

周保军,蔡煜琦,李子颖,等.柴达木盆地东部新生代构造演化及其对砂岩型铀矿的控制作用[J].世界核地质科学,2025,42(2):230-245. doi:10.3969/j.issn.1672-0636.2025.02.002

ZHOU Baojun, CAI Yuqi, LI Ziyang, et al. Cenozoic structural evolution of the eastern Qaidam basin and its control on the formation of sandstone-type uranium deposits[J]. World Nuclear Geoscience, 2025, 42(2):230-245(in Chinese).

## 柴达木盆地东部新生代构造演化及其对砂岩型铀矿的控制作用

周保军<sup>1,2,3</sup>,蔡煜琦<sup>1,2,3</sup>,李子颖<sup>1,2,3</sup>,贺锋<sup>1,2,3</sup>,陈程<sup>4,5</sup>,田明明<sup>1,2,3</sup>,赵兴齐<sup>1,2,3</sup>,李西得<sup>1,2,3</sup>,李孟华<sup>1,2,3</sup>,张希梁<sup>1,2,3</sup>,王杰<sup>1,2,3</sup>

- 1 铀资源探采与核遥感全国重点实验室,北京 100029
- 2 核工业北京地质研究院,北京 100029
- 3 中核集团铀资源勘查与评价技术重点实验室,北京 100029
- 4 中国地质调查局油气地质力学重点实验室,北京 100081
- 5 中国地质科学院地质力学研究所,北京 100081

**摘要** 柴达木盆地位于青藏高原东北缘,是我国重要的大型含油气盆地之一。近些年的铀矿勘查成果显示其同样具有较好的铀成矿前景。然而,相对于柴西地区,柴东地区在基础地质和铀矿勘查方面的研究均相对薄弱。在系统总结低温热年代学数据、物源和生长地层特征的基础上,重新梳理了柴东地区新生代构造演化历史。利用地表(野外观测)和近地表(地震剖面)数据对柴东地区典型铀矿点进行深入剖析,探讨了柴东地区新生代构造演化对铀矿化过程的控制作用。结果表明:断裂对铀矿化具有一级控制作用,铀矿化点空间上主要分布在盆内逆冲断裂附近的宽缓背斜翼部,欧北断裂及其次级断裂可能为主要控矿断裂。柴东地区以渗出铀成矿作用为主,石炭系烃源岩可能为铀矿化提供丰富铀源。盆内断裂系统为深部富铀还原流体向上运移提供有效通道和驱动力,区域强烈挤压和生烃过程控制了铀矿化的空间位置。研究成果对柴东地区下一步铀矿勘查工作具有一定指导意义。

**关键词** 柴达木盆地东部;砂岩型铀矿;构造演化;渗出铀成矿作用;流体动力

中图分类号 P619.14 文献标志码 A 文章编号 1672-0636(2025)02-0230-16

## Cenozoic structural evolution of the eastern Qaidam basin and its control on the formation of sandstone-type uranium deposits

ZHOU Baojun<sup>1,2,3</sup>, CAI Yuqi<sup>1,2,3</sup>, LI Ziyang<sup>1,2,3</sup>, HE Feng<sup>1,2,3</sup>, CHEN Cheng<sup>4,5</sup>, TIAN Mingming<sup>1,2,3</sup>, ZHAO Xingqi<sup>1,2,3</sup>, LI Xide<sup>1,2,3</sup>, LI Menghua<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Xiliang<sup>1,2,3</sup>, WANG Jie<sup>1,2,3</sup>

1 National Key Laboratory of Uranium Resources Exploration-Mining and Nuclear Remote Sensing, Beijing 100029, China

**基金项目:**核技术研发项目“柴达木盆地砂岩型铀矿资源高效预测技术及应用研究(编号:地H2301-1)”和中国核工业地质局铀矿调查评价项目“柴达木盆地中部断隆带铀矿化环境调查与远景评价(编号:202419-5)”联合资助

**收稿日期:**2025-03-23 **改回日期:**2025-04-01

**第一作者:**周保军,男,1996年生,工程师,博士,长期从事铀矿地质科研工作。E-mail:bjzhoucugb@163.com

Supported by Nuclear Technology R&D program “Study on efficient prediction technology and application of sandstone-type uranium resources in Qaidam basin (No.地 H2301-1)”, uranium investigation and evaluation project of China Nuclear Geology “Investigation and prospective evaluation of uranium metallogenic environment in the central fault-uplift of the Qaidam basin (No. 202419-5)”

**Received date:** 2025-03-23 **revised date:** 2025-04-01

**First author:** ZHOU Baojun, male, born in 1996, engineer, PhD, focusing on scientific research of uranium geology. E-mail: bjzhoucugb@163.com

2 Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China

3 CNNC Key Laboratory of Uranium Resource Prospection and Evaluation Technology, Beijing 100029, China

4 Key Laboratory of Petroleum Geomechanics, China Geological Survey, Beijing 100081, China

5 Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China

**Abstract:** Qaidam basin, located at the northeastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau, is one of China's major large-scale oil- and gas-bearing basins. The results of uranium exploration in recent years show that it has good prospects of uranium mineralization. However, compared to the western Qaidam basin, research on the fundamental geology and uranium exploration in the eastern Qaidam basin remains relatively underdeveloped. Based on systematic summary of low-temperature thermochronological data, provenance and growth strata characteristics, the Cenozoic tectonic evolution history of the east Qaidam area was reviewed. We investigated the control of Cenozoic structural evolution on uranium mineralization in the eastern Qaidam, through comprehensive analysis of typical uranium occurrences surface (field observations) and near-surface (seismic profiles) data. The results indicated that fault systems exert primary control over uranium mineralization, with uranium occurrences predominantly distributed within the flank of gentle anticlinal near the thrust faults, and the Olongbulak North Fault and its secondary faults may work as the principal ore-controlling faults. The uranium mineralization in the east Qaidam occurs predominantly by exudative uranium metallogeny, with Carboniferous hydrocarbon source rocks potentially serving as significant provider of abundant uranium for the mineralization processes. The fault systems within the basin provide effective channels and driving force for the upward migration of deep uranium-rich reduction fluid, and the regional intense compression and hydrocarbon generation control the spatial position of uranium mineralization. The findings in this paper are meaningful for the following uranium exploration work in the east Qaidam basin.

**Keywords:** eastern Qaidam basin; sandstone-type uranium deposit; structural evolution; exudative uranium metallogeny; hydrodynamic

砂岩型铀矿的形成受铀源、水文条件、气候、沉积环境和构造活动等多方面因素的综合控制。其中,成矿理论和铀矿勘查结果强调了构造活动对砂岩型铀矿的形成和保存具有重要影响。成矿期前和成矿同期,区域或板块尺度的盆-山构造演化控制了“源-汇”系统的形成和演化,对砂岩型铀矿的形成具有一级控制作用<sup>[1]</sup>。此外,断裂和褶皱的发育将目标地层抬升至近地表有利成矿位置,同时也为外部铀源和深部铀源的运移和沉淀提供必要的通道和空间。而成矿期后的强烈构造活动在一定程度上会导致含矿地层的不规律分布甚至强烈剥蚀,不利于铀矿的保存,也大大提高了勘探开采的难度。因此,查明构造演化对砂岩型铀矿的控制作用、判别有利成矿构造部位对任何一个铀矿勘探区都是必要的。

近些年,得益于渗出成矿理论的提

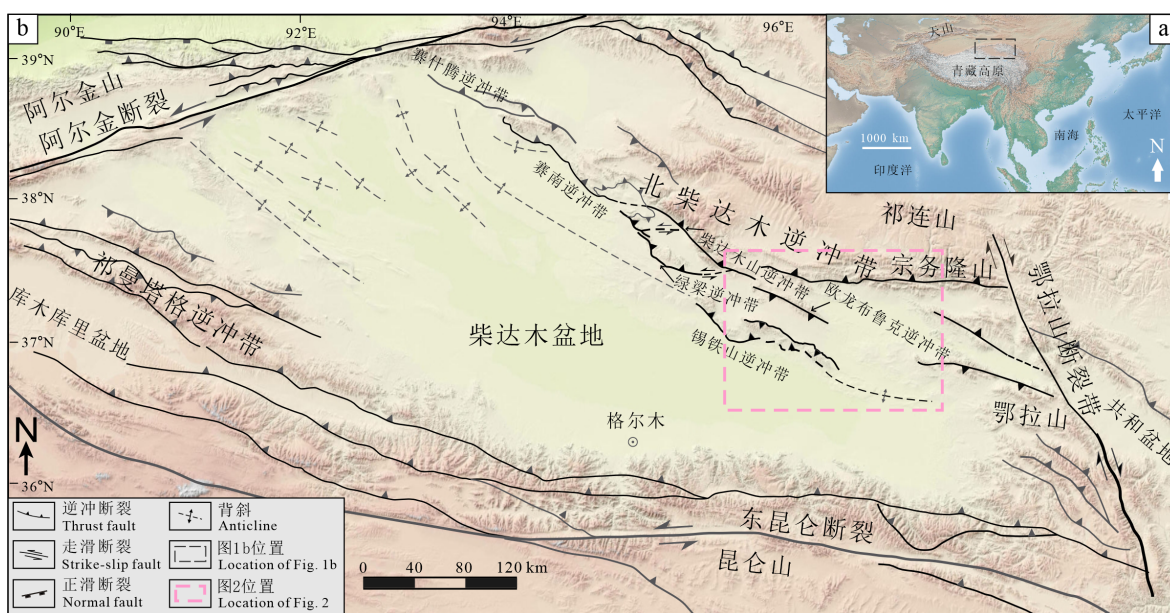
出<sup>[2-4]</sup>以及“三新”找矿方向的指导<sup>[5]</sup>,柴达木盆地铀矿勘探工作取得了显著突破。目前共发现数十处铀矿点、矿化点和众多的异常点,主要分布在柴西南地区<sup>[6]</sup>(七个泉、咸水泉等)和柴北地区(冷湖、鄂博梁等)。而柴东地区无论是在基础地质还是铀矿勘探方面研究具较为薄弱,仅在北大滩、德令哈以北地区的侏罗系大煤沟组中发现铀矿化点<sup>[7]</sup>。笔者所在项目组近两年针对柴东地区盆地内部新生代地层开展了深入的铀矿勘探工作,取得突破性进展。目前在德科、德东和旺尕秀等地区新近系中发现多处地表铀矿化点,并钻获一个工业孔和多个矿化、异常孔。这些成果表明柴东地区新生代地层同样具有巨大成矿潜力。重要的是,野外第一手资料显示这些矿点的分布大多位于逆冲断裂控制形成的背斜或单斜一翼,表明构造对铀矿的形成具有重要控制作用。本文在系统总结柴东地

