

青藏高原碰撞隆升与中国西北及中亚邻区砂岩铀成矿作用*

李子颖, 郭 强, 秦明宽, 蔡煜琦, 郭 建

(核工业北京地质研究院, 北京 100029)

摘 要 青藏高原碰撞隆升是现今地学界最热门的研究课题之一, 其演化过程在中国西北部及邻区中亚形成了独特的沉积盆地和山脉体系, 且在形成的新生代沉积盆地产生了世界著名的砂岩型铀矿集中区, 探明的铀资源量以百万吨计。文章研究探讨了青藏高原碰撞隆升与中国西北及中亚邻区盆地形成过程和特点、对沉积盆地建造响应和改造影响, 构造沉积演化与砂岩铀矿形成的关系, 阐述了不同类型砂岩铀矿的特点和模式、砂岩铀成矿事件、时空分布规律。青藏高原碰撞隆升演化对砂岩铀矿形成具有重要的制约作用, 中亚地区受青藏高原隆升的远程效应, 构造活动相对较弱, 形成大规模砂岩铀矿, 且深度较浅, 浅层的砂岩型铀矿是勘查的重点。中国环青藏高原造山带受影响较大, 浅部和深部砂岩型铀矿均是下一步勘查的方向和目标。

关键词 碰撞隆升; 砂岩铀矿; 沉积盆地; 青藏高原; 中亚地区

中图分类号: P619.14

文献标志码: A

Collision-uplift evolution of Qinghai-Tibetan Plateau and sandstone-hosted Uranium metallogeny in Northwest China and its adjacent Central Asia region

LI ZiYing, GUO Qiang, QIN MingKuan, CAI YuQi and GUO Jian

(Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China)

Abstract

The collision uplift and evolution of the Qinghai-Tibetan Plateau is one of the most popular research topics in geosciences nowadays. The evolution process of the collision uplift of the Qinghai-Tibetan Plateau has formed a unique sedimentary basin and mountain system in the Northwest of China and its neighboring region in Central Asia. In the Mesozoic and Cenozoic sedimentary basins the world-famous sandstone-type uranium megaprovince was formed, and the discovered uranium resources reached million tons. This paper deals with the relationship between the collision-uplift evolution of the Qinghai-Tibetan Plateau and the formation process and characteristics of the basin-mountain system in Northwest China and the adjacent region of Central Asia, the formation response and transformation of sedimentary basins, the structural evolution and the formation of sandstone-type uranium deposits as well. The characteristics and models of different types of sandstone-hosted uranium deposits, uranium metallogenic events, and spatial and temporal distribution are expounded. The collision-uplift evolution of the Qinghai-Tibetan Plateau has an important constraint on the formation of sandstone-type uranium deposits. Due to the Qinghai-Tibet Plateau uplift remote effect, the tectonic activity in Central Asia is relatively weak, a large scale

* 本文得到国家重点基金项目“砂岩型铀矿含矿灰色砂体成因研究”(编号: U2341292)和中核集团基础项目“红杂色岩系砂岩铀矿多层板状矿体成因研究”联合资助

第一作者简介 李子颖, 男, 1964年生, 博士, 研究员, 中核集团首席科学家、长期从事铀矿地质科研与找矿工作。Email: zyl9818@126.com

收稿日期 2024-07-18; 改回日期 2024-11-07。秦思婷编辑。

of sandstone-hosted uranium mineralization happened in relatively shallow depth, and shallow sandstone type uranium deposits are the focus of exploration. The orogenic belt around the Qinghai-Tibet Plateau in China is strongly affected by the collision-uplift of the Qinghai-Tibetan. Both shallow and the deep-buried sandstone-type uranium deposits are the next exploration targets.

Key words: collision uplift, sandstone-type uranium deposit, sedimentary basin, Qinghai-Tibetan Plateau, Central Asia

青藏高原以其特高的海拔高程而被人们称为世界屋脊,科学家们把它与南极、北极相提并论,誉为地球的第三极——高极(潘裕生,1999),其形成主要是新生代印度板块与亚洲板块多期次、非均匀碰撞的结果,特别是新近纪晚期的快速碰撞,产生了世界海拔最高的高原、最高的山脉、最高的盆地(李吉均,2013)。同时,由于碰撞的远程效应,在中国西北及中亚邻区形成了主要以北西或近东西向分布的盆山体系:山脉体系如中国境内昆仑山、祁连山、天山和阿尔泰山脉,盆地如柴达木、塔里木、吐哈、伊犁、准噶尔、银额等盆地;中亚地区山脉体系为楚—伊犁山脉、中天山及其西部的卡尔套山、南天山及克孜尔库姆隆起等,其间的盆地有楚—萨雷苏、锡尔达林、费尔干纳盆地及中央克孜尔库姆山间盆地群等。碰撞演化过程中不仅形成了独特的地理地貌环境和气候,而且产生独特的岩浆活动、沉积特征和成矿作用等,使中国西北及中亚邻区盆地蕴含了丰富的矿产资源(杨富全等,2024)。中亚地区砂岩型铀矿主要集中在楚—萨雷苏、锡尔达林、中央克孜尔库姆和费尔干纳等盆地,其中,仅楚—萨雷苏盆地砂岩铀资源量就百万吨以上;中国西北部主要产铀盆地有伊犁、准噶尔、吐哈、银额和鄂尔多斯盆地等,塔里木和柴达木盆地也有很好的砂岩铀成矿显示和前景。本次研究,作者系统梳理青藏高原碰撞隆升与中国西北部及中亚地区盆山体系的形成关系,分析青藏高原碰撞隆升演化与盆地结构、建造改造关系,同时阐述在青藏高原隆升近程和远程影响下不同类型砂岩铀成矿特征及形成演化约束,以期从区域大尺度论述中国西北及邻区大规模砂岩型铀成矿作用发生的动力学背景及形成演化规律,并且在此基础上进一步分析中国北方砂岩型铀成矿规律与找矿前景。

