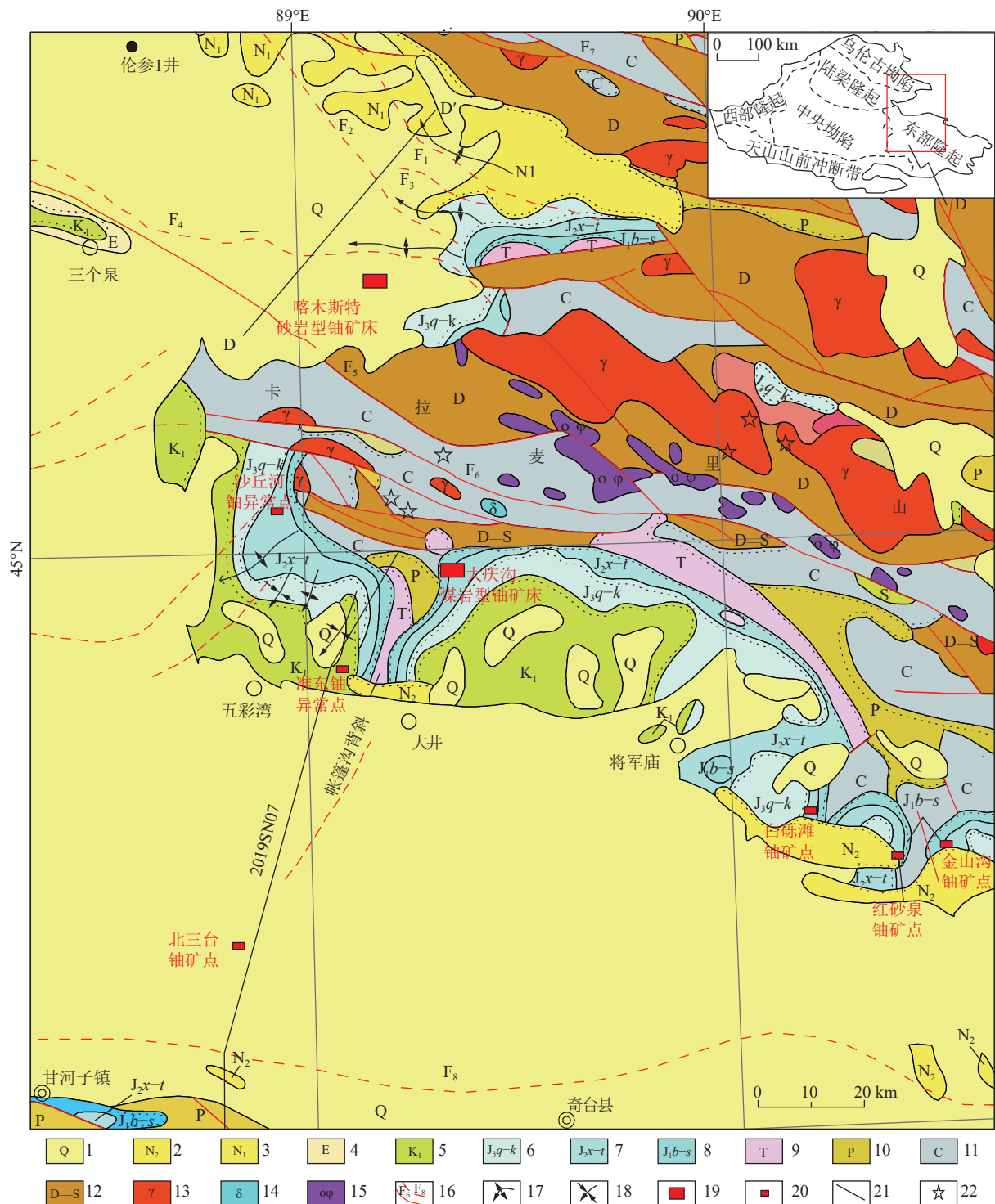


图1 准噶尔盆地东部地质简图和盆地构造单元划分

Fig.1 Geological Sketch map of eastern Junggar Basin and tectonic unit division map of the basin

齐全。自下而上为八道湾组(J_1b)、三工河组(J_1s)、西山窑组(J_2x)、头屯河组(J_2t)、齐古组(J_3q)和喀拉扎组(J_3k)。局部地段因头屯河组、齐古组和喀拉扎组无

明显的分层标志,将3者合称为石树沟群(J_{2-3sh})。

① 八道湾组。常与下伏三叠系呈不整合接触。下段以厚层的粗碎屑冲积扇—辫状河三角洲沉积为典

型特征,局部发育薄煤层;中段为滨浅湖-半深湖沉积;上段发育灰绿砂砾岩、砂岩,灰色泥岩和粉砂岩,可见煤层或煤线,为本区主要产煤和赋铀层位之一。

② 三工河组。以发育厚层深灰色泥岩、灰黑色炭质泥岩为典型识别标志,在地层下部发育较厚层辫状河砂体,其内可见氧化层的发育,指示其具备铀成矿的潜力。

③ 西山窑组。发育以三角洲-滨浅湖-曲流河为主,的砂、泥岩沉积,通常含 2 层煤,下部地层煤层较薄,上部地层以厚煤层为典型特征,最厚可达上百米,其间发育多处煤岩型铀矿床(点)。

④ 头屯河组。底部为含炭质的河湖相粗碎屑岩,上部过渡为杂色、褐色、紫红色泥岩、粉砂质泥岩、砂岩互层,是本区主要赋铀层位。

⑤ 齐古组。为干旱环境下细碎屑沉积,岩性主要有红褐色-紫红色泥岩、砂质泥岩、砂岩夹凝灰质砂岩、凝灰岩等。

(2) 白垩系。在本区主要发育为吐谷鲁群(K_1tg),为干旱-半干旱、炎热气候环境下形成的河湖相、湖沼相杂色条带状碎屑岩沉积。

(3) 古近系。在区内没有出露,在钻孔和地震剖面中可见紫泥泉子组(E_{1-2z})和安集海河组(E_{2-3a})。前者为山麓-辫状河沉积,岩性以褐色-红色砂砾岩、泥岩为主,局部夹有石膏和膏泥岩。向北尖灭或缺失;后者为滨浅湖相沉积,为紫红色、灰绿色、暗色泥岩、介壳灰岩、泥灰岩加薄层钙质砂砾岩。

(4) 新近系。为一套灰绿色、红褐色、黄褐色辫状河-曲流河-滨浅湖沉积,自下而上分为沙湾组(N_1s)、塔西河组(N_1t)和独山子组(N_2d)。

① 沙湾组。为一套紫红色、灰绿色砂泥岩互层。近年来,在盆地东缘和西北缘发现多处沙湾组铀矿(化)显示。

② 塔西河组。常见灰绿色、棕色泥岩夹薄层砂岩。

③ 独山子组。以褐红色、浅棕色泥岩为主,夹有灰色泥岩、砂岩和砾岩。

区内岩浆岩主要分布在卡拉麦里山,花岗岩类岩浆活动在该区大规模发育,构成与卡拉麦里断裂走向一致并受断裂控制的花岗岩带。该地区早古生界火山地层出露较少,仅出露有中奥陶世荒草坡群基性火山岩、凝灰岩、火山碎屑岩等;晚古生代该区出露的火山岩系岩石类型有玄武岩类、粗安类、英安岩类、流纹岩类、火山碎屑岩类和碎屑熔岩类,为一套较典型的陆相火山碎屑岩堆积。