区物源变化、古应力方向、低温热年代学资料的基础上,利用地表(野外)和近地表(地震剖面)资料对柴东地区新生代构造演化历史进行恢复。通过对典型铀矿化点进行剖析,深入探讨构造活动对砂岩型铀矿的控制作用。研究成果一方面有助于理解柴东地区铀矿形成过程与机理;另一方面对下一步铀矿勘查工作具有一定指导意义。

## 1 区域地质背景

柴达木盆地位于青藏高原北部,是研究青藏高原隆升和生长机制的关键地区<sup>[8-9]</sup>。盆地西北缘、东北缘以及南缘分别被阿尔金山、祁连山和东昆仑山所限,是高原内面积最大的地形凹陷区(图1)。盆地包括基底和沉积盖成两部分。基底主要由新元古代、早古生代、晚古生代变质岩和岩浆岩组成。最近的研究结果显示柴达木盆地基底岩石具有与周围造山带岩石相似的地球化学和年代学特征<sup>[10]</sup>。沉积

盖层主要由中生代(侏罗纪—白垩纪)和新生代陆相沉积岩构成。中生界厚度较薄(小于3 km)且分布不连续,主要在阿尔金山断裂附近的小型次级盆地以及柴东北地区祁连山南缘出露<sup>[11]</sup>。新生界在全盆均有出露,最大厚度超过10 km<sup>[12]</sup>。精细的磁性地层学与古生物地层学工作较好地约束了新生代地层的沉积年龄。传统的年龄模型认为新生界底部路乐河组的沉积始于早始新世<sup>[13]</sup>(约52 Ma)。然而,近些年不同的磁性地层测年结果也在挑战着传统年龄模型,认为路乐河组于晚渐新世才开始沉积<sup>[14]</sup>。Cheng等<sup>[15]</sup>系统讨论了两种年龄模型的证据、不足之处以及构造意义。王伟涛等<sup>[16]</sup>认为柴达木盆地新生代地层沉积具有穿时性,即自西向东、自北向南沉积越来越晚。西缘可能自始新世开始沉积,中部自渐新世(约31 Ma)开始沉积,晚渐新世—早中新世沉积范围扩大至盆地东部。为方便讨论,本文仍遵循传统年龄模型。



a—柴达木盆地及周围地区地理位置; b—构造纲要简图。

a—Geographic location; b—Simplified tectonic map.

图1 柴达木盆地及周围地区地理位置及构造纲要简图(据参考文献[17]修改)

Fig. 1 Geographic location and simplified tectonic map of the Qaidam basin and its surrounding area (modified after reference[17])

研究区北至宗务隆山,南以东昆仑断裂为界与昆仑山相接,东至鄂拉山,西以锡铁山、绿梁逆冲带为界(图1)。新生代地层包括中-上始新统下干柴沟组(49~32 Ma),渐新统上干

柴沟组(32~24 Ma),下-中新统下油砂山组(24~13 Ma),上中新统上油砂山组(13~7 Ma),上新统狮子沟组(7~2 Ma),下更新统七个泉组(2~0.7 Ma),以及中-上更新统和全新

统(0.7~0 Ma)<sup>[18]</sup>。柴达木盆地在新生代的沉积中心最早位于盆地的西部, 逐渐向东和南迁移, 因此在柴东地区缺失下始新世路乐河组地层。

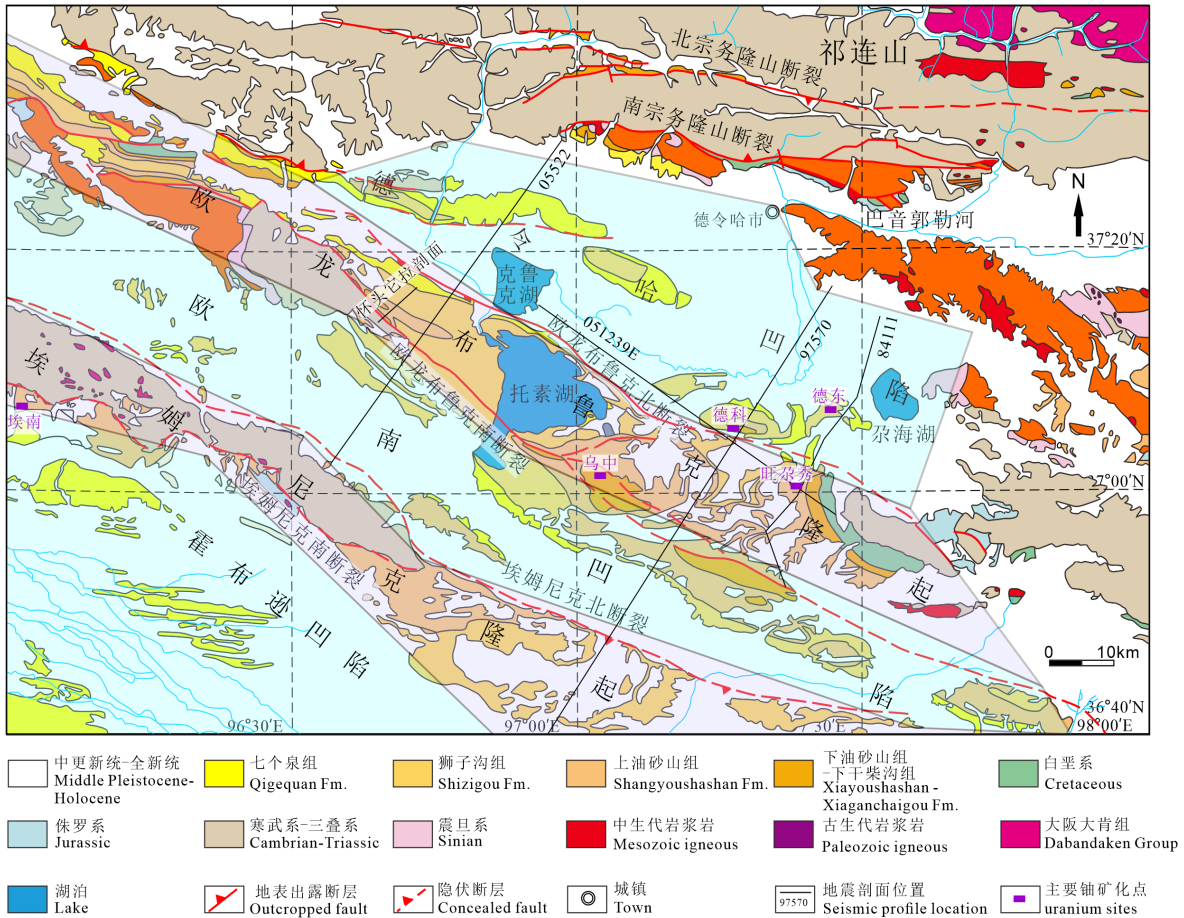


图 2 柴达木盆地东部地质和构造分区图(据参考文献[18]修改)

Fig. 2 Geological and tectonic division map of eastern Qaidam basin(modified after reference[18])

柴东地区北侧以宗务隆山断裂为界与祁连山相接, 区内主要发育欧龙布鲁克南断裂及其分支欧龙布鲁克北断裂(以下简称欧南和欧北断裂)、埃姆尼克南断裂及其分支埃姆尼克北断裂(以下简称埃南和埃北断裂)。以这些断裂为界, 柴东地区表现为明显的隆起-凹陷相间的构造格局, 自北向南划分为德令哈凹陷、欧龙布鲁克隆起、欧南凹陷、埃姆尼克山隆起以及霍布逊凹陷 5 个构造单元(图 2)。其中德令哈凹陷最大宽度只有 40 km, 但是其新生界沉积岩厚度最大超过 5 km。欧南断裂和欧北断裂西段位于祁连山山前, 东段延伸至盆地内部, 走向 NW, 延伸长度分别约为 170 和 140 km。埃南断裂和埃北断裂属于盆内逆冲断裂, 走向 NW, 延伸长度分别约为 300 和 200 km。柴东地区逆冲断裂具

有明显的走滑分量, 表现为压扭性断裂<sup>[19]</sup>。

### 3 柴东地区新生代构造演化过程分析

柴东地区构造发育情况复杂、变形较为强烈。穿过整个柴东地区的一条地震剖面(测线 97570)解译结果显示(图 3), 柴东地区新生代构造格局主要由欧南、欧北、埃南和埃北逆冲断裂的活动控制, 表明柴东地区在新生代整体处于挤压的构造环境。这些逆冲断裂向下延伸至基底岩石中, 且多发育分支断裂, 向上大多切入第四系中。尤其是在德令哈凹陷, 地表出露断裂较少, 但地震剖面结果显示凹陷内发育多条逆冲断裂, 反应了第四纪强烈的挤压变形作用。