1 青藏高原碰撞隆升与西北及邻区盆山形成

青藏高原主体位于中国境内,西起帕米尔高原,

东至四川盆地的西缘;南界喜马拉雅山脉,北抵祁连山、昆仑山及阿尔金山脉,高原内部表现为跨越六个纬度的“盆—岭”交替的地貌格局。高原的平均海拔超过4000 m,且诸多山峰的海拔超6000 m。因此,高原由南至北依据海拔高度的递减,可以划分出4个台阶:第一台阶(主要位于西藏及青海南部)、第二台阶(主要为柴达木盆地及其周边)、第三台阶(包括青藏高原北坡下的塔里木盆地和敦煌地区等),以及第四台阶(涵盖准噶尔盆地、银额盆地以及中亚地区的天山余脉和盆地)。

青藏高原的碰撞隆升是现今地学界的研究热点之一,关于青藏高原的隆升机制,国内外学者提出了诸多模式,如双倍地壳模式(崔作舟,1987; Bird, 1991)、推土机模式(Powell et al., 1973; Dewey et al., 1988; 梁晓峰等, 2023)、地壳侧向东挤出模式(Tapponnier et al., 1978; 叶卓等, 2018)、叠加压扁热动力模式(Pan et al., 1996; 施雅风等, 1999; 李吉均, 2013)、断离隆升-挤压隆升-对流隆升三阶段模式等(England et al., 1982; 1983; 1988; 傅容珊等, 1998; 2000)。此外,部分学者认为拆沉作用对青藏高原的形成具有重要贡献(钟大赉等, 1996; 邓万明, 1998; 迟效国等, 1999; Chi et al., 2000)。除上述几种模式外,目前较为统一的观点认为青藏高原的隆升是印度板块与欧亚大陆在新生代发生陆-陆碰撞的结果,这一过程表现出多阶段和多层次的不均匀隆升特征(钟大赉等, 1996; Tapponnier et al., 2001; Wang et al., 2001; Zhang et al., 2004; 侯增谦等, 2006a; Wang et al., 2008; Ding et al., 2022)。青藏高原的隆升控制了中国西北部及中亚邻区的盆山体系的形成,并为砂岩铀成矿提供了重要的构造、沉积环境、流体改造及动力学条件。

1.1 青藏高原碰撞隆升与中国西北部“三山夹两盆”的形成

中国西北地区“三山夹两盆”的形成是青藏高原碰撞隆升的结果,与地质构造演化密切相关。西北地区的大地构造由塔里木古板块、准噶尔古板块、微

陆块以及海西期—印支期的造山带组成。古生代时期,随着哈萨克斯坦板块、准噶尔地块、西伯利亚板块和塔里木板块相继发生碰撞拼贴,形成了北天山海西缝合带、额尔齐斯-斋桑缝合带和中天山—南天山缝合带(鹿化煜等,2014)。同时,古特斯的闭合导致在塔里木板块南缘形成昆仑造山带,至此,欧亚泛大陆基本形成,“三山夹两盆”的初始格局也随之确立(许志琴等,2011;方小敏,2017;孙继敏等,2017)(图1,图2a、b)。

中生代时期,欧亚泛大陆进入裂解期和拗陷期。尽管在侏罗纪—古近纪期间,塔里木盆地南缘与特提斯域内的微板块或地体发生了碰撞,但由于碰撞块体规模有限,因此,对西北地区盆地整体的演化影响有限,主要以伸展构造为主,三大山系(阿勒泰山、天山、昆仑山)长期处于伸展剥蚀状态(Golonka, 2004; Chen et al., 2023)。新生代时期,随着印度板块与欧亚大陆板块的碰撞,青藏高原造山运动开始影响西北地区的盆山格局。至古近纪,隆升造山带仅限于喜马拉雅、冈底斯山一带,而其南缘则延续了中生代的伸展拗陷阶段,这一阶段出现了大面积的准平原化,三大山系甚至被夷平(方世虎等,2004; Zhang et al., 2017; Fan et al., 2019)。