区内断裂构造主体为 NWW 向到 NW 向,是重要

的控岩控盆断裂,也是地下水补-迳-排体系的重要组成部分,是地下水主要排泄区和深部油气上升的重要通道;其次为 NNE 向断层,多分布在次级褶皱核部。代表性为卡拉麦里—二连(F_6)地壳拼接断裂带,沿断裂带断续分布蛇绿岩,断裂带主体呈 NW~SE 向延伸,北西段略呈弧形,断裂面倾向 SW,南东延入蒙古,北西端被第四系覆盖。托让格库都克压扭性断裂(F_7),呈 NW~SE 向延伸,北西端被第四系覆盖。准噶尔南缘断裂(F_8),呈近 EW 向延伸,地表被第四系覆盖,为物探证实的隐伏断裂。

区内褶皱主要分布在卡拉麦里南侧,相间发育多个近南北向长轴状的次级背斜和向斜,如帐篷沟背斜、火烧山背斜、芦草沟向斜、沙丘河背斜等^[10],构成了沙帐复式背斜(又称沙帐断褶带)。卷入地层主要为白垩纪吐谷鲁群及之前地层,在其次级背斜两翼侏罗系中常发育有层间氧化带^[10-11],局部形成较好的铀矿化,如帐篷沟背斜西翼铀矿体。

2 区内典型铀矿床(点)特征

2.1 喀木斯特铀矿床

2.1.1 矿体基本特征

喀木斯特铀矿床位于卡拉麦里山北缘斜坡带,含矿目标层为中侏罗统头屯河组。在平面上矿体为蛇曲状呈近东西向展布,目前基本查明矿带长度约为 15 km;在垂向上可见 2 层铀矿(化),其中下部矿层为主矿层,主要发育于头屯河组地层底部的砂砾岩层中,紧贴西山窑组煤层顶部,呈典型的板状(图 2),沿走向较稳定延伸,铀矿物为沥青铀矿,矿化围岩蚀变有黄铁矿化、黏土化、碳酸盐化等^[4],矿体获得全岩 U-Pb 等时线年龄为 21 ± 2 和 27 ± 4 Ma。

2.1.2 主要控矿因素

喀木斯特铀矿床主要物源(铀源)来自于卡拉麦里山^[12],其花岗岩体岩体 U 含量丰富,为 $0.80\times 10^{-6}\sim 6.14\times 10^{-6}$,平均值为 3.18×10^{-6} ,U 元素具有明显的迁出,迁移量为 2.39×10^{-6} ^[13],显示了良好的铀源。

区内含矿目标层头屯河组稳定发育 2 层砂岩,多为辫状河沉积相砂岩,上部砂岩厚度较大,多在 50 m 左右,下部砂岩相对较薄,平均厚度 35 m 左右,局部地段叠加有冲积扇砂岩,使得上下砂岩层相互连通,单层砂岩厚度显著增大到 60~70 m,最厚可达 110 m。砂岩富含有机炭、黄铁矿等还原物质^[14],下部砂岩又紧临煤层,有利于下伏煤层气等还原气体上逸,增加其还原容量,这也是下部砂岩为主含矿层的直接原因。

头屯河组 2 套砂岩均发育有氧化带,在盆缘为潜水氧化,向盆内沿伸逐渐过渡为层间氧化带,氧化带

厚度 10~70 m。矿区揭露氧化带前锋线约 15 km, 位于卡拉麦里山北坡和喀拉萨依断裂夹持区, 严格的控制了喀木斯特铀矿体的定位。据唐湘飞等^[15] 头屯河组层间氧化带在走向、倾向上延伸稳定, 在喀拉萨依断裂以北的乌伦古坳陷东部仍有分布, 形成区域上连续的氧化带前锋线, 总长度达 150 km, 但此部分层间氧化带未形成规模铀矿化, 指示铀成矿形成条件较为严苛, 是多种因素耦合作用的结果。

发育稳定的缓倾单斜地层是判别能否形成大矿的重要因素, 这在我国多个大型砂岩型铀矿床中已得到证实, 也是业界普遍认同的砂岩型铀矿床控矿规律

之一。喀木斯特铀矿床定位于乌伦古南斜坡带, 该斜坡带产状平缓 (图 3), 非常有利于大型砂岩型铀矿的形成, 构成了良好的地下水迳流区, 在矿床北侧发育深切基底的喀拉萨依断裂, 它一方面是深部还原流体的上升的通道, 同时也是地下水的主要排泄区。卡拉麦里山、乌伦古南斜坡带和喀拉萨依断裂 3 者构成了完美的补-迳-排体系, 基于这一体系的规模, 在不考虑矿体埋深的前景下, 喀木斯特铀矿床向东扩展的空间很大。除了先天条件极好之外, 目标层形成之的构造发展演化 (抬升剥蚀) 也非常有利于该矿床的发展壮大, 这一点下文将会详细介绍。

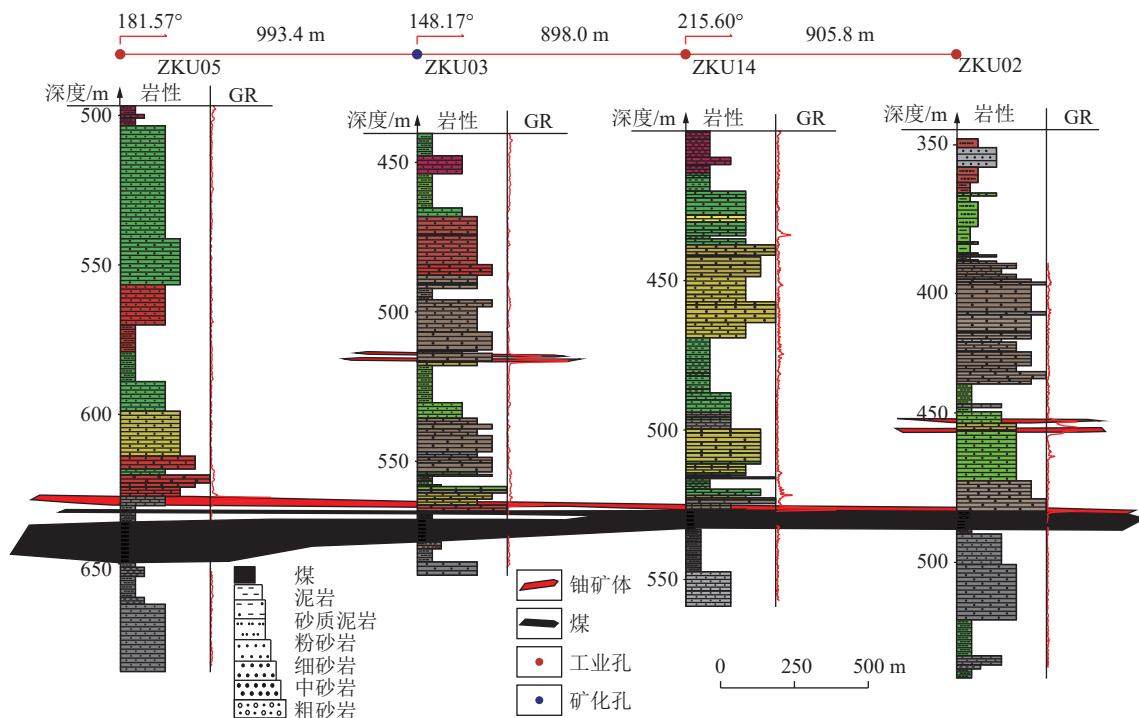
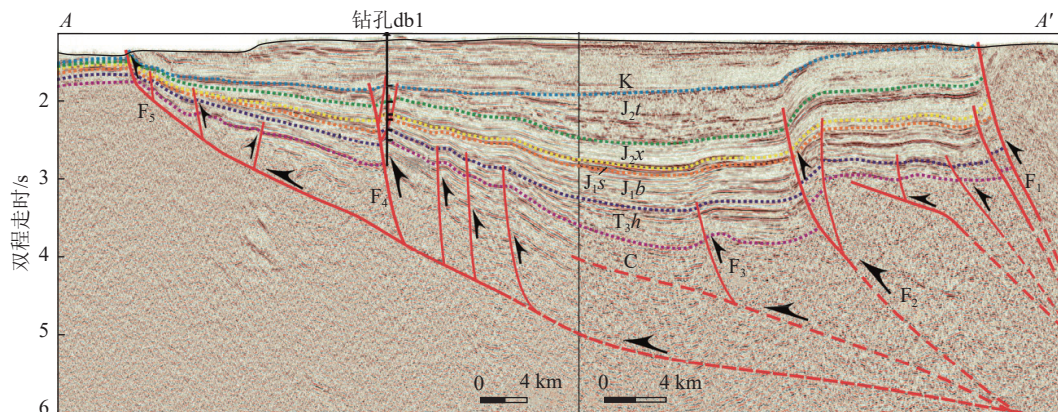