这四条控盆断裂的构造样式、活动时间均存在较大争议。杜忠明等<sup>[20]</sup>认为欧南断

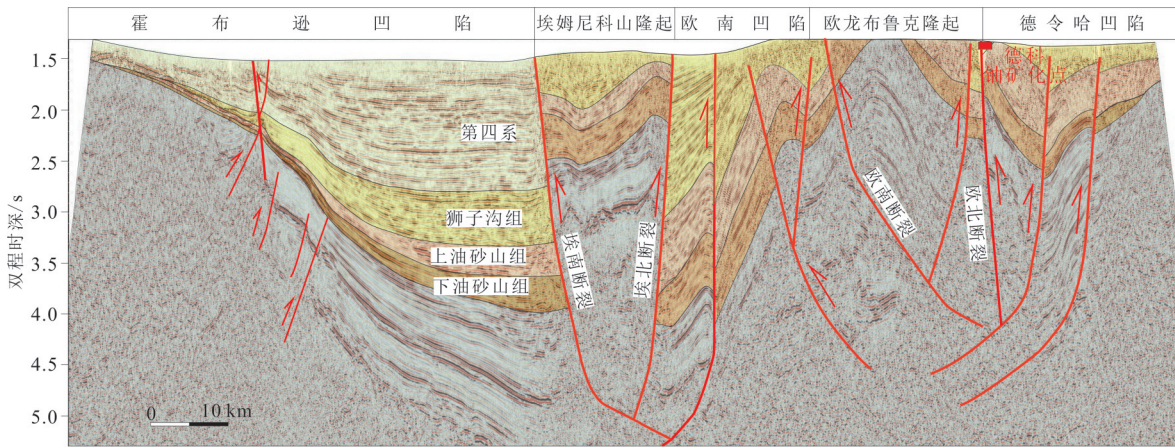


图 3 97570地震剖面解译结果(剖面位置见图 2)

Fig. 3 Geologic interpretation of seismic profile 97570(refer to Fig. 2)

裂和埃南断裂分别属于欧北断裂和埃北断裂的反冲断裂,因此夹持于断裂间的欧龙布鲁克隆起和埃姆尼克山隆起属于典型的冲起构造;Yu等<sup>[18]</sup>则是认为欧南与欧北断裂、埃南与埃北断裂均向为SW倾伏的NE向逆冲断裂。不同位置的地震剖面解译结果表明,在德科地区欧南断裂具有向南逆冲特征,而其分支断裂则是向北逆冲,使得其上盘欧南凹陷内部发育一系列牵引褶皱(图3)。而在德

科地区以东旺尔秀地区(图4,84111测线)和以西怀头他拉地区(图5,05522测线),欧南断裂则表现为与欧北断裂相似的向北逆冲的特征。尤其是在怀头他拉地区,欧南断裂北向逆冲导致了其南侧上盘基底岩石出露地表(图5)。因此,研究认为欧南断裂和欧北断裂相似,主体向北逆冲,但沿走向产状具有一定变化。而埃南断裂则具有典型上盘向南逆冲的特征(图3)。

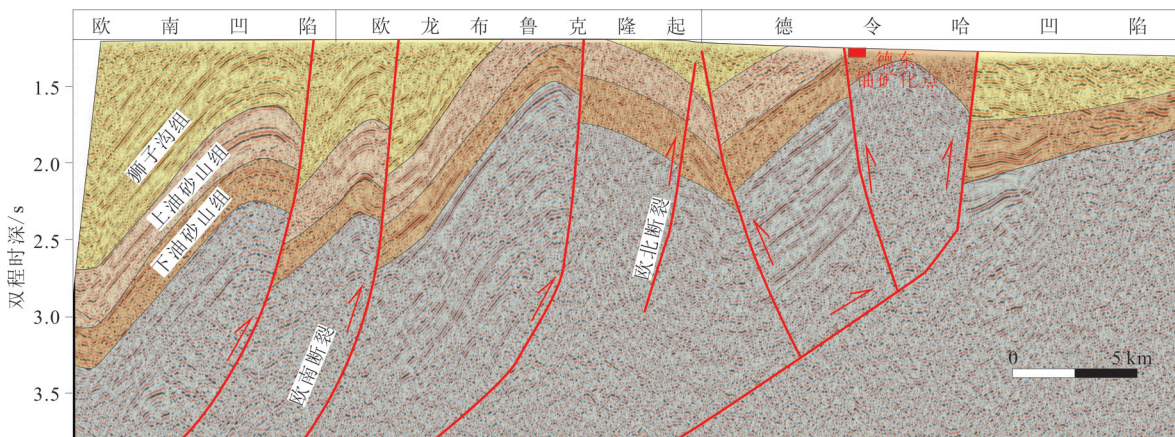


图 4 84111地震剖面解译结果(剖面位置见图 2)

Fig. 4 Geologic interpretation of seismic profile 84111(refer to Fig.2)

断裂活动时间方面,需要指出的是,柴东地区主要断裂最早于燕山晚期开始活动,新生代的活属于断裂的再活化<sup>[19]</sup>。Yu等<sup>[18]</sup>通过地震剖面解译发现欧南断裂南侧生长地层开始于干柴沟组沉积时期,因此认为欧南断裂和埃南断裂在始新世晚期就开始活动,隆起-凹陷相间的格局

初步形成。而狮子沟组和七个泉组卷入褶皱表明欧北断裂在第四纪发生强烈逆冲活动。杜忠明<sup>[21]</sup>根据生长地层的发育认为欧北和埃北断裂在下油砂山组沉积时期才开始活动。而欧南和埃南断裂则是作为反冲断裂在第四纪开始活动。此外,对柴东地区不同新生代地层剖面进行了详

细物源分析, 结果表明: 柴东盆地不同构造单元下油砂山组物源均来自宗务隆山; 上油砂山组德令哈凹陷物源来自宗务隆山和欧龙布鲁克山, 欧南凹陷和霍布逊凹陷北部物源来自埃姆尼克山; 七个泉组沉积期, 宗务隆山、欧龙布鲁克山、埃姆尼克山及鄂拉山皆为柴东盆地提供沉积物。

易定红等<sup>[22]</sup>对三湖地区第四系物源的研究结果也表明埃南地区七个泉组物源主要为锡铁山—埃姆尼克山。物源的变化表明欧龙布鲁克山和埃姆尼克山在上油砂山组沉积时期已经发生显著隆升, 第四系沉积初期已具备和现今相当的隆起程度。

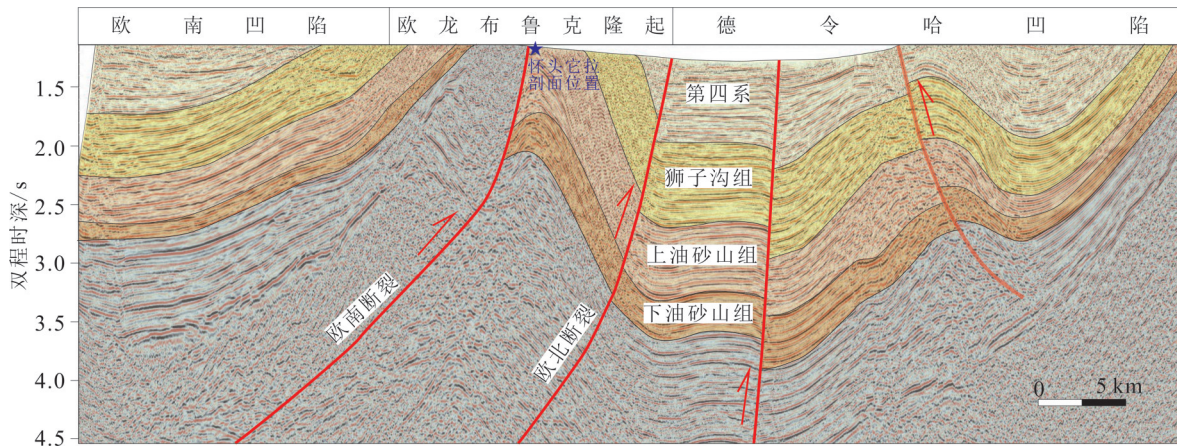


图 5 05522 地震剖面解释结果(剖面位置见图 2)  
Fig. 5 Geologic interpretation of seismic profile 05522(refer to Fig. 2)

王冰等<sup>[23]</sup>对柴东地区开展了古应力场方向的研究, 指出柴东地区自古近纪起受印度板块和欧亚板块碰撞的影响而处于断陷-拗陷阶段, 此时以 SN 向挤压为主, 在 NW—SE 向分力作用下也发生一定规模的右旋走滑; 而新近纪—第四纪, 柴东地区 SN 向挤压应力达到最强, 地层发生强烈变形改造。地震剖面同样显示主要断裂均延申至第四纪地层中。

结合低温年代学数据、古应力场方向、物源和生长地层特征, 重新梳理了柴达木盆地东部新生代构造演化历史(图 6), 认为干柴沟组生长地层的形成反映了欧南和埃南断裂初始活动的时间, 但此时断裂活动并未造成显著的隆起。这可能和断裂活动强度、断裂逆冲倾角等因素有关。而到了上油砂组沉积时期, 欧南和埃南断裂才发生显著逆冲, 导致了欧龙布鲁克山隆起和埃姆尼克山隆起的形成, 同时也改变了研究区物源和古水流方向。怀头他拉地区磷灰石裂变径迹年龄结果表明<sup>[24]</sup>, 在 12 Ma(上油砂山组沉积初期)发生一次重大构造事件使得祁连山南侧剥蚀源区(包括欧龙布鲁克山断裂在内的柴北缘逆冲

断裂带)发生变化或者使祁连山发生快速蚀顶作用。认为, 其可能是由欧南断裂的显著逆冲活动引起的。祁连山的快速剥蚀为柴东地区上油砂山组提供了丰富物源。到了第四纪, 柴东地区构造活动显著增强, 在 SN 向强烈挤压的作用下, 欧北断裂和埃北断裂发生强烈活动, 欧龙布鲁克山隆起和埃姆尼克山持续隆升, 隆起-凹陷之间的地形差进一步增大, 形成了现今的地质地貌特征。磷灰石裂变径迹年龄结果显示<sup>[24]</sup>, 在 2.1 Ma(七个泉组初始沉积)时祁连山南侧剥蚀源区再次发生变化, 变形隆升发展至盆地北缘。祁连山强烈剥蚀再次为盆地提供了丰富的物源。欧北断裂的活动在德令哈凹陷内形成一系列次级褶皱, 例如德科地区背斜和德东地区背斜。柴东地区新生代构造演化主要由盆内欧龙布鲁克断裂系统和埃姆尼克断裂系统控制, 而非祁连山山前的宗务隆山断裂系统控制。结合盆地内新生代沉积中心的分布和演化, 支持新生代柴达木盆地为一大型向斜盆地的认识, 前陆盆地模型和背驮式盆地模型都不能很好的解释柴东地区新生代构造演化特征。