新近纪中新世,随着陆内南北向的挤压-汇聚作

用,青藏高原整体开始大面积隆升,导致中国西部广袤地域的沉积和构造面貌发生了显著变化,即沉积物剥蚀速率明显增加,盆地进入再生前陆盆地的发展阶段。第四纪以来,青藏高原进入快速隆升阶段(Lu et al., 2004; 潘佳伟等,2013),此次隆升使青藏高原迅速抬升了3000~4000 m,并波及整个中亚及中国西北地区,盆-山边缘形成了大规模的前陆推覆构造,构成了现今中国西北部“三山”(阿勒泰山、天山、昆仑山)夹“两盆”(塔里木盆地、准噶尔盆地)的盆山地貌。同时,盆地内形成了新的褶皱和拗陷,并在部分地区沉积了巨厚的第四系沉积物(Pan et al., 2012; Zhang et al., 2012)。

1.2 青藏高原碰撞隆升与中亚盆山体系的形成

中亚地区的盆山体系发展于哈萨克斯坦板块之上,由不同的微陆块、岛弧和地体拼接而成,各单元以断裂为界,形成了现今的构造格局。该区主体属于古亚洲洋构造域(中亚造山带),随着古亚洲洋的闭合,若干微陆块、洋壳和岛弧地体相互碰撞拼贴,至晚泥盆纪—早石炭纪最终封闭形成哈萨克斯坦板块;随后,在晚石炭纪—早二叠纪,哈萨克斯坦板块周边相继与西部波罗的板块、东南塔里木板块、北部西伯利亚板块以及南部图兰地台发生碰撞拼贴,基本形成了中亚地区的整体板块和基底格局(Golon-

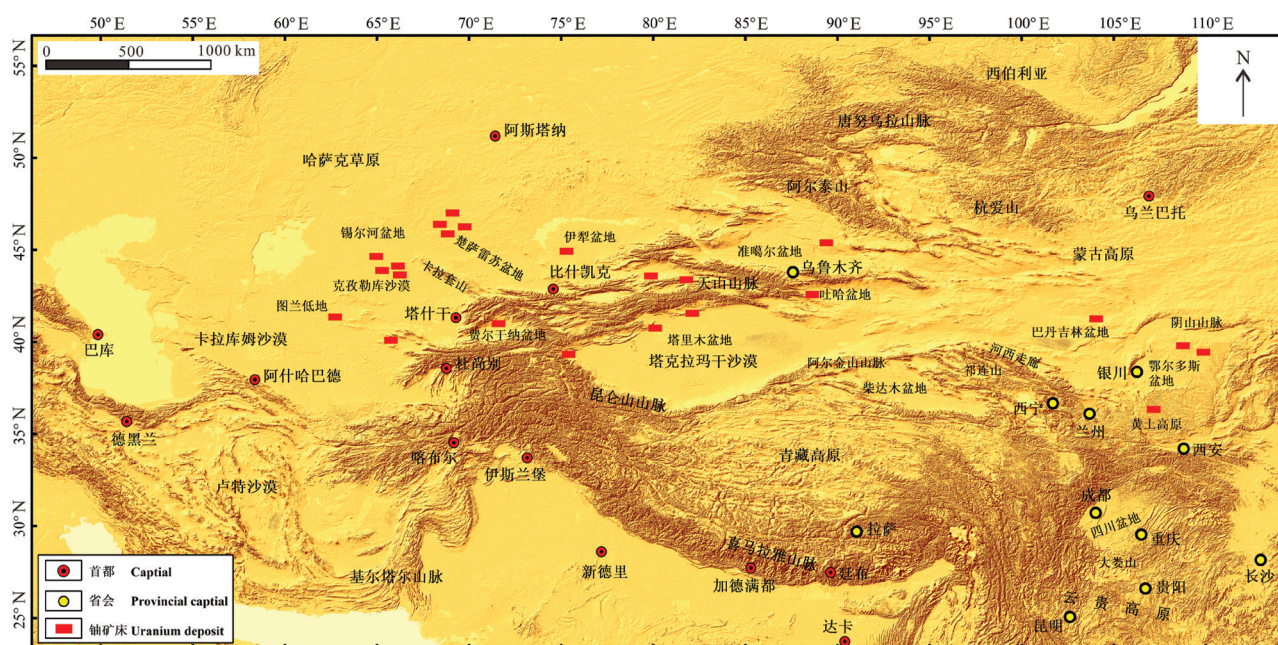


图1 中国中西部及中亚邻区盆山体系与砂岩铀矿分布图

Fig. 1 Mountain systems and sandstone uranium deposits in central and western China and neighboring regions of Central Asia