图 2 喀木斯特地区铀成矿钻孔剖面

Fig.2 Profile of uranium metallogenesis in Kamusite area



2.2 卡拉麦里山南缘山前带系列铀矿(化)点

该区沿卡拉麦里山南缘山前带发育系列铀矿点、矿化点,矿体主要分布在相间排列的如沙丘河背斜、火烧山背斜、帐篷沟背斜、将军庙背斜、黑山凸起等构造的翼部,含矿目标层为中侏罗统八道湾组、西山窑组和头屯河组。

八道湾组发现的铀工业矿体位于帐篷沟背斜西翼(由中国地质调查局实施的“铀煤兼探”工程发现),根据目前发现的 3 个砂岩型铀工业孔及其他铀矿化孔初步判断,矿体走向为近南北向,与背斜轴向近平行,显示背斜核部露头区供铀供水、两翼成矿的特点,即与成矿相关的含氧含铀水渗入方向为向西和向东。万汉平等^[10]通过地面高精度磁测在该区推断氧化带前锋线平行于帐篷沟背斜轴部,煤田钻孔揭露在背斜西翼八道湾组中发育层间氧化带,埋深一般超过 600 m,最深可达 900 m,氧化砂岩厚度 13.08~27.18 m^[17]。这与由北向南的由卡拉麦里山大面积花岗岩体供铀供源相比较,小面积的由三叠纪沉积岩供铀必然导致铀源供应不足,成矿规模相对有限。据鲁克改^[18],在帐篷沟背斜西翼向西八道湾组发育层间氧化带,前锋线走向为近东西向,控制长度 33 km,沙丘河砂岩型铀异常点受其控制,目前还未发现有规模铀成矿;同时指出在西起火烧山东到石树沟,三工河组发育 3 层层间氧化带,控制长度 10~25 km,氧化砂岩存在铀的迁出(地层本身供铀),未有明显铀成矿,只在背斜翼部有铀异常发育。

西山窑组是本区的主要含煤地层,局部地段单层煤层厚度大于 100 m,在其地层内发现了煤岩型铀矿床(大庆沟铀矿床)和砂岩型铀矿(化)点:石钱滩铀异常点、白砾滩铀矿点、北山铀矿化点、红砂泉铀矿化点、白塔山铀矿化点^[19-20]。该区除露头附近发育氧化砂岩外,深部钻孔揭露基本未见氧化砂岩,显示地层还原容量很高,氧化作用很弱,这也是在该区发现了系列砂岩型铀矿点、铀异常,但未发现规模砂岩型铀矿床的重要原因之一。大庆沟煤岩型铀矿床是该区发现的唯一一个铀矿床,含矿层位西山窑组,矿体产于帐篷沟背斜两翼的煤层中,随煤层矿头出露地表,沿倾向下沿一般 25~50 m,最浅仅几米、最深为 75 m,矿体垂直埋深多小于 40 m,显示为浅表吸附成矿的特点,成矿作用可能为氧化风化和淋滤改造。矿体沿走向相对较长,一般 60~100 m,最长 450 m,呈透镜状、扁豆状和带状断续分布^[21]。

头屯河组在将军庙地区发育层间氧化,并发现了砂岩型铀矿化。毛广振等^[19]通过氧化带、还原带和过渡带中微量铀、Th/U 比值变化不大,指出将军庙地

区层间氧化作用存在间断,氧化带发育不持久,造成铀成矿规模有限。

2.3 北三台铀矿(化)点

北三台铀矿(化)点是国家重点研发计划“北方砂岩型铀能源矿产基地深部探测技术示范”项目的重要发现之一,依据石油钻孔资料二次开发和三维地震反演^[22],资源量估算达到了矿床级的规模,项目只对其实施了 1 口铀矿验证孔,因此暂将其称之一为“铀矿(化)点”。

北三台铀矿点位于准东东部隆起的北三台凸起之上,含矿层位为新近纪沙湾组。该组含有上下 2 套连续分布砂岩,上部砂体较细,多以中细砂岩为主,下部砂体较粗,主要为砂砾岩、砾岩为主。铀矿体位于底部砂岩中,通过三维地震波阻抗反演含矿砂体分布范围较广,展布面积 106.26 km²,厚度 12~22 m。

通过对本区油田钻孔的排查,发现了大量的放射性异常钻孔成片分布,项目团队对沙湾组底界砂砾岩 GR 反演,最终刻画含铀砂体面积为 28 km²^[22]。实施的 ZS-1 井对该区进行了勘查示范,共发现了 3 层工业铀矿体,最上一层为 900.15~900.65 m,平均品位 1.26×0.01%,含矿围岩为粉砂岩、泥岩;下部 2 层发育在沙湾组下部砂体中,为砂岩型铀矿体,构成层间氧化带型的上、下两层矿体,上层为 920.90~921.55 m,厚 0.65 m,平均品位为 1.63×0.01%,平米铀量为 0.22 kg/m²;下层为 933.05~934.90 m,厚 1.85 m,平均品位为 3.52×10⁻⁴,平米铀量为 1.37 kg/m²(图 4)。依据连井剖面和地震剖面反演,矿体在剖面上呈板状、透镜状,平面上呈条带状。矿石矿物为铀石,成矿年龄为 7.6~0.3 Ma^[23],围岩蚀变有黄铁矿化、黏土化、碳酸盐化等。