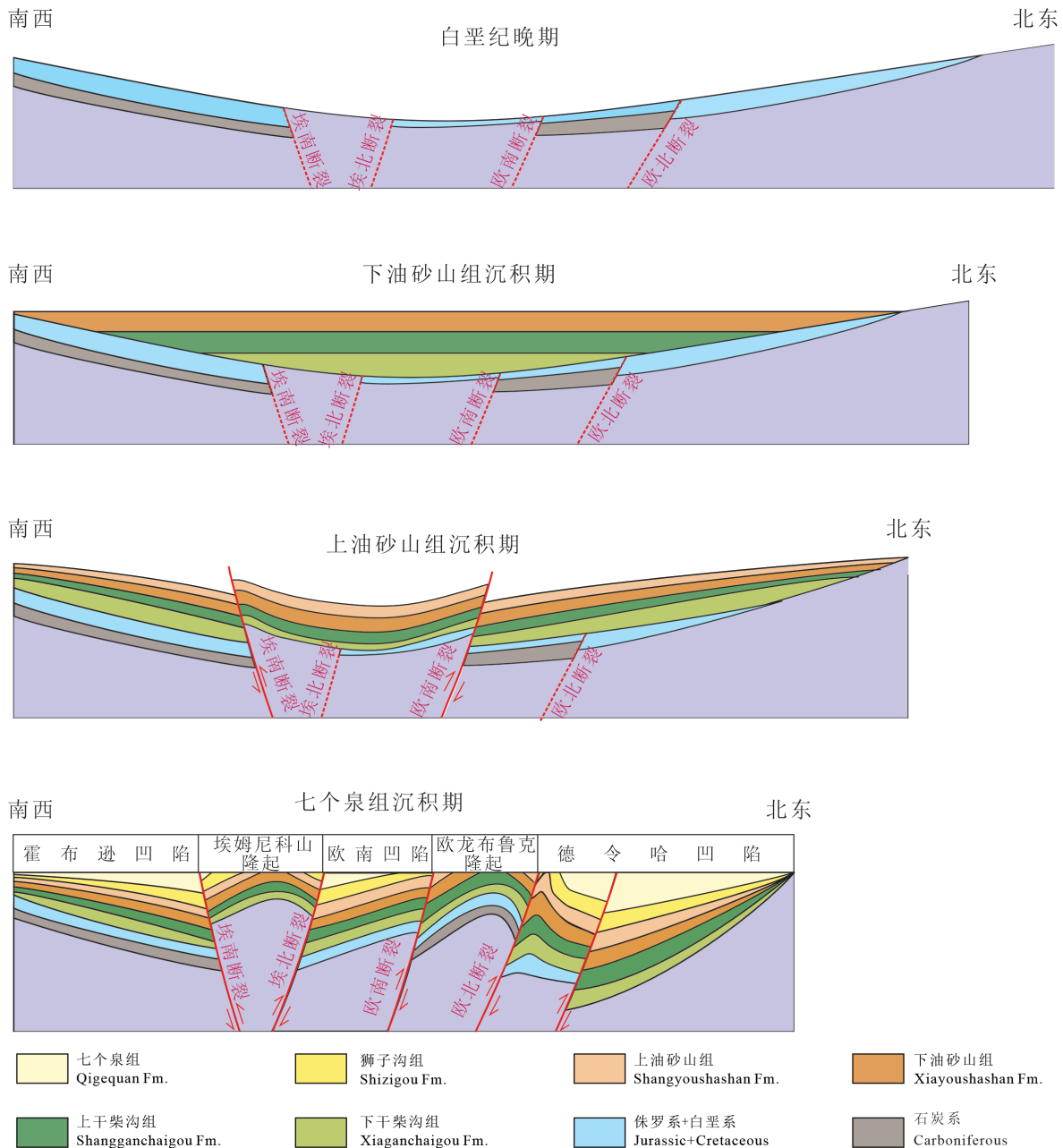


图6 柴东盆地新生代构造演化模型

Fig. 6 Model for Cenozoic tectonic evolution of the eastern Qaidam basin

#### 4 典型铀矿化点特征

目前柴东地区地表和钻孔发现的铀矿化点主要分布在德令哈凹陷南缘的德科和德东地区、欧龙布鲁克隆起北缘的旺尕秀和乌中地区。此外,在埃姆尼克山南缘也存在地表铀矿化现象。柴东地区新生界含矿层位主要为上油砂山组黄色、灰绿色砂岩,次要含矿层位为狮子沟组黄色砂岩。以德科、德东旺尕秀和埃南地区典型铀矿化点为例,剖析铀矿

化特征与构造环境。此外,以怀头它拉剖面为例,横向对比同一构造带不同位置的铀矿化特征差异。

##### 4.1 德科地区

德科地区位于德令哈凹陷最南缘,发育背斜构造,背斜特征在卫星图像、地表产状以及地震剖面中均有较好显示。背斜枢纽NNW-SEE向,北翼产状较缓,平均倾角介于 $15^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 之间,南翼倾角稍陡,最高可达 $30^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 。地震剖面解译结果显示该背斜可

能为欧北断裂及其分支断裂逆冲形成的牵引褶皱(图 3)。此外,卫星图像清晰地显示褶皱北翼发育一系列走滑断裂,以南北走向的

右行走滑为主(图 7),这表明德令哈凹陷在新生代经历了强烈的构造活动改造。背斜南翼则是经历强烈剥蚀作用。

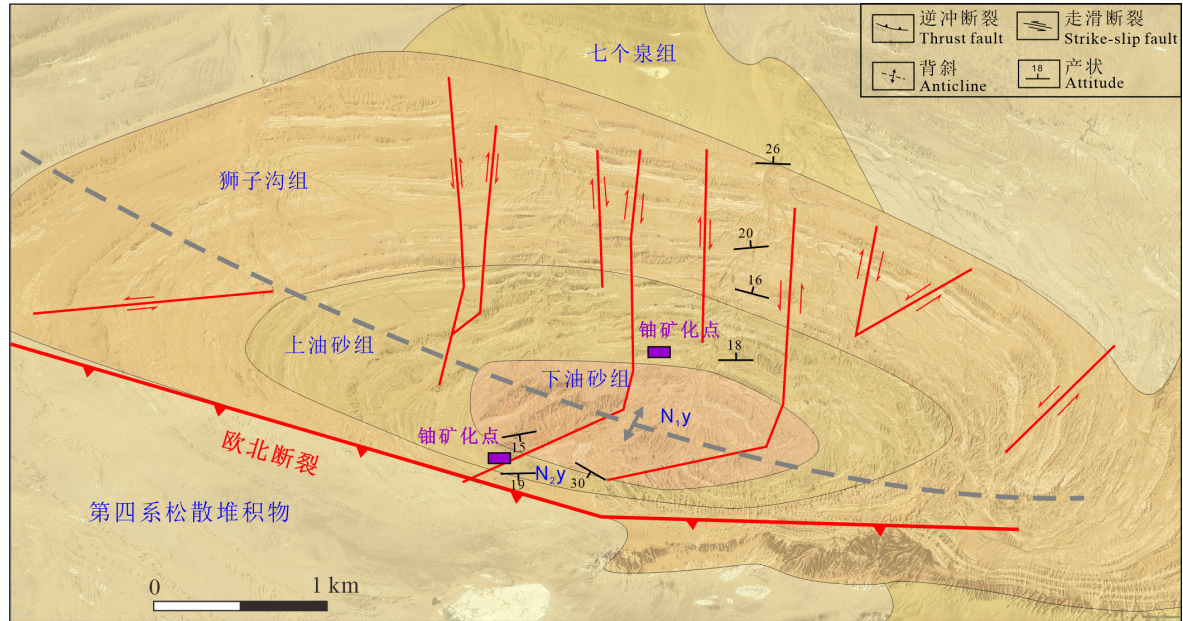


图 7 德科地区卫星影像解译结果  
Fig. 7 Geological interpretation of satellite image in Deke area

德科背斜主要出露地层包括下-中中新统下油砂山组、上中新统上油砂山组、上新统狮子沟组及更新统七个泉组。背斜南翼和北翼上油砂山组黄色、黄绿色及褐红色砂岩中发现铀矿化,见大量的黄绿色次生铀矿物(图 8a、b)。能谱结果显示 U 含量最高可达  $2\ 003.98 \times 10^{-6}$ <sup>[25]</sup>;而下油砂山组、上新统狮子沟组及七个泉组地层并未见明显的 U 异常。

#### 4.2 德东地区

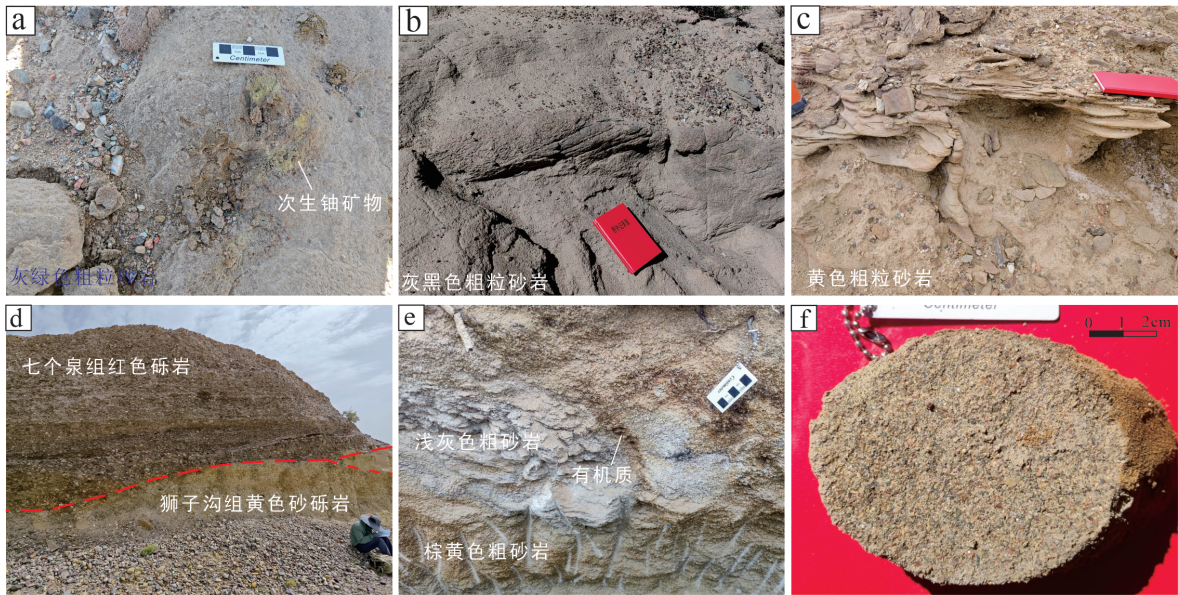
野外地质调查结果显示:德东地区同样发育背斜构造,褶皱枢纽 NNE-SSW 走向。背斜南翼产状较缓,倾角介于  $15^{\circ} \sim 25^{\circ}$  之间,北翼倾角较陡,倾角介于  $40^{\circ} \sim 50^{\circ}$  之间(图 9)。地震剖面解译结果显示,该背斜南翼被一逆冲断裂切割,而这一逆冲断裂与欧北逆冲断裂在地壳深部相连,表明其可能是欧北断裂的分支(图 4)。德东背斜主要出露狮子沟组和第四系七个泉组。铀矿化层位为南翼狮子沟组,含矿地层岩性为棕黄色粗砂岩、黄色含砾粗砂岩,钙质胶结(图 8),放射性含量一般大于  $60 \times 10^{-6}$ ,最高超过  $140 \times 10^{-6}$ (图 9)。