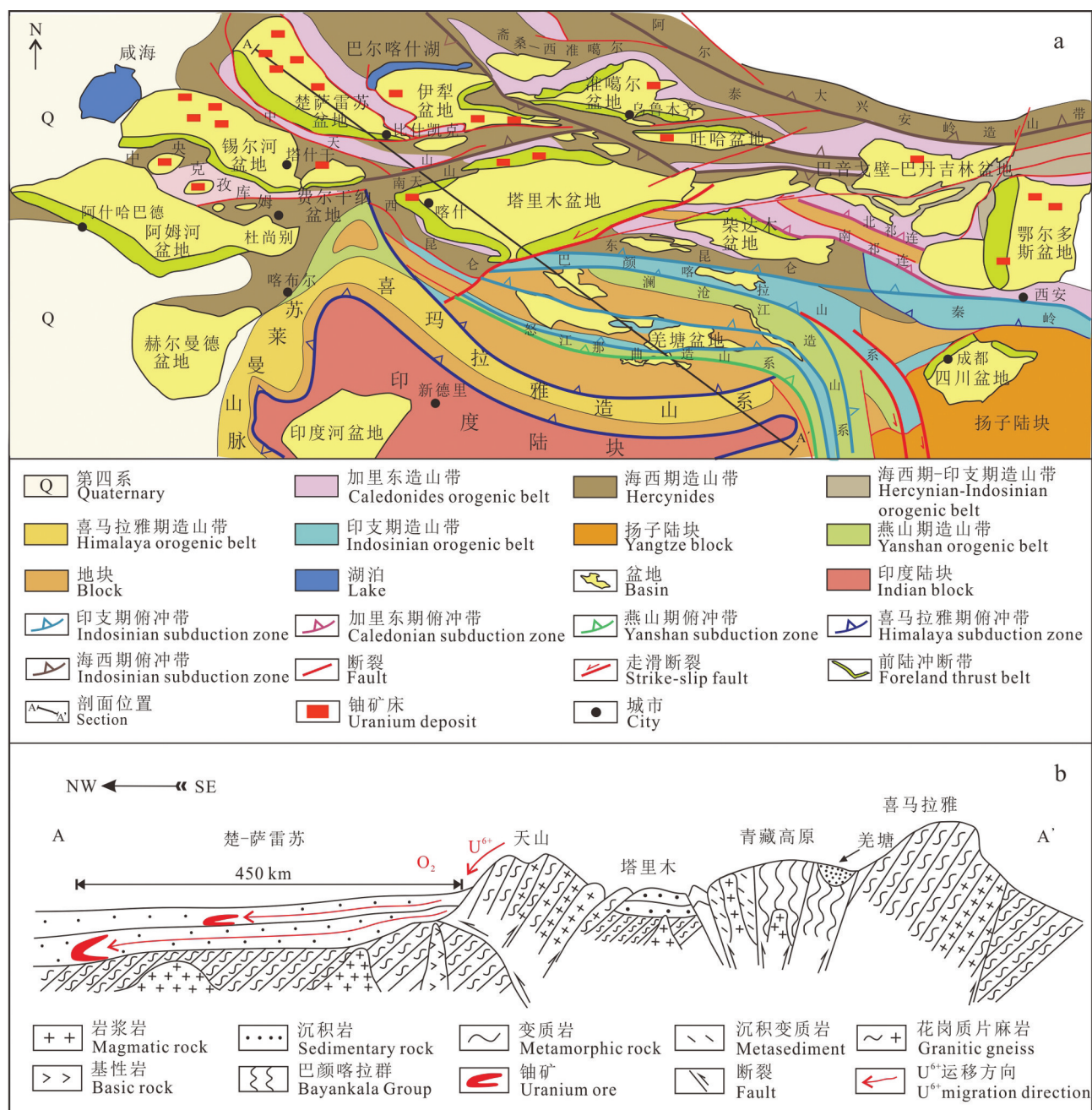


图2 中国中西部及中亚邻区大地构造与砂岩型铀矿分布图(a)及SE-NW方向剖面示意图(b)

Fig. 2 Regional tectonic and sandstone-type uranium deposits of central and western China and Central Asia adjacent areas (a) and SE-NW section map (b)

ka, 2004; Li et al., 2022)。同时,挤压作用导致哈萨克斯坦板块东南部(中国中亚邻区)发展出一系列走滑断裂,并造成哈萨克斯坦板块顺时针旋转,形成中亚马蹄形构造(Gao et al., 2009)。

中生代至古近纪,中亚地区的盆山演化与中国中西部相似,整体进入裂陷-拗陷期,形成了一系列裂谷盆地。由于中亚靠近特提斯洋,广泛遭受海侵,

较长时间出现海相沉积,后期也出现大面积的准平原化(Zhu et al., 2022)。新近纪以来,随着青藏高原的快速隆升和远程效应,中亚地区进入了挤压构造的发展阶段,侏罗纪—古近纪几乎被夷平的周边山系经历了强烈隆升,早期构造受到不同程度的改造,沿原有断层发生冲断或走滑,造山带之间形成了一系列前陆盆地。进入前陆盆地的演化阶段,由于中