矿体就位于北三台凸起之上,沙湾组表现为由北向南平缓单斜地层,为古近纪—新近纪前陆盆地的前隆斜坡带,成矿的构造条件十分有利(图 5)。矿区内有深切下部的北三台北断层和西泉断层,将下部层位中油气等还原物质导入到沙湾组,萤光照片显示,含矿砂岩中油气显示明显,这为原本缺少还原介质的地层具备了铀沉淀富集的必要条件。西泉断层胶结物有方解石、沸石、石英等且矿物共生现象,表明该断裂经历过多次流体作用,胶结物中流体包裹体测试表明北三台凸起断裂带至少经历了 3 期大规模流体活动^[24]。从图 4 可明显看出矿体则正好位于黄褐色砂砾岩与上、下青灰色砂砾岩的过渡部位,显示本区铀成矿为典型的层间氧化带型。依据斜坡带的分布特征推断铀源应为自于矿区北部的卡拉麦里山,从图 5 可见沙湾组北部长期出露地表,可接受长期的含氧含铀水的

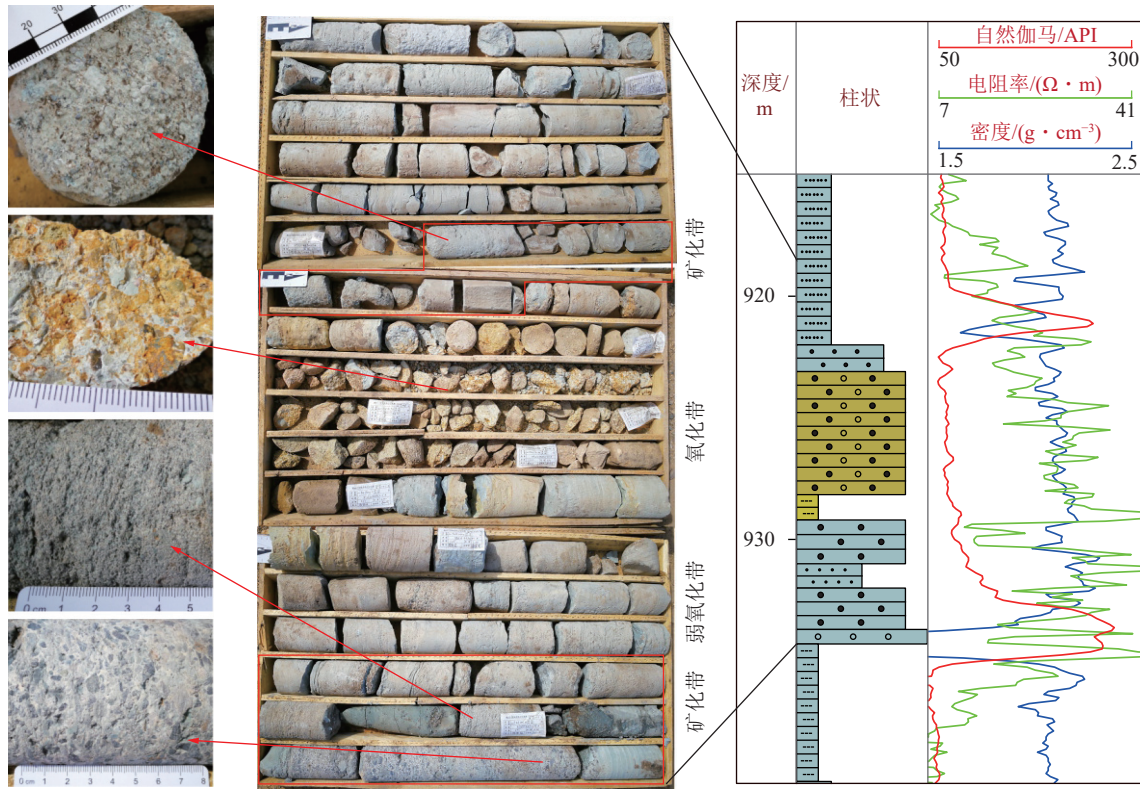


图4 准深1井成矿段柱状

Fig.4 Columnar diagram of metallogenic section of Zhunshen 1 well

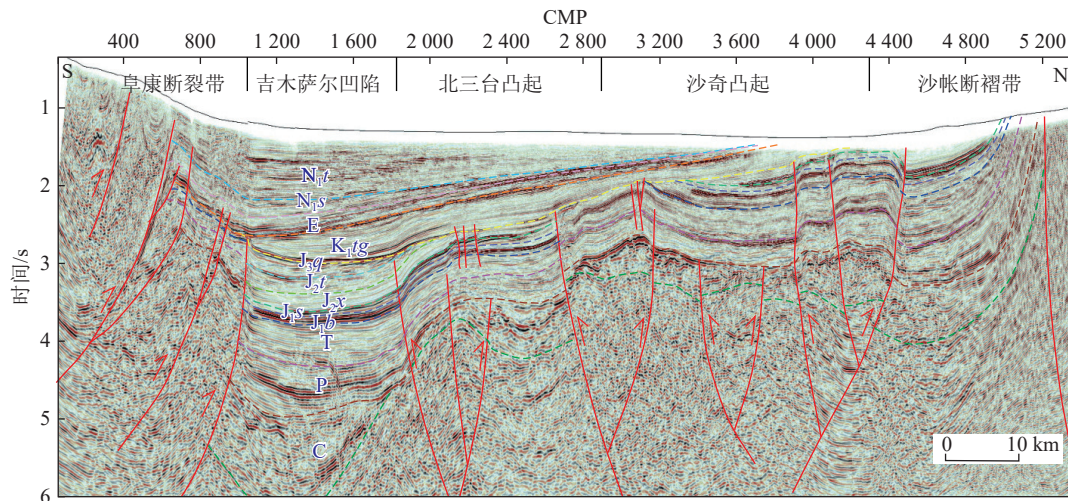


图5 准噶尔盆地东部隆起 SN 向地震剖面 (2019SN07)

Fig.5 SN direction seismic profile of the eastern uplift of Junggar Basin (2019SN07)