#### 4.3 旺尕秀地区

穿过旺尕秀地区的 EW 向地震剖面解译结果显示该地区为向西南倾的单斜地层(图 10)。该地区发育深大逆冲断裂,且逆冲断裂与欧北断裂系在底部相连。主要出露主地层为下白垩统犬牙沟组、始新统下干柴沟组及中新统上油砂山组,地层产状较缓,一般介于  $25^{\circ} \sim 12^{\circ}$  之间。其中上油砂山组中发现放射性矿化,矿化岩性为棕黄色、褐黄色和浅灰色粗砂岩(图 8e、f)。能谱路线测量结果显示,最高铀含量可达  $611 \times 10^{-6}$ 。

#### 4.4 埃南地区

埃南地区位于埃姆尼克山南缘,埃南断裂附近。野外观测结果显示该地区发育一向斜构造(图 11),主要出露上油砂山组,狮子沟组和七个泉组地层。上油砂山组主要发育一套黄色细砂岩夹黄褐色泥岩,偶见灰绿色细砂岩。狮子沟组主要发育黄色细砂岩夹粉砂岩,组内岩层发育多组次级逆冲断裂,判断其可能为埃南断裂的分支(图 11)。七个泉组发育灰色砾岩偶夹粗砂岩。该地区地层铀含量较低,大部分介于  $2 \sim 4\ \text{nC/kg} \cdot \text{h}$  之间。有两处稍高的



a—德科铀矿点上油砂山组灰绿色粗砂岩，见黄色次生铀矿物；b—德科铀矿点上油砂山组灰色粗粒砂岩；c—德东铀矿点狮子沟组黄色钙质粗粒砂岩；d—德东铀矿点狮子沟组与七个泉组角度不整合接触界限；e—旺尔秀铀矿点上油砂山组含矿浅灰色和棕黄色粗砂岩，含有有机质团块；f—旺尔秀铀矿点上油砂山组含矿黄色粗砂岩。

a—Greyish-green coarse sandstone of Shangyoushashan formation at the Deke uranium mineralized site, with yellow oxidized uranium minerals outcropped; b—Grey coarse sandstone of Shangyoushashan formation at the Deke uranium mineralized site; c—Yellow calcareous coarse sandstone of Shizigou formation at the Dedong uranium mineralized site; d—Unconformable contact between Shizigou formation and Qigequan formation at the Dedong uranium mineralized site; e—Light grey and pale brown uranium-bearing coarse sandstone of Shangyoushashan formation at the Wanggaxiu uranium mineralized site, with blocks of organic matter embedded; f—Yellow uranium-bearing coarse sandstone of Shangyoushashan formation at the Wanggaxiu uranium mineralized site.

图 8 德科、德东和旺尔秀地区含矿层岩性特征

Fig. 8 Lithologic characteristics of ore-bearing strata in the Deke, Dedong and Wanggaxiu uranium mineralized sites

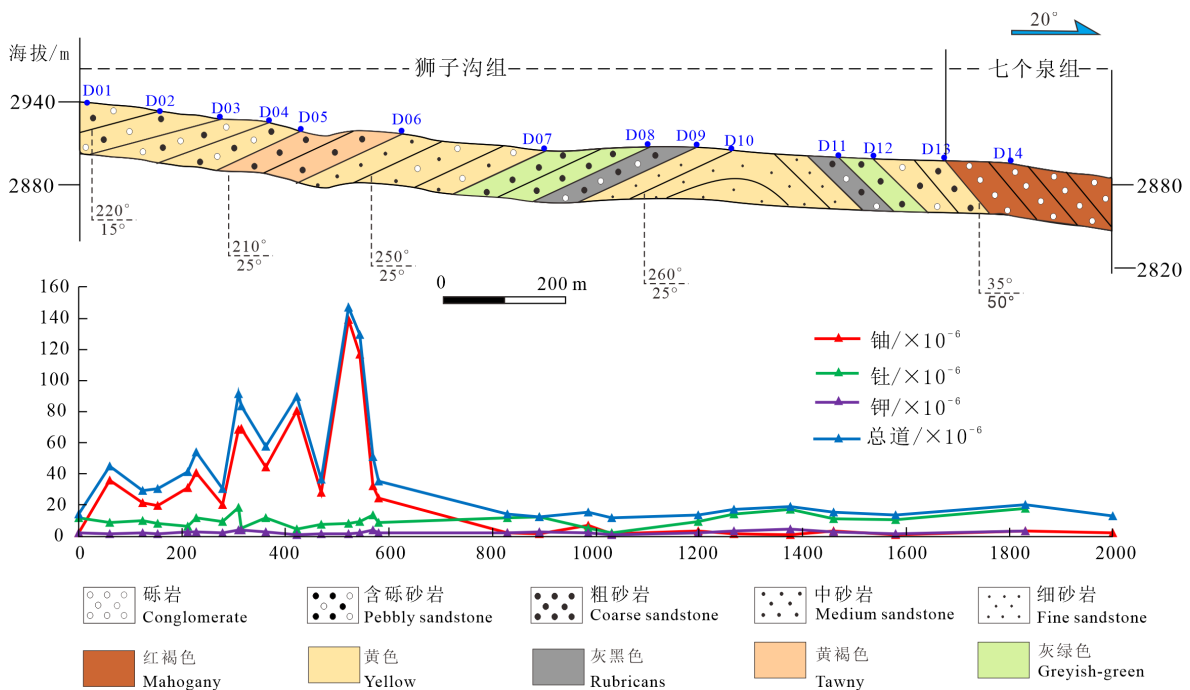


图 9 德东铀矿化点地质剖面及地面能谱结果测量

Fig. 9 Geological section and ground energetic spectrum profile of Dedong uranium mineralization area

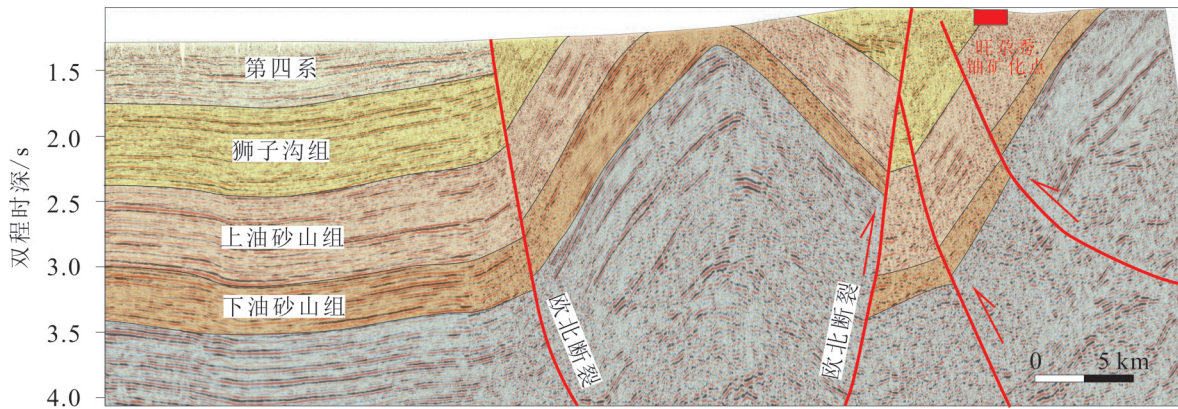


图 10 051239E 地震剖面解译结果(剖面位置见图 2)

Fig. 10 Geologic interpretation of seismic profile 051239E(refer to Fig. 2)

铀异常点。一处位于靠近向斜核部的上油砂山组中,该位置发育灰绿色细砂岩夹红褐色泥岩,其中泥岩层宽约 50 cm,大量发育破裂和微破裂且不均匀分布有黑色还原性物质(图 11)。

细砂岩中铀含量较低,为 3.34 nC/kg·h,而所夹的泥岩层铀含量较高,为 4.55 nC/kg·h。另一处铀异常点位于向斜核部狮子沟组,为黄色细砂岩,最高可达 8.84 nC/kg·h(图 11)。