亚地区的山间盆地在侏罗纪—古近纪属于拉张型裂谷盆地,后期才被逆冲变形改造,表现为构造反转造山。造山作用相对较弱,属于次造山运动,由此构成了现今的中亚盆山体系。山脉体系包括楚—伊犁山脉、中天山及其西部的卡尔套山、南天山以及克孜尔库姆隆起等,期间的盆地有楚—萨雷苏盆地、锡尔达林盆地、费尔干纳盆地及中央克孜尔库姆山间盆地群等(Wang et al., 2006),为砂岩铀的成矿作用奠定了构造、建造和改造条件。

2 青藏高原碰撞隆升与盆地沉积建造响应

印度-欧亚板块的陆陆碰撞形成巨大的水平挤压,促使青藏高原的隆升和向北、向东的推挤,同时产生大规模的走滑-逆冲断层活动,其远程效应控制了高原外围巨型山脉断块隆升和盆地挠曲沉降,构成一个巨型的环青藏高原盆山体系,这一盆山体系内部发生强烈陆内变形,古造山带复活,冲断带也依次从造山带向盆地扩展,强烈陆内造山带隆升和构造挤压在造山带与盆地边缘形成了大规模的前陆盆地。在此背景下,复活的古造山带和前陆冲断带往往是金属矿产资源和油气资源勘探的重点领域,而中国中西部及中亚邻区的砂岩型铀矿也产在这一盆山体系内,由青藏高原阶段隆升所引起的盆地建造变化和后生改造也是砂岩型铀成矿的关键要素。

2.1 青藏高原碰撞隆升与中国西北部盆地沉积响应分析

(1) 中国西北部产铀盆地结构特征

中国西北部砂岩型铀矿主要产于鄂尔多斯盆地、吐哈盆地、银额盆地和伊犁盆地,近年来在准噶尔盆地也有所突破,塔里木和柴达木盆地砂岩型铀矿从层位和类型上略有不同,真正意义上层间氧化带型砂岩铀矿还未突破,一种新的渗出砂岩型铀矿潜力和前景较大(李子颖等, 2007; 2020; 2022; 2024)。从盆地类型来看,塔里木盆地、鄂尔多斯盆地属于克拉通盆地,伊犁和吐哈盆地属山间盆地,准噶尔盆地属再生前陆盆地。塔里木盆地和鄂尔多斯盆地是在前寒武系基底上多阶段发育起来的大型叠合盆地,伊犁、吐哈和准噶尔盆地具有双层基底结构特征,均是在古生代褶皱基底上发育起来的叠合盆地,这些叠合盆地不同构造阶段表现为不同构造属性、并相互叠置,在中、新生代经历了相似的构造演

化过程,即都经历中生代—古近纪断陷-拗陷或前陆-拗陷沉积阶段和新近纪以来的前陆盆地演化阶段(图3),这一演化特征决定了砂岩型铀矿的产出,具体概括如下:首先,在盆地断陷阶段,多发育富含有机质(烃源岩)沉积建造,其往往铀含量较高,可为渗出铀成矿提供重要的铀源(李子颖等, 2022);其次,盆地演化阶段的弱伸展拗陷层形成主要的含矿围岩,这一拗陷层可以是初始裂陷阶段转化而成的,也可以是初始前陆盆地阶段转化的;第三,盆地在拗陷沉积期后普遍经历了整体构造抬升和盆地逆冲挤压2个大的阶段,这也为后生氧化还原和渗出砂岩铀成矿作用(李子颖等, 2019; 2022; 2024)提供了窗口期。

(2) 中国西北部产铀沉积建造

中国西北部盆地层间氧化型砂岩铀矿的产铀层位主要集中在中下侏罗统,为一套含煤碎屑岩建造,除此之外,白垩系和古近系、新近系红杂色碎屑岩中也存在铀矿化,近年来还有一些突破,也是值得关注的层位,特别是渗出砂岩铀成矿作用为主,产于新近系中的铀矿(李子颖等, 2022)。侏罗系—古近系为盆地演化阶段拗陷期的产物(图3),虽然古近纪青藏高原已经开始大幅隆升,但其作用主要集中在喜马拉雅一带,对中国西北部的盆地演化有一定远程影响。盆地处于弱伸展拗陷期,受整体沉降作用盆地四周往往可发育较为稳定的河流体系。当受古气候或局部古地貌影响产生灰色河道砂体时,则可以看作是氧化还原砂岩型铀矿的潜在储藏空间(秦明宽等, 2017),而红杂色建造则为渗出砂岩铀成矿创造了条件(李子颖等, 2022; 2024)。因此,中国西北部产铀沉积建造是在青藏高原隆升远程效应影响前所形成的发育灰色“泥-砂-泥”建造,而青藏高原隆升所带来的沉积响应主要是中生代晚期和新生代红杂色沉积建造。这种建造本身不利于氧化还原砂岩型铀成矿,但为渗出砂岩铀成矿创造了容矿层位和空间(李子颖等, 2022)。