改造。综上所述,北三台成矿条件极佳,具备形成大型砂岩型铀矿床的一切条件,是准噶尔盆地铀矿找矿的重要地区。

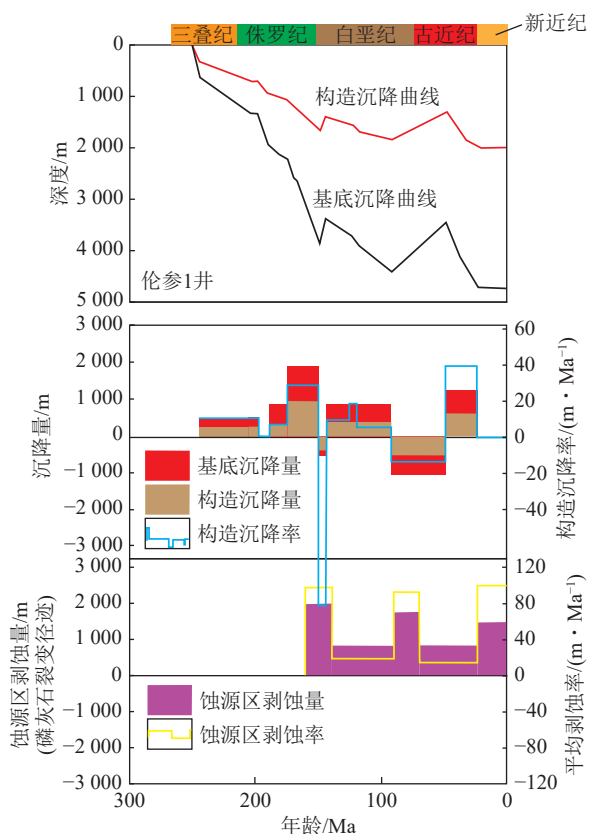
3 准噶尔盆地东缘构造抬升事件及其控矿模式

卡拉麦里山及周缘“盆-山”体系初建于早石炭世早期,之后经历了区域伸展作用,又在中二叠世的挤压作用下重新形成,后续的中新生代构造运动继承了

这一盆山体系^[25]。笔者以盆地沉降曲线和蚀源区磷灰石裂变径模拟方法,精细地刻画与铀成矿关系密切的侏罗纪以来构造发展演化,揭示构造抬升事件与砂岩型铀成矿关系。笔者在另文中总结了通过埋藏沉降史和磷灰石裂变径迹模拟预测铀成矿方法^[26],请相关读者参阅。

准噶尔盆地东缘埋藏史和沉降史曲线采用伦参1井数据进行计算,磷灰石裂变径迹样品采自卡拉麦

里山蚀源区(图6)。埋藏史和沉降史曲线记录了150~140和95~50 Ma两次较为明显的构造抬升事件。磷灰石裂变径迹模拟数据显示蚀源区在侏罗纪以来持续隆升并遭受剥蚀^[1,27],从图6可以划分出160~140、90~70和约20 Ma以来的3次快速隆升剥蚀阶段。两者反映的构造抬升事件基本一致,且构造抬升事件的启动和过程蚀源区略早于盆地区,符合地质构造发展演化的基本规律。



注: 伦参1井数据来自文献[30]; 磷灰石裂变径迹数据来自文献[1,27]。

图6 准噶尔盆地东部构造沉降和抬升剥蚀曲线^[1,27,30]

Fig.6 Tectonic subsidence, uplift and denudation curve in the eastern Junggar Basin^[1,27,30]

早中侏罗世以来,卡拉麦里山持续缓慢隆升,盆地区弱伸展缓慢沉降,连续沉积了八道湾组至西山窑组,山前地带多发育冲积扇、辫状河流相等有利成矿的沉积相。

西山窑期末(中侏罗统头屯河组—上侏罗统喀拉扎组沉积前),受燕山运动早期的影响,卡拉美丽等山前断裂发生右旋走滑作用,在卡拉麦里山南缘形成了沙丘河、火烧山和帐篷沟等一系列北东向展布的背斜构造^[28],在北缘西山窑组及其之前地层不同程度掀斜,造成西山窑组与头屯河组为不整合接触,如在北三台凸起上,头屯河组超覆不整合在西山窑组之上^[9]。该

期构造运动对铀成矿的控制作用表现为:在南缘随着核部持续隆升剥蚀,八道湾组、三工河组在背斜核部出露形成构造天窗,在其间形成如上文提到的发育在背斜两翼、前锋线平行于褶皱轴向的层间氧化带,受铀源条件不佳所限,只在帐篷沟西翼的八道湾组中形成了工业铀矿体,整体铀成矿前景不好(图7(b));在北缘形成了发育在西山窑组的层间氧化带,初步奠定了喀木斯特铀矿床的基本构造格架,因此时卡拉麦里山处于缓慢隆升过程中,铀源供给不充足,未能形成工业意义的铀矿床。随着头屯河组的沉积,该期成矿作用结束。

晚侏罗世末(早白垩世吐谷鲁群沉积前,160~140 Ma),受燕山运动中期的影响,在近南北向挤压下^[29],卡拉麦里山北缘八道湾组、三工河组、西山窑组、头屯河组等地层继承性的进一步掀斜,形成向北北东向倾斜的单斜地层(图3)。南缘近南北向褶皱轴向发生弯曲,呈现为“S”型,山前轴部抬升剥蚀,核部最老出露三叠系地层;磷灰石裂变径迹模拟显示,在160~140 Ma蚀源区处于快速隆升剥蚀阶段,提供了大量的铀源,本区进入了第1次规模铀成矿。在卡拉麦里山北缘,缓倾斜的头屯河组大面积出露在地表,上段形成了潜水氧化的铀矿化,在下段形成了以层间氧化带为主的铀矿体,喀木斯特铀矿床初具规模(图7(a)),因头屯河组的超覆不整合作用,在沿着陆梁隆起轴部西山窑组未出露地表(图3(a)、(c)),未能接受含氧含水改造,笔者初步推断,在喀木斯特沿陆梁隆起区近东西方向找矿重点应为头屯河组,其下西山窑组、三工河组和八道湾在这个区段均非重点找矿层位。在卡拉麦里山南缘,该时期出露地层多,从八道湾组到西山窑组均受到了含氧含铀地下水改造,形成或继承了八道湾组和三工河组中层间氧化带,成矿相对分散;地层倾向多变、复杂,没有形成如北缘一样的规模构造斜坡带;铀源方向多垂直于地层倾向,层间氧化带的补-迳-排体系不完善,含氧含铀地下水不能有效聚集;蚀源区带来的铀源多以吸附态的形式富集在浅表一带,因西山窑组发育巨厚煤层,还原容量最大,因而在西山窑组中优先形成了大庆沟煤岩型铀矿床(图7(b))和钱滩铀异常点、白砾滩铀矿点、北山铀矿化点、红砂泉铀矿化点、白塔山铀矿化点等砂岩型铀(化)点,这些矿点可能也经受了后期叠加富集,但因先天条件不足未能形成大型铀矿床。伴随着早白垩世吐谷鲁群沉积,目标层含氧含铀水渗入窗口被覆盖,本次成矿随之结束。