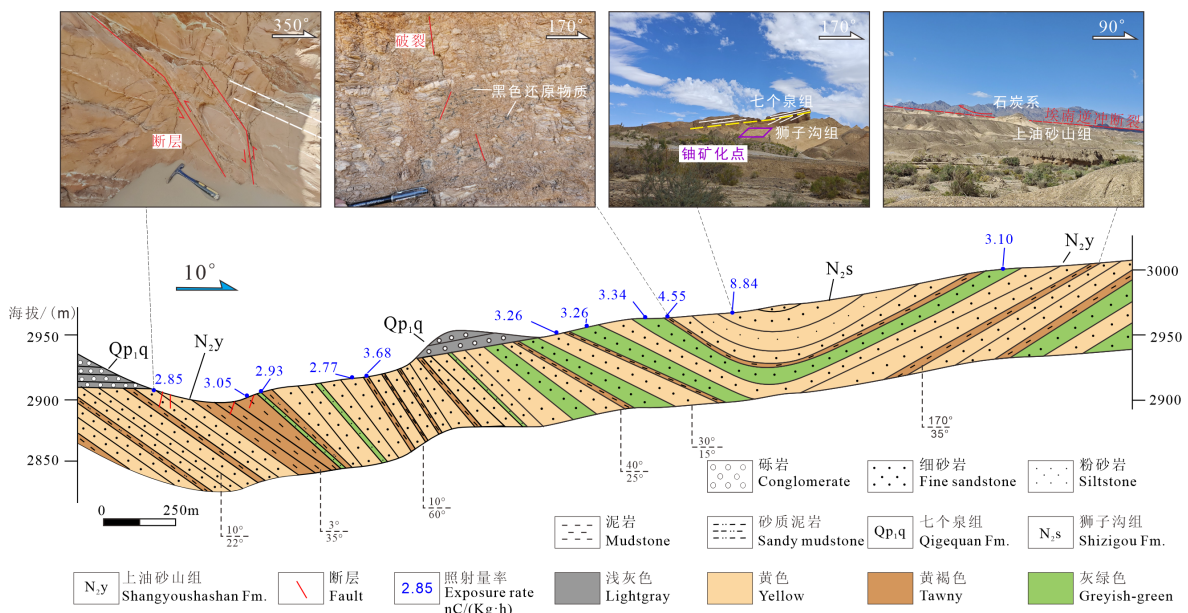


图 11 埃南铀矿化点地质剖面与典型野外特征

Fig. 11 Geological section of Ainan uranium mineralization area with typical field photos

#### 4.5 怀头它拉地区

该剖面位于怀头他拉镇以南约 5 km 处,是盆地东部的代表性剖面(图 12)。剖面主体表现为一背斜构造,地震剖面解译结果显示该背斜是由欧南断裂向北逆冲所导致的(图 5)。剖面地表长约 7 km,出露较完整的新生代地层。下干柴沟组-下油砂山组沿背斜的核部出露,厚度约 100 m,主要由砖红色粗砂岩、砾岩组成。上油砂山组与下伏下油砂山组整合接触,厚度约 1 500 m,主要由灰绿色砂岩、夹黄褐色

泥岩、灰绿色泥岩组成。露头可见上油砂山组地层发生褶皱弯曲并与七个泉组砾岩不整合接触(图 12)。狮子沟组厚约 1 500 m,主要由厚层-巨厚层灰绿色砂岩夹灰绿色、土黄色泥岩与泥质粉砂岩组成。七个泉组厚约 500 m,岩性以灰色、灰黑色厚层砾岩为主,局部夹薄层灰色粉砂岩和泥岩透镜体。该地区新生代地层中铀含量较低,平均为 2~4 nC/kg·h,只有在个别黄褐色泥岩层中稍高,最高约为 6 nC/kg·h。

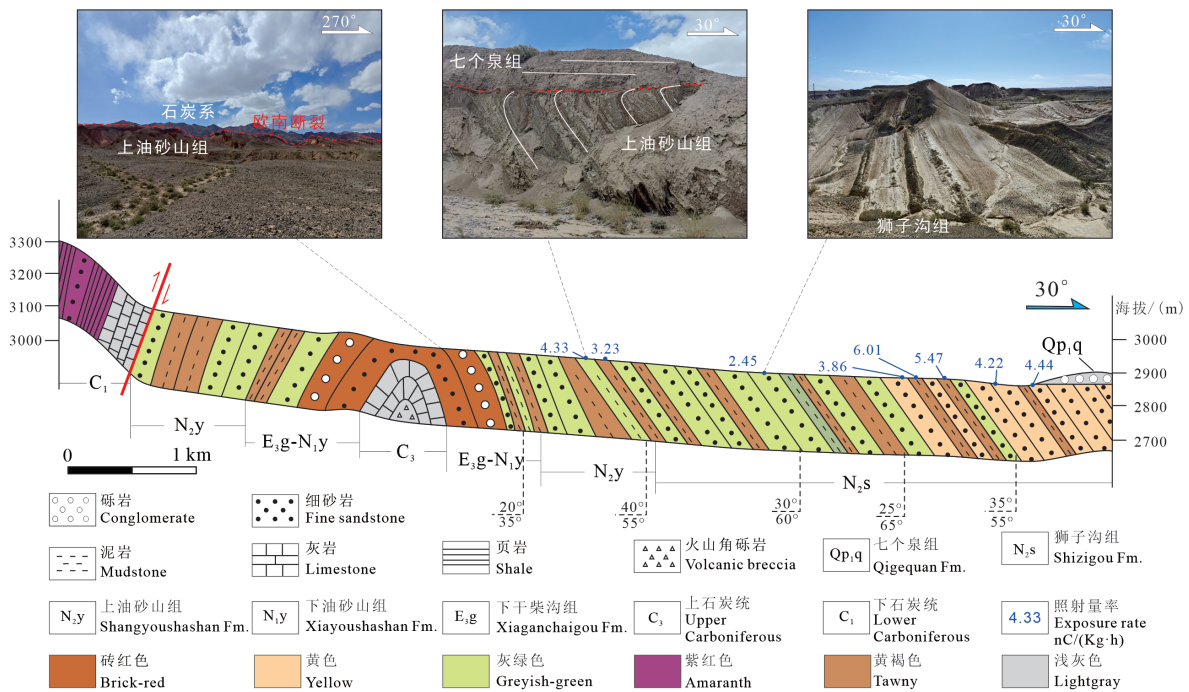


图 12 怀头他拉地区地质剖面与典型野外特征

Fig. 12 Geological section of of Huaitoutala area with typical field photos

## 5 柴东地区新生代构造演化与铀成矿作用关系探讨

### 5.1 铀矿化点分布与构造发育的时空关系

柴东地区具有隆起-凹陷相间的构造格局,欧南、欧北、埃南和埃北 4 条主要逆冲断裂构成了隆起-凹陷的边界。空间上,目前柴东地区发现的铀矿化点大多分布在这些逆冲断裂形成的断隆带附近。例如,德科、德东和旺尕秀铀矿化点位于欧北断裂附近,地层受欧北断裂及其次级断裂逆冲控制形成牵引背斜。此外,即使发育背斜构造,铀矿化发育的地层产状通常平缓-中等,倾角不超过  $45^\circ$  且主要在  $30^\circ$  以内。例如,德科地区含铀上油砂山组倾角一般小于  $30^\circ$ ,旺尕秀地区地层倾角小于  $20^\circ$ 。而地层陡倾(倾角大于  $50^\circ$ )的怀头它拉断背斜即使发育较好的砂体,却无较高铀异常(不排除未来有所发现,仅基于目前认识)。这说明盆地内部中等强度构造活动形成的宽缓背斜更有利于铀成矿作用的发生。时间上,尽管目前缺乏对柴东地区铀成矿作用的年代约束,上油砂山组和狮子沟组作为主要含矿地层表明铀成矿作用最早发生在上油砂山组沉积期,最晚可以到狮子沟组

沉积之后甚至到第四纪。而欧南和埃南断裂于上油砂山组沉积期显著逆冲,欧北和埃北断裂在狮子沟组沉积末期到第四纪开始活动。这表明铀成矿作用与盆地主要断裂活动在时间上也有很好的对应关系。铀成矿作用与断裂空间和时间上的相关性表明,盆内断裂和隆起的发育对柴东地区铀成矿作用具有一级控制作用,其中欧北断裂及其次级断裂可能为主要控矿断裂。

### 5.2 构造在柴东地区铀矿化过程中的作用

铀成矿作用与盆内断裂-隆起带的密切空间关系在许多大型含铀盆地均有发现,并得到了广泛关注<sup>[26-29]</sup>。例如,松辽盆地钱家店、海力锦和宝龙山等大-中型铀矿床均产于盆内断裂控制的隆起翼部;二连盆地哈达图和巴彦乌拉铀矿床同样分布在断裂附近局部隆起部位,基底具有隆起相间的构造格局<sup>[2]</sup>。聂逢君等<sup>[27]</sup>系统总结了隆起对砂岩型铀矿化过程的控制作用,主要包括控制地下水补-径-排体系(形成构造天窗)、控制层间氧化作用和沉积相带的发育、伴生断裂提供深部还原性物质等。就柴东地区而言,构造对铀成矿作用的控制作用主要体现在以下几个方面:

### 5.2.1 断裂系统的发育不利于盆内氧化-还原铀成矿作用

传统的层间氧化成矿理论认为,来自蚀源区的富铀富氧地下水向盆内运移过程中氧化地层中的铀,铀最终在氧化-还原过渡带还原富集。该理论预测位于构造斜坡的氧化还原带为最有利成矿部位<sup>[30]</sup>。如前文所述,柴东地区铀矿化点位于盆地内部,且主要由断裂和局部隆起控制。盆内主要断裂最早于燕山晚期开始活动,新生代的活动属于断裂的再活化。李艳青<sup>[31]</sup>指出,鄂尔多斯盆地北部河套裂陷的形成(约56 Ma)切断了北部和西北部蚀源区向铀矿区的物源供应。类似的,柴东盆地内发育的断裂会形成地下水的局部排泄区,阻碍盆缘蚀源区的铀源向盆内运移,不利于盆内新生代层间氧化铀成矿作用的发生。此外,铀成矿作用主要发生在上中新统上油砂山组和新统狮子沟组,且随着沉积后强烈挤压抬升,其上很难有沉积物形成构造天窗为其提供铀源。

地表铀矿化点和钻孔矿化段岩心显示含矿砂岩包括红杂色、黄色中粗砂岩以及灰绿色钙质细砂岩,层间氧化作用很难解释红杂色砂体成矿的现象。野外不同颜色砂体边界形态特征表明灰色和红杂色砂岩更可能是不同程度还原蚀变的结果。扫描电镜结果显示铀矿物常存在于有机质内部,表明有机质还原作用与铀成矿具有密切的内在成因联系<sup>[25]</sup>。