(3) 青藏高原阶段隆升对产铀沉积盆地的改造

青藏高原阶段隆升对产铀沉积盆地的改造,主要体现在对盆地结构和沉积建造层的改造方面。青藏高原主碰撞阶段(古近纪)还未大规模影响到中国西北部盆地,整体处于大规模准平原化阶段,盆地结构尚未遭受改造变形,有利于渗入层间氧化还原砂岩铀成矿作用;青藏高原晚碰撞阶段(新近纪),受青藏高原大面积的隆升,这些盆地的剥蚀沉积速率明显增加,进入了再生前陆阶段,盆地结构开始发生变形,

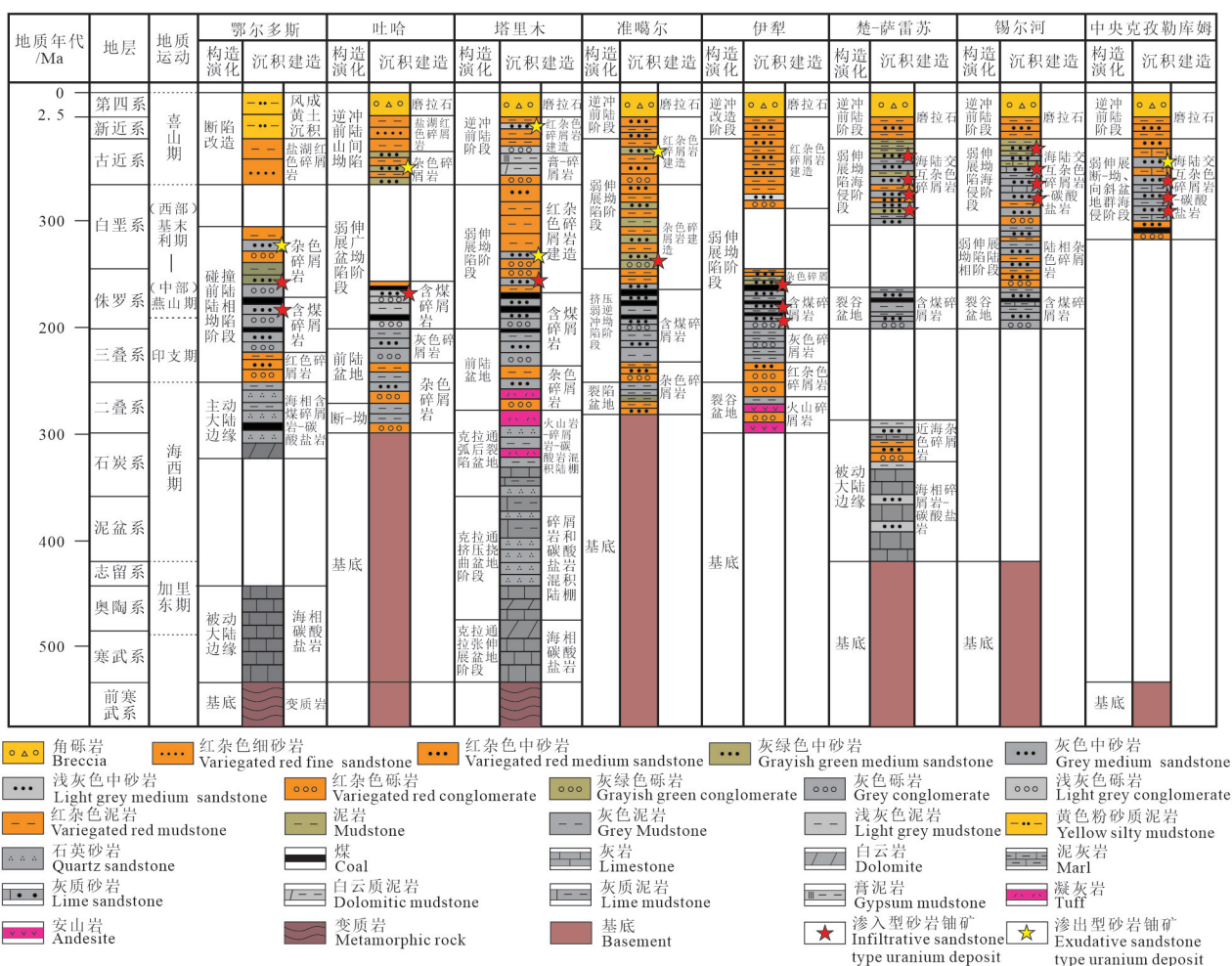


图3 中国西北及中亚主要产铀盆地演化与沉积建造特征

Fig. 3 Evolution and sedimentary structure characteristics of major uranium basins in Northwest China and Central Asia