白垩纪末(紫泥泉子组沉积前,90~70 Ma),受燕山运动晚期的影响,盆地发生近南北向挤压^[29],地层

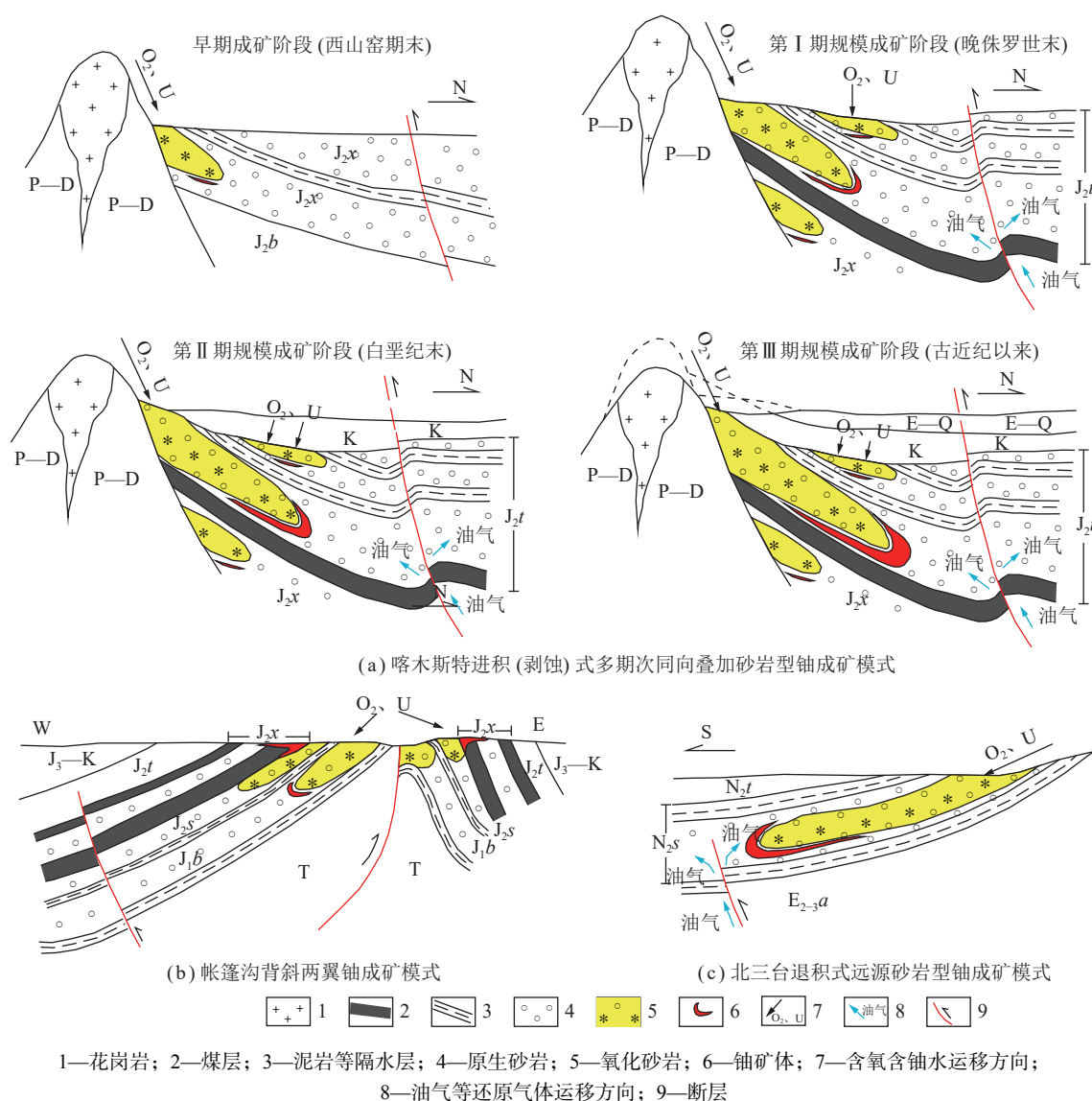


图7 准噶尔盆地东部铀成矿模式

Fig.7 Uranium metallogenetic model in the eastern Junggar Basin

进一步掀斜剥蚀,在地震剖面上显示古近系底与白垩系顶之间的不整合面。图6显示盆地内部未发生大规模的抬升剥蚀,蚀源区出现了明显的抬升剥蚀事件指示盆地可能处于挤压挠曲凹陷阶段,新一期铀成矿作用开启。在卡拉麦里山北缘,沉积地层进一步抬升剥蚀,含矿目标层头屯河组在靠近山前一带出露地表,接受来自蚀源区的含氧含水改造,在先期成矿的基础上进一步叠加富集,矿体规模进一步扩大;南缘在南北向挤压应力作用下形成了一系列近东西向的逆冲断层和一些近东西向的凸起与凹陷,叠加在早期近南北向的凹陷与凸起之上,造成了东部隆起现今的“棋盘式”构造格局,使侏罗纪末就不利成矿的构造体系更加复杂,形成大型砂岩型铀矿床的条件先天不足。该期成矿可能对发育在山前西山窑组中的大庆沟煤岩型铀矿床和钱滩铀异常点、白砾滩铀矿点、北山铀

矿化点、红砂泉铀矿化点、白塔山铀矿化点等砂岩型铀(化)点也具有一定的加富作用。

古近纪以来,受博格达山向北的强烈推覆,在博格达山前形成再生前陆盆地,发育一套北薄南厚的楔形沉积,卡拉麦里山一带则为前缘隆起区,这为北三台铀成矿准备成矿地层(图5)。从图6沉降曲线来看,盆地区在50 Ma抬升剥蚀作用达到顶点,使得卡拉麦里山前地层因抬升遭受剥蚀,侏罗纪等有利成矿矿目标层再次出露地表,加之卡拉麦里山约20 Ma至今的持续隆升剥蚀作用,为铀成矿提供了大量铀源,触发了本区最大规模的一次铀成矿作用。本次铀成矿在卡拉麦里山南北山前表现略有不同,在北缘的喀木斯特地区,成矿作用应在古近纪渐新世(32 Ma左右)就已开启并持续至今,在早期铀成矿的基础上进一步加大加富,最终形成了喀木斯特砂岩型铀矿床,获得的

21~27 Ma 铀成矿年龄则是其证据之一;而在卡拉麦里山南缘,如北三台地区,在北缘大规模成矿作用发生时,目前发现铀成矿的沙湾组还未沉积,从北三台铀矿体铀石电子探针获得的铀矿年龄为 7.6~0.3 Ma 来判断,南缘有效铀成矿可能开启于新近纪上新世并持续至今。从南北缘铀成矿对比发现,在构造控矿的角度,构造抬升剥蚀事件是砂岩型铀成矿的主要诱发因素,而能否真正成矿则明显受发育有完整成矿系统的构造斜坡带控制。

4 讨 论

上文构造抬升事件与铀成矿控制作用研究发现,在侏罗纪以来,卡拉麦里山经历了 4 次明显的构造抬升剥蚀事件,诱发了 4 期铀成矿作用,造就了卡拉麦里山周缘铀矿床(点)定位(图 7(a))。在喀木斯特地区,第 1 期铀成矿作用相对较弱,只形成该区西山窑地层中的层间氧化带和少量铀异常。第 2~4 期均在头屯河组形成了规模铀成矿,3 期铀成矿作用同向叠加富集,最终形成了喀木斯特大型砂岩型铀矿床,即该矿床是 3 期铀成矿叠加作用的结果。从目前侏罗系的出露情况来推断,第 4 期铀成矿作用也应在八道湾到西山窑组地层中有所反映,但目前勘探成果还未证实这一点,后续铀矿找矿时应对其有所关注。

在卡拉麦里山南缘,上述 4 期铀成作用也在该区毫无疑问的发生。第 1 期铀成矿作用在帐篷沟西翼八道湾中形成走向近南北向的铀成矿,受铀源条件限制铀成矿规模有限,即便有后期其他期次铀成矿作用叠加。第 2 和第 3 期铀成矿共同作用形成了发育在西山窑组中的大庆沟煤岩型铀矿床(吸附淋滤作用)和钱滩铀异常点、白砾滩铀矿点、北山铀矿化点、红砂泉铀矿化点、白塔山铀矿化点等砂岩型铀(化)点,但因复杂构造作用和“棋盘式”构造格局,先期成矿遭受破坏及“补-迳-排”体系不完善,最终在该组中形成了点多面广、不成规模的铀成矿格局(图 7(b))。第四期铀成矿作用形成了北三台铀成矿(图 7(c)),虽然其成矿主要是由 1 期铀成矿作用形成,但第四期铀成矿作用是本区最大规模的成矿作用,加之成矿斜坡带十分舒展、分布面积广阔,层间氧化带长距离深入腹地,地层本身提取铀源较多,具备形成大型砂岩型铀矿的先天条件,发育如前文所述连续分布 28 km² 的含铀砂体就不足为奇,该区将是后期砂岩型铀矿找矿的重点地区。