### 5.2.2 断裂系统为盆地深部还原性物质和铀源向上运移提供有效通道

研究表明,柴东地区石炭系发育厚层烃源岩,分布较广且富含有机质,具有巨大的油气资源潜力<sup>[32]</sup>。尤其在旺尕秀地区,露头处可见含油气荧光显示的样品,有明显油浸现象<sup>[33]</sup>。烃源岩除了富含有机质之外,往往也具有较高的铀含量。油田资料显示,德令哈凹陷内厚约200 m的石炭系暗色泥岩烃源岩中铀含量可达 $30 \times 10^{-6} \sim 50 \times 10^{-6}$ <sup>[25]</sup>之间,这些富铀烃源岩很可能为柴东地区铀矿化提供丰富还原性物质和铀源。

相比于柴达木盆地西南地区,盆地东部石

炭系烃源岩的生烃时代研究相对较为薄弱。王利等<sup>[34]</sup>提出,德令哈坳陷石炭系烃源岩具有“二次生烃,晚期生烃为主”的特点。第一次生烃发生在早二叠世,海西运动后生烃停止。第二次大规模生烃发生在古新世—上新世期间。马立成等<sup>[35]</sup>通过详细的构造分期工作揭示了柴东尕海南山地区晚新生代早期NW—NWW向褶皱被晚期NNE—SSW向褶皱叠加的现象,并认为晚期构造作用激活了早期NW—NWW向断裂,并导致油气向上运移至上干柴沟组形成次级含油气层。构造演化分析结果表明,NW—NWW向褶皱和断裂最早发育于上中新统上油砂山组沉积期,据此,导致生烃和油气运移的NNE—SSW向构造应在这一时期之后。因此,柴东地区石炭系烃源岩新生代生烃过程可能与铀成矿作用具有时间上的关联性。而在油气向上运移的过程中,断裂构造为深部富铀富有机质还原流体向浅部运移提供了有效的通道。因此,本文认为柴东盆地内部铀矿化以渗出铀成矿作用为主导<sup>[3]</sup>,铀源更多来自深部石炭系烃源岩。

### 5.2.3 构造活动为富铀流体运移提供驱动力

断裂为深部含铀流体向上运移提供通道已经得到了普遍认同。然而,这只是断裂发挥的被动作用。事实上,铀成矿作用强度以及形成的矿床规模大小主要取决于富铀流体运移的流量,而这一流量主要依赖3个参数:流体动力强度、岩石渗透率和流体持续时间<sup>[36]</sup>。断裂作为流体运移的通道正是因为其在一定意义上提高了岩石的渗透率。而根据达西定律,流体流速不仅和介质渗透率有关,还同样取决于驱动力的大小<sup>[37]</sup>。流体的驱动力也被叫做水力势能,在近地表静水压力下,其由重力和地势所决定,例如盆地地表水和地下水的运移。而深部流体向上运移的驱动力主要是流体超压和欠压所决定的。古应力分析结果显示,柴东地区自新近纪开始遭受强烈SN向挤压作用,挤压作用导致岩石渗透率的降低,从而引起孔隙流体压力的增加,即流体超压。流体超压会驱动深部流体向上运移。当盆内断裂发生逆冲时,会产生显著的压力降,压力降使得断裂和围岩之间形成水力势能梯度,进一步导致深

部富铀富有机质还原流体涌入断裂并向上运移。因此,区域性的挤压和逆冲断裂活动通过改变流体压力状态为深部富铀流体向上运移提供了必要的驱动力。

#### 5.2.4 盆地构造活动控制铀沉淀空间位置

深部流体中的铀在何处沉淀直接决定了铀矿化的空间分布位置,也是铀矿勘查最关注的问题。成矿深度方面,柴东地区铀矿化点位于地表或近地表,即使考虑到后期一定的挤压抬升,成矿时仍位于盆地浅层。Chi and Xue<sup>[38]</sup>通过数值模拟研究发现,铀矿化深度主要取决于盆地的流体动力状态。如果一个盆地由于快速沉积、大量低渗透沉积物或烃类的生成而处于强烈的超压状态,成矿作用往往发生在盆地浅层。如前文所述,柴东地区新近纪以来的强烈SN向挤压会导致岩石渗透率的整体降低,此外,石炭系烃源岩中新世以来可能发生大规模生烃过程。这两方面因素共同导致了柴东地区强烈的超压状态,进而使得铀成矿作用发生在浅部。成矿部位方面,柴东地区铀矿化特征表明,断裂附近的背斜翼部为成矿提供了空间,是成矿的有利构造部位。而宽缓的背斜则更有利于富铀流体的侧向迁移和沉淀,更可能形成大规模铀矿。需要指出的是,铀矿化并不是主要分布在欧南和埃南一级逆冲断裂,相反,欧北断裂及其次级断裂为主要控矿断裂。这可能是因为主断裂会快速被流体沉淀所愈合,不利于流体的迁移,而次级断裂会在断裂活动后维持长时间的高渗透性,更有利于流体的迁移<sup>[39]</sup>。

#### 5.3 对柴东地区铀矿勘探的启示意义

基于柴东地区构造演化过程和现阶段铀矿化特征,研究认为柴东地区盆内新生代铀矿化主要以渗出型铀成矿作用为主。在以后的铀矿勘查过程中,一方面应结合野外和地震剖面资料,加强对断裂、褶皱等构造的精细刻画,查明柴东地区构造发育时间、分布特征和演化规律。重点对断裂附近宽缓背斜部位开展铀矿勘探和查证工作;另一方面应关注烃源岩的空间分布、铀含量特征以及生烃过程。精细厘定构造-生烃-铀成矿三者之间的时空关系,为深部铀源成矿提供更充足的证据。

## 6 结 论

本文在系统总结柴东地区物源、低温热年代学和古应力场方向资料的技术上,利用地表(野外)和近地表(地震剖面)资料对柴东地区新生代构造演化进行厘定。结合典型铀矿化点特征分析,探讨了柴东新生代构造演化对砂岩型铀矿成矿过程的控制作用,取得以下主要结论:

1)柴东地区新生代隆起-凹陷相间的构造样式主要受欧龙布鲁克山断裂系统和埃姆尼克山断裂系统控制。上油砂山组沉积时期,欧南和埃南逆冲断裂显著活动。第四纪七个泉组沉积初期,构造活动显著增强,欧北和埃北断裂强烈逆冲。

2)柴东地区铀矿化点主要分布在断裂附近的宽缓背斜翼部,主要含矿层位为上油砂山组和狮子沟组。欧龙布鲁克断裂系统,尤其是欧北断裂及其次级断裂,可能为主要控矿断裂。

3)柴东地区盆内以渗出型铀成矿作用为主,石炭系烃源岩可能为铀矿化提供丰富铀源。盆内断裂系统为深部富铀还原流体向上运移提供有效通道和驱动力,区域强烈挤压和生烃过程控制了铀矿化的空间位置。在以后的铀矿勘查工作中,应加强对柴东地区断裂、褶皱等构造的精细刻画,进一步明确构造发育对铀成矿过程的控制作用和机制,同时应关注石炭系烃源岩的空间分布和演化生烃过程,加强铀矿和油气资源的共同勘查研究。

#### 参考文献

- 1 贺锋,张字龙,武正乾,等.砂岩型铀矿“源-汇”系统[J].世界核地质科学,2024,41(3):419-433. HE Feng, ZHANG Zilong, WU Zhengqian, et al. Source-to-sink system of sandstone uranium mineralization [J]. World Nuclear Geoscience, 2024, 41(3):419-433 (in Chinese).
- 2 李子颖,刘武生,李伟涛,等.内蒙古二连盆地哈达图砂岩铀矿渗出铀矿化作用[J].中国地质,2022,49(4):1009-1047. LI Ziyang, LIU Wusheng, LI Weitao, et al. Exudative metallogeny of the Hadatu sandstone-type uranium deposit in the Erlian basin, Inner Mongolia [J]. Geology