古造山带活化向盆地方向逆冲推覆,盆地另一侧发生掀斜抬升,形成不对称的盆地结构,这一阶段虽然盆地结构开始转变,但整体的造山作用相对较弱,盆地周缘沉积的建造层均发生一定有利的掀斜,为渗入氧化还原砂岩型铀成矿作用的发生提供了有利条件,也为渗出砂岩铀成矿提供了构造动力学环境(李子颖等,2022;2024);青藏高原后碰撞阶段,青藏高原快速隆升,也是远程效应影响最大的阶段,使产铀盆地周缘古造山带快速隆升并发育大规模的冲断带,靠近冲断带的沉积建造层表现为明显强烈的变形,地层倾角变陡,局部甚至出现直立或倒转,山前出现快速剥蚀-沉积的磨拉石建造,这种沉积建造层强烈的破坏改造则不利于下一阶段后生层间氧化的发育,甚至将前一阶段形成的氧化带铀矿化破坏掉,但却可能有利于渗出砂岩铀成矿作用(李子颖等,2022;2024)。远离冲断带的盆地边缘的沉积建造层继续发生掀斜,保持倾

角不大的稳定单斜带,剥蚀与层间氧化渗入速率适当,有利于铀长期稳定的迁移和富集成矿。

2.2 青藏高原碰撞隆升与中亚盆地沉积响应分析

(1) 中亚产铀盆地结构特征

中亚典型的砂岩型产铀盆地主要有楚-萨雷苏盆地、锡尔达林盆地、费尔干纳以及中央克孜勒库姆山间盆地等。这些盆地基底与中国中西部产铀盆地有所不同,中亚产铀盆地基底固结较晚,为下古生界或上古生界褶皱岩系。楚萨雷苏盆地基底为早古生代褶皱岩系,锡尔达林盆地、费尔干纳盆地和中央克孜勒库姆盆地基底为晚古生代褶皱岩系。相同的是中亚产铀盆地也经历了中生代—古近纪断陷—拗陷沉积阶段和新近纪以来的前陆盆地演化阶段,拗陷沉积期形成赋矿围岩,改造期形成层间氧化流体渗入窗口,不对称盆地结构缓坡带决定有利于铀成矿部位。只是中亚盆地新生代逆冲冲断阶段处于改造

状态,还未形成接受巨厚沉积的陆内前陆盆地,也可以说中亚盆地受青藏高原隆升改造作用,由于距离较远相对较弱,属于次造山运动,将赋矿拗陷层改造掀斜为更为稳定的单斜带,有利于渗入氧化还原铀成矿,故前苏联学者以中亚地质构造背景,提出了次造山砂岩铀成矿作用(A.И. 别列里曼,1995;M.Φ. 马克西莫娃等,1996);在中央克孜库姆山间盆地,由于构造作用相对较强,不仅存在渗入砂岩铀成矿作用,也存在渗出砂岩铀成矿作用。

(2) 中亚产铀盆地沉积建造

中亚与中国中西部产铀层位有所不同,中亚产铀层位目前发现的主要是上白垩统一古近系,中国中西部产铀层位主要是中下侏罗统,少数产在白垩系中;两者的沉积建造也有区别(图3)。中生代是中亚地区广泛遭受海侵的时期,有2次规模较大的海侵,第一次发生在中侏罗世—晚侏罗世早期,海侵范围比较局限;第二次发生于晚白垩世—古近纪,海侵规模较大,包括中国塔里木盆地西南地区也遭受部分海侵,这一次海侵形成的海陆交互相沉积层序构成了中亚盆地的主要产铀建造,而中国中西部产铀层位则主要是陆相含煤碎屑岩建造。这套赋铀的海陆交互相建造主要是大型的滨海三角洲沉积,由陆源的粗碎屑与海相泥岩、碳酸盐岩构成的多旋回的“泥-砂-泥”结构,为砂岩型铀矿提供了良好的成矿条件。

(3) 青藏高原阶段隆升对中亚产铀沉积盆地的改造

青藏高原隆升对中亚产铀沉积盆地的改造总体与中国西北部相似,但中亚地区的构造活化作用以发育北西向的走滑断裂为特征,构造变形相对较弱,盆地未遭受强烈逆冲破坏,盆缘的斜坡带基本保留而稳定,为形成渗入的层间水动力创造了条件。青藏高原主碰撞阶段(古近纪)未影响到中亚地区,这个时期中亚产铀盆地还处于弱伸展拗陷阶段,并接受海陆交互相沉积,为主要产铀层之一;青藏高原晚碰撞阶段(新近纪时期),中亚盆地受影响开始处于造山阶段,产铀盆地仅接受了几十米红色含石膏的碎屑岩沉积,而近天山的费尔干纳盆地则沉积上千米厚的地层,进一步反映出中亚产铀盆地受北西向走滑断裂的控制,造山破坏作用相对减弱,盆地没有发生明显的不对称结构,以整体抬升为主,盆缘的斜坡带开始出露剥蚀,在产铀层位形成稳定的有利层间氧化带发育的水动力条件;青藏高原强烈碰撞阶段(第四纪),同样受青藏高原的快速隆升,天山山脉