需要说明是,铀成矿是受构造演化及形态、沉积相及物源(铀源)、古地下水类型及流向、还原流体性质及渗入、古气候等多种因素的联合控制。在这一过

程中构造发展演化起到了主导因素,是沉积盆地铀成矿的源动力,是铀矿找矿的主要判据。在预测新区是否能成矿时,关注的重点是目标层沉积之后的构造抬升剥蚀事件,并要与剥源区铀源供给相结合;在预测能成矿的前提下铀成矿发育的具体位置时,构造形态即发育有完整的成矿系统的构造斜坡带识别是关键,喀木斯特和北三台铀成矿定位就充分地说明了这一点。

5 结 论

(1) 准噶尔盆地东部发育有较为典型的砂岩型和煤岩型铀矿床以及砂岩型铀矿点,其中喀木斯特大型砂岩型铀矿产地和北三台铀矿产地为典型的层间氧化带型,而发育在帐篷沟一带的大庆沟煤岩型铀矿床和部分砂岩型铀矿点的成矿作用为吸附淋滤成因,它们是卡拉麦里山抬升剥蚀演化这同一成矿系统作用下的不同产物。

(2) 盆地沉降曲线和蚀源区磷灰石裂变径模拟显示盆地区经历了 150~140 和 95~50 Ma 两次较为明显的构造抬升事件,而蚀源区经历了 160~140、90~70 和约 20 Ma 以来的 3 次快速隆升剥蚀阶段,2 者反映的构造抬升事件基本一致。这些构造事件均诱发了明显的铀成矿作用,研究发现构造抬升剥蚀的强度控制了铀成矿的规模,其期次严格地控制了铀成矿的期次。

(3) 在铀成矿众多控矿因素中,构造发展演化起到了主导作用,是沉积盆地铀成矿的源动力,是铀矿找矿的主要判据。规模铀成矿主要发育在有完整成矿系统的构造斜坡带上,喀木斯特进积式(剥蚀)多期次同向叠加和北三台退积式远源铀成矿模式往往能形成大型矿床,构造形态复杂多变的区段一般不会发育规模铀成矿。

参考文献(References):

- [1] 宋继叶,秦明宽,蔡煜琦,等.准东构造隆升对砂岩型铀成矿作用的制约:磷灰石裂变径迹证据[J].地球科学,2019,44(11):3910-3925.
SONG Jiye, QIN Mingkuan, CAI Yuqi, et al. Uplift-denudation of orogenic belts control on the formation of sandstone type uranium (U) deposits in eastern Junggar, Northwest China: Implications from Apatite Fission Track (AFT)[J]. Earth Science, 2019, 44(11): 3910-3925.
- [2] 秦明宽,何中波,刘章月,等.准噶尔盆地砂岩型铀矿成矿环境与找矿方向研究[J].地质论评,2017,63(5):1255-1269.
QIN Mingkuan, HE Zhongbo, LIU Zhangyue, et al. Study on metallogenic environments and prospective direction of sandstone type uranium deposits in Junggar Basin[J]. Geological Review, 2017,

- 63(5): 1255–1269.
- [3] 金若时, 黄澎涛, 苗培森, 等. 准噶尔盆地东缘侏罗系砂岩型铀矿成矿条件与找矿方向. 地质通报[J]. 地质通报, 2013, 33(2–3): 359–369.
- JIN Roushi, HUANG Pengtao, MIAO Peisheng, et al. Metallogenic conditions and prospecting targeting of the Jurassic sand type uranium deposits on the eastern margin of Junggar Basin[J]. Geological Bulletin of China, 2013, 33(2–3): 359–369.
- [4] 殷栋法, 韩效忠, 黄澎涛, 等. 准噶尔盆地东部喀木斯特地区砂岩型铀矿目的层岩石学特征及其意义[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(1): 32–39.
- YIN Dongfa, HAN Xiaozhong, HUANG Pengtao, et al. Lithology characteristics and meaning of the target layer of sandstone-type uranium deposits in Kamusite area of the eastern Junggar basin[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(1): 32–39.
- [5] 陈宣华, 杨农, 叶宝莹, 等. 中亚成矿域多核成矿系统西准噶尔成矿带构造体系特征及其对成矿作用的控制[J]. 大地构造与成矿学, 2011, 35(3): 325–338.
- CHEN Xuanhua, YANG Nong, YE Baoying, et al. Tectonic system and its control on metallogenesis in western Junggar as part of the central Asia Multi-Core metallogenic system[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2011, 35(3): 325–338.
- [6] 周圣生. 不同大地构造单元和地壳发展阶段对层控矿床的成矿控制[J]. 大地构造与成矿学, 1987(3): 211–222.
- ZHOU Shengsheng. Controls of different tectonic elements and different crustal evolution stages on mineralize of stratabound deposits[J]. Geotectonica et Metallogenia, 1987(3): 211–222.
- [7] 张连昌, 冯京, 李平, 等. 西天山构造演化与优势矿产成矿规律[J]. 地球科学, 2022, 47(9): 3127–3146.
- ZHANG Lianchang, FENG Jing, LI Ping, et al. Tectonic evolution and metallogenic regularity of dominant deposits in the western Tianshan[J]. Earth Science, 2022, 47(9): 3127–3146.
- [8] 王双明. 鄂尔多斯盆地叠合演化及构造对成煤作用的控制[J]. 地学前缘, 2017, 24(2): 54–63.
- WANG Shuangming. Ordos Basin superposed evolution and structural controls of coal forming activities[J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(2): 54–63.
- [9] 何登发, 周路, 吴晓智. 准噶尔盆地古隆起形成演化与油气聚集[M]. 北京: 石油工业出版社, 2012.
- [10] 万汉平, 程纪星, 喻翔. 层间氧化带砂岩型铀矿有利成矿空间定位——以准噶尔盆地东缘砂岩型铀矿探测为例[J]. 地质与勘探, 2020, 56(1): 26–36.
- WAN Hanping, CHENG Jixing, YU Xiang. Locating favorable metallogenic space of sandstone-type uranium ore in interlayer oxidation zones: An example in the eastern margin of Junggar Basin[J]. Geology and Exploration, 2020, 56(1): 26–36.
- [11] 王哲, 金振奎, 刘学功, 等. 准噶尔盆地东部滴水泉地区侏罗系八道湾组沉积特征与沉积演化模式[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(2): 282–291.
- WANG Zhe, JIN Zhenkui, LIU Xuegong, et al. Sedimentary characteristics and evolution model of the Jurassic Badaowan formation in the Dishuiquan area in eastern Junggar Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(2): 282–291.
- [12] 杨甫, 陈刚, 章辉若, 等. 准噶尔盆地东北部DB1井中生界碎屑锆石LA-ICP-MS U-Pb定年[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2013, 49(3): 313–319.
- YANG Fu, CHEN Gang, ZHANG Huiruo, et al. LA-ICP-MS U-Pb dating of detrital zircon from the mesozoic sandstone core-samples in well DB1 of northeast Junggar Basin[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2013, 49(3): 313–319.
- [13] 耿英英, 刘章月, 黄少华, 等. 准噶尔盆地东北缘卡拉麦里花岗岩体年代学、地球化学特征及铀成矿潜力[J]. 地球科学与环境学报, 2022, 44(1): 20–41.
- GENG Yingying, LIU Zhangyue, HUANG Shaohua, et al. Geochronology and geochemistry of Kalamaili granitic rocks and uranium ore-forming potential at the northeastern margin of Junggar Basin[J]. China Journal of Earth Sciences and Environment, 2022, 44(1): 20–41.
- [14] WU Zhaojian, HAN Xiaozhong, JI Hui, et al. Mesozoic-Cenozoic tectonic events of Eastern Junggar Basin, NW China and their significance for uranium mineralization: Insights from seismic profiling and AFT dating analysis[J]. Ore Geology Reviews, 2021, 139: 104488.
- [15] 唐湘飞, 王果, 张占峰, 等. 准噶尔盆地卡姆斯特地区侏罗系铀成矿模式研究[J]. 地质论评, 2018, 64(3): 647–657.
- TANG Xiangfei, WANG Guo, ZHANG Zhanfeng, et al. A study on uranium metallogenic model of Jurassic in Kamust region, Junggar Basin[J]. Geological Review, 2018, 64(3): 647–657.
- [16] 赵淑娟, 李三忠, 刘鑫, 等. 准噶尔盆地东缘构造: 阿尔泰与北天山造山带交接转换的陆内过程[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(10): 2130–2141.
- ZHAO Shujuan, LI Sanzhong, LIU Xin, et al. Structures of the eastern Junggar Basin: intracontinental transition between the north Tianshan and the Altai Orogens[J]. Scientia Sinica(Terrae), 2014, 44(10): 2130–2141.
- [17] 谭思源. 准噶尔盆地东缘中下侏罗统沉积特征及其对砂岩型铀矿成矿影响[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016: 51–54.
- TAN Siyuan. The middle and lower Jurassic sedimentary characteristics and its influence on sandstone type uranium mineralization in the eastern of junggar basin[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2016: 51–54.
- [18] 鲁克改. 东准噶尔大井地区中下侏罗统沉积特征及砂岩型铀矿成矿条件分析[J]. 新疆地质, 2002, 20(2): 118–121.
- LU Kegai. Sedimentary features of lower-middle jurassic and conditions of sandstone-type uranium mineralization in East Junggar Basin[J]. Xinjiang Geology, 2002, 20(2): 118–121.
- [19] 毛广振, 唐湘飞, 牛军杰. 准噶尔盆地东部将军庙地区砂岩型铀矿层间氧化带地球化学特征初步研究[J]. 新疆地质, 2020, 38(1): 86–91.
- MAO Guangzhen, TANG Xiangfei, NIU Junjie. The geochemical characteristics of interlayer oxidation zone of sandstone-type uranium deposits in Jiang Junmiao, Eastern Junggar Basin[J]. Xinjiang Geology, 2020, 38(1): 86–91.
- [20] 王果, 王国荣, 鲁克改, 等. 准噶尔盆地铀矿地质工作回顾及今后找矿方向[J]. 铀矿地质, 2016, 32(6): 340–349.
- WANG Guo, WANG Guorong, LU Kegai, et al. Review on the