- in China, 2022, 49(4):1009-1047(in Chinese).
- 3 李子颖,秦明宽,郭庆银,等. 渗出砂岩型铀矿成矿预测与找矿标志[J]. 铀矿地质, 2024, 40(1): 1-15.  
LI Ziyang, QIN Mingkuan, GUO Qingyin, et al. Metallogenic prediction and exploration indication of exudative sandstone-type uranium deposit [J]. Uranium Geology, 2024, 40(1): 1-15(in Chinese).
  - 4 刘武生,李子颖,刘持恒,等. 二连盆地赛汉高毕铀矿床渗出成矿作用和模式[J]. 铀矿地质, 2024, 40(1): 129-142.  
LIU Wusheng, LI Ziyang, LIU Chiheng, et al. Exudative metallogeny and model of Saihan Gaobi sandstone-type uranium deposit in Erlian basin [J]. Uranium Geology, 2024, 40(1): 129-142(in Chinese).
  - 5 秦明宽,李子颖,蔡煜琦,等. 对加强我国铀资源勘查“三新”突破的战略性思考[J]. 世界核地质科学, 2022, 39(3): 383-398.  
QIN Mingkuan, LI Ziyang, CAI Yuqi, et al. Strategic thinking on strengthening *Three New* breakthroughs for the uranium exploration in China [J]. World Nuclear Geoscience, 2022, 39(3): 383-398(in Chinese).
  - 6 张希梁,蔡煜琦,赵兴齐,等. 柴达木盆地西缘砂岩型铀矿成矿条件及找矿标志[J]. 铀矿地质, 2025, 41(1): 30-44.  
ZHANG Xiliang, CAI Yuqi, ZHAO Xingqi, et al. Metallogenic conditions and prospecting indications of sandstone-type uranium deposits in the western margin of Qaidam Basin [J]. Uranium Geology, 2025, 41(1): 29-43(in Chinese).
  - 7 陈擎,王继斌,陈斌,等. 柴达木盆地古-新近系砂岩型铀矿找矿新发现及其找矿意义[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2020, 43(4): 346-354.  
CHEN Qing, WANG Jibin, CHEN Bin, et al. New discovery and significance of Paleo-Neogene sandstone uranium ore prospecting in Qaidam basin [J]. Journal of East China University of Technology (Natural Science), 2020, 43(4): 346-354 (in Chinese).
  - 8 YIN A, DANG Y Q, WANG L C, et al. Cenozoic tectonic evolution of Qaidam Basin and its surrounding regions (Part 1): The southern Qilian Shan-Nan Shan thrust belt and northern Qaidam basin [J]. Geological Society of America Bulletin, 2008a, 120 (7/8): 813-846.
  - 9 YIN A, DANG Y Q, ZHANG M, et al. Cenozoic tectonic evolution of the Qaidam basin and its surrounding regions (Part 3): Structural geology, sedimentation, and regional tectonic reconstruction [J]. Geological Society of America Bulletin, 2008b, 120 (7/8): 847-876.
  - 10 CHENG F, JOLIVET M, HALLOT E, et al. Tectono-magmatic rejuvenation of the Qaidam craton, northern Tibet [J]. Gondwana Research, 2017, 49: 8-263.
  - 11 CHENG F, GARZIONE C, JOLIVET M, et al. Initial deformation of the northern Tibetan Plateau: insights from deposition of the Lulehe formation in the Qaidam basin [J]. Tectonics, 2019, 38: 741-766.
  - 12 吴婵,阎存凤,李海兵,等. 柴达木盆地西部新生代构造演化及其对青藏高原北部生长过程的制约 [J]. 岩石学报, 2013, 29(6): 2211-2222 (in Chinese).  
WU Chan, YAN Cunfeng, LI Haibing, et al. Cenozoic tectonic evolution of the western Qaidam basin and its constrain on the growth of the northern Tibetan Plateau [J]. Acta Petrological Sinica, 2013, 29(6): 2211-2222.
  - 13 JI J, ZHANG K, CLIFT P D, et al. High-resolution magnetostratigraphic study of the Paleogene-Neogene strata in the northern Qaidam basin: Implications for the growth of the Northeastern Tibetan Plateau [J]. Gondwana Research, 2017, 46: 141-155.
  - 14 WANG W, ZHENG W, ZHANG P, et al. Expansion of the Tibetan Plateau during the Neogene [J]. Nature Communications, 2017, 8: 15887.
  - 15 CHENG F, JOLIVET M, GUO Z, et al. Cenozoic evolution of the Qaidam basin and implications for the growth of the northern Tibetan plateau: A review [J]. Earth-Science Reviews, 2021, 220: 103730.
  - 16 王伟涛,张培震,段磊,等. 柴达木盆地新生代地层年代框架与沉积-构造演化 [J]. 科学通报, 2022, 67(28/29): 3452-3475.  
WANG Weitao, ZHANG Peizhen, DUAN Lei, et al. Cenozoic stratigraphic chronology and sedimentary-tectonic evolution of the Qaidam basin [J]. Chinese Science Bulletin, 2022, 67(28/29): 3452-3475 (in Chinese).
  - 17 LI B, WANG Y C, ZUZA A V et al. Cenozoic deformation in the eastern domain of the North Qaidam thrust belt, northern Tibetan Plateau [J]. Geological Society of America, Bulletin, 2023, 135(1/2): 331-350.
  - 18 YU X J, GUO Z J, ZHANG Q Q, et al. Denan Depression controlled by northeast-directed Olongbulak Thrust Zone in northeastern Qaidam basin: Implications for growth of northern Tibetan Plateau

- [J]. *Tectonophysics*, 2017(717): 116-126.
- 19 王大华. 柴达木盆地东部构造特征及对成藏的控制作用[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2016.  
WANG Dahua. Structural characteristics and its influence on hydrocarbon accumulation in eastern Qaidam basin [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2016(in Chinese).
- 20 杜忠明, 樊龙刚, 武国利, 等. 柴达木盆地东部新生代盆地结构与演化[J]. 地球物理学报, 2016, 59(12): 4560-4569.  
DU Zhongming, FAN Longgang, WU Guoli, et al. Cenozoic architecture and structural development of the eastern Qaidam basin [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(12): 4560-4569(in Chinese).
- 21 杜忠明. 柴达木盆地东部新生代构造-沉积演化 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.  
DU Zhongming. Cenozoic tectono-sedimentary evolution of the eastern Qaidam basin [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016(in Chinese).
- 22 易定红, 刘应如, 李积永, 等. 柴达木盆地三湖地区第四系七个泉组物源研究[J]. 古地理学报, 2024, 26(3): 644-654.  
YI Dinghong, LIU Yingru, LI Jiyong, et al. Provenance features of the Quaternary Qigequan formation in Sanhu area, Qaidam basin [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2024, 26(3): 644-654(in Chinese).
- 23 王冰, 刘成林, 李宗星, 等. 柴达木盆地东部中生代以来构造应力场及构造演化[J]. 地球科学与环境学报, 2017, 39(1): 83-94.  
WANG Bing, LIU Chenglin, LI Zongxing, et al. Tectonic-stress field and tectonic evolution in the eastern Qaidam basin since Mesozoic [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2017, 39(1): 83-94 (in Chinese).
- 24 何鹏举. 碎屑磷灰石裂变径迹热年代学记录的青藏高原东北缘祁连山新生代构造变形过程[D]. 兰州: 兰州大学, 2018.  
HE Pengju. Cenozoic tectonic deformation process of the Qilian Shan (northeastern Tibetan plateau) recorded by detrital apatite fission-track thermochronology [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2018(in Chinese).
- 25 田明明, 李子颖, 蔡煜琦, 等. 柴达木盆地东北缘德令哈地区砂岩型铀矿化特征及找矿方向[J]. 世界核地质科学, 2024, 41(6): 1076-1088.  
TIAN Mingming, LI Ziyang, CAI Yuqi, et al. Sandstone-hosted uranium mineralization characteristics and prospecting direction in Delingha area, northeast margin of Qaidam basin [J]. *World Nuclear Geoscience*, 2024, 41(6): 1076-1088(in Chinese).
- 26 聂逢君, 严兆彬, 夏菲, 等. 砂岩型铀矿的“双阶段双模式”成矿作用[J]. 地球学报, 2021, 42(6): 823-848.  
NIE Fengjun, YAN Zhaobin, XIA Fei, et al. Two-stage and two-mode uranium mineralization for sandstone-type uranium deposits [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2021, 42(6): 823-848(in Chinese).
- 27 聂逢君, 杨舒琪, 封志兵, 等. 隆起对砂岩型铀矿成矿的控制及找矿启示[J]. 地球学报, 2024, 45(3): 265-277.  
NIE Fengjun, YANG Shuqi, FENG Zhibing, et al. Constraints of uplift on sandstone-type uranium mineralization and its implications for prospecting [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2024, 45(3): 265-277(in Chinese).
- 28 封志兵, 聂逢君, 宁媛丽, 等. 盆地内部砂岩型铀矿找矿技术的设计与探讨[J]. 地质学报, 2022, 96(6): 2217-2229.  
FENG Zhibing, NIE Fengjun, NING Yuanli, et al. Discussion and design of exploration technology for sandstone-type uranium deposits in the interior of the sedimentary basins [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2022, 96(6): 2217-2229(in Chinese).
- 29 俞弼安, 金若时, 李彤, 等. 鄂尔多斯盆地砂岩型铀矿成矿地质条件和关键控矿要素分析[J]. 地球学报, 2023, 44(4): 689-706.  
YU Ren'an, JIN Ruoshi, LI Tong, et al. Analysis of metallogenic condition and key ore-controlling factor of sandstone-hosted uranium deposits in the Ordos basin [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2023, 44(4): 689-706(in Chinese).
- 30 HARSHMAN E N, ADAMS S S. Geology and recognition criteria for roll-type uranium deposits in continental sandstones: Final report [R]. Boulder: Samuel S. Adams and Associates, 1981.
- 31 李艳青. 鄂尔多斯盆地深部烃源岩生烃过程的油或气铀关系实验及地质意义[D]. 西安: 西北大学, 2018.  
LI Yanqing. Experiments of oil or gas-uranium relationship in the hydrocarbon generation process of deep source rocks in the ordos basin and its geological significance [D]. Xi'an: Northwest University, 2018(in Chinese).

- 32 马寅生,尹成明,刘成林,等. 柴达木盆地石炭系油气资源调查评价进展[J]. 地球学报,2012,33(2): 135-144.  
MA Yinsheng, YIN Chengming, LIU Chenglin, et al. The progress of Carboniferous oil and gas investigation and assessment in Qaidam basin[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2012, 33(2): 135-144(in Chinese).
- 33 牛永斌,钟建华,段宏亮,等. 柴达木盆地石炭系烃源岩地球化学特征[J]. 河南理工大学学报(自然科学版),2012,31(5): 525-532.  
NIU Yongbin, ZHONG Jianhua, DUAN Hongliang, et al. Geochemical characteristics of carboniferous source rock in Qaidam basin [J]. Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science), 2012, 31(5): 525-532(in Chinese).
- 34 王利,李宗星,刘成林,等. 柴达木盆地德令哈坳陷石炭系烃源岩成熟度演化史[J]. 地质力学学报,2019,25(3):370-381.  
WANG Li, LI Zongxing, LIU Chenglin, et al. The carboniferous source rock maturity evolution in the Delingha depression in the Qaidam basin, northwest China[J]. Journal of Geomechanics, 2019, 25(3):370-381(in Chinese).
- 35 马立成,江万,施辉,等. 柴达木盆地东部尕斯海南山地区新生代叠加褶皱与油气运移[J]. 现代地质,2024,38(5): 1209-1220.  
MA Licheng, JIANG Wan, SHI Hui, et al. Relationship between Cenozoic superimposed folds and hydrocarbon migration in the Gahainanshan area, eastern Qaidam basin, China[J]. Geoscience, 2024, 38(5):1209-1220 (in Chinese).
- 36 CHI G X, XU D R, XUE C J, et al. Hydrodynamic links between shallow and deep mineralization systems and implications for deep mineral exploration [J]. Acta Geologica Sinica(English Edition), 2022, 96(1): 1-25.
- 37 HUBBERT M K. The theory of ground-water motion [J]. Journal of Geology, 1940, 48: 785-944.
- 38 CHI G X, Xue C J. Hydrodynamic regime as major control on localization of uranium mineralization in sedimentary basins[J]. Science China Earth Sciences, 2014, 57: 2928- 2933.
- 39 SHELDON H A, MICKLETHWAITE S. Damage and permeability around faults: Implications for mineralization[J]. Geology, 2007, 35: 903-906.