- uranium geology efforts and outlook for future exploration in Junggar Basin[J]. *Uranium Geology*, 2016, 32(6): 340–349.
- [21] 韩效忠, 林中湘, 吴兆剑, 等. 中—新生代盆地煤铀协同勘查及对策建议[J]. *地质论评*, 2022, 68(3): 945–954.
- HAN Xiaozhong, LIN Zhongxiang, WU Zhaojian, et al. Co-exploration of coal and uranium and related policy suggestions[J]. *Geological Review*, 2022, 68(3): 945–954.
- [22] 蔡义峰, 薛冽, 彭文利, 等. 准噶尔盆地北三台凸起新近系含铀砂层分布预测[J]. *新疆地质*, 2021, 39(1): 118–123.
- CAI Yifeng, XUE Lie, PENG Wenli, et al. Prediction of distribution of Neogene uraniferous sandstone in Beisantai uplift of Junggar Basin[J]. *Xinjiang Geology*, 2021, 39(1): 118–123.
- [23] HU Xiaowen, YANG Xiaoyong, WU Zhaojian, et al. Sedimentological, petrological, and geochemical constraints on the formation of the Beisantai sandstone-type uranium deposit, Junggar Basin, NW China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2021, 141: 104668.
- [24] 张丽辰, 吴孔友, 何文军, 等. 准噶尔盆地北三台凸起断裂结构特征及成岩封闭作用[J]. *地质力学学报*, 2018, 24(5): 607–616.
- ZHANG Lichen, WU Kongyou, HE Wenjun, et al. Structural characteristics and diagenetic sealing of faults in the Beisantai swell, Junggar Basin[J]. *Journal of Geomechanics*, 2018, 24(5): 607–616.
- [25] 张磊, 何登发, 易泽军, 等. 克拉美丽山与大井坳陷的构造关系——兼论石炭纪构造—沉积格局[J]. *石油勘探与开发*, 2020, 47(1): 29–44.
- ZHANG Lei, HE Dengfa, YI Zejun, et al. Tectonic relationship between the Kelameili range and the Dajing depression: Insights into the Carboniferous tectonic-sedimentary framework[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(1): 29–44.
- [26] HAN Xiaozhong, WU Zhaojian, JI Hui, et al. Constraints of tectonic uplift and denudation on sandstone-type uranium mineralization in Meso-Cenozoic basins in northern China: A review[J]. *Ore Geology Reviews*, 2021, 141: 104528.
- [27] 李丽, 陈正乐, 祁万修, 等. 准噶尔盆地周缘山脉抬升—剥露过程的 FT 证据[J]. *岩石学报*, 2008, 24(5): 1011–1020.
- LI Li, CHEN Zhengle, QI Wanxiu, et al. Apatite fission track evidence for uplifting-exhumation processes of mountains surrounding the Junggar basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(5): 1011–1020.
- [28] 郑孟林, 田爱军, 杨彤远, 等. 准噶尔盆地东部地区构造演化与油气聚集[J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(5): 907–917.
- ZHENG Menglin, TIAN Aijun, YANG Tongyuan, et al. Structural evolution and hydrocarbon accumulation in the eastern Junggar Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(5): 907–917.
- [29] 宋利宏. 拉麦里断裂带形成与演化规律[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2015: 1–71.
- SONG Lihong. Formation and evolution of the Kalamaili Fault zone[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2015: 1–71.
- [30] 李向东. 准噶尔盆地北缘中新世沉降史分析[D]. 西安: 西北大学, 2007: 49–67.
- LI Xiangdong. Subsidence history of Mesozoic-Cenozoic in the north margin of Junggar Basin and its application for reservoir formation[D]. Xi'an: Northwest University, 2007: 49–67.