也急剧隆升,在中亚地区表现为大卡拉套山脉的抬升,并把楚萨雷苏和锡尔达林盆地分隔开来,在山前沉积了磨拉石主造山的特征,但强度没有中国中西部的构造逆冲作用强,对构造斜坡的破坏作用稍弱,更多的是强化了层间水动力机制,使铀矿化再分配和再沉淀,部分地段叠加形成品位较高的砂岩铀矿。

青藏高原自新生代以来,经历了多阶段和多层次的不均匀隆升,而其作用也影响着中国西北地区与中亚邻区盆山的构造格局及时空演化,尤其是天山造山带的盆-山耦合关系。自印度板块向欧亚板块嵌入以来,青藏高原多次隆升,其远程效应使天山发生强烈的隆升并产生推覆冲断和走滑构造,并影响着天山及分支山脉之间构成的一系列中生代盆地(图1,图2a、b),如楚—萨雷苏盆地、锡尔达林盆地、中央克孜库姆隆起带上的山间盆地群、伊犁盆地、吐哈盆地等。

上述这些盆地大致可以分为2个类型:①稳定的前中生代基底基础上发展起来的大型中生代海陆相盆地,如中亚哈萨克斯坦境内的楚—萨雷苏和锡尔达林盆地;②隆起的古生代基底上发展起来的中小型山间盆地,如发育在天山主山脉隆起带上的伊犁盆地、吐哈盆地以及中央克孜库姆隆起(天山支脉)上的山间盆地群。这2类盆地都产出许多世界著名的砂岩铀矿集区。虽然天山造山带及周边具有不同的盆地类型,但受青藏高原隆升的影响,具有类似的沉积层序及构造改造。始新世末期—渐新世末期,楚—萨雷苏和锡尔达林盆地大面积抬升,尔后在弱挤压的构造体制下仅形成很薄的上新统至第四系的沉积层序(厚度30~60 m),沉积建造为干旱气候带下形成的红色的含石膏(钙质)质的中、细碎屑岩,期间存在多个剥蚀-沉积间断期,有利于层间氧化作用发育和砂岩铀矿的形成。天山造山带内的山间盆地自始新世以来,受差异构造隆升作用的影响普遍抬升,在盆地内往往沉积一套偏氧化色调并指示干旱气候的沉积层序,并且厚度较小,盆地局部地区往往受弱挤压活动的影响产生地层倾斜,形成稳定的构造斜坡带,如伊犁盆地、吐哈盆地以及中央克孜库姆隆起带上的山间盆地群均具有上述特征。

由此看来,自新生代青藏高原多阶段隆升的作用以来,其影响着西北部盆地的沉积层序与改造,在这些盆地中往往会形成多个较大的沉积间断面,沉积地层往往是一套厚度不大、干旱气候条件下的碎屑岩,同时,盆地边缘会发生掀斜形成稳定的构造斜

坡带,为砂岩铀矿的形成创造了良好的流体动力学条件。

3 中国西北部及邻区盆地砂岩铀成矿作用

受青藏高原碰撞隆升作用的近程和远程作用的影响,在中国西部、西北部和中亚地区盆地中,砂岩铀成矿作用十分强烈,形成了一批万t、十万t级的大型和超大型铀矿床或铀资源基地,初步统计铀资源量大于或接近2万吨的矿床超30个;形成的砂岩型铀矿床总数上百个,探明资源量达到200万吨;使中亚和中国西北部地区成为世界级砂岩铀矿集中区(图2a、b)。在中国西北部,主要分布在伊犁、吐哈和鄂尔多斯盆地,部分在塔里木和准噶尔盆地等;在中亚,主要聚集于楚—萨雷苏、锡尔达林、中央克孜尔库姆与科克切塔夫4个地区(赵凤民,2014)。由于经历复杂的多期次构造作用,形成了产于多层位、多种类型的砂岩铀矿化,主要有层间氧化带型、叠合复成因型、构造活动带型和渗出砂岩型等,以下以代表性铀矿床分别阐述。

3.1 层间氧化带型砂岩铀矿床

层间氧化带型砂岩铀矿床是最重要的渗入型砂岩铀矿,在中国西北部和中亚地区广泛分布,其中最具代表性和规模最大的当属哈萨克斯坦楚—萨雷苏盆地英凯砂岩铀矿床和中国伊犁盆地库捷尔太砂岩铀矿床。

英凯砂岩铀矿床主要产于上白垩统门库杜克组和英库杜克组,受上白垩统层间氧化带弧形前锋线控制明显,剖面上为典型的卷状形态(图4),平面上具强烈弯曲的复杂形态,总体呈向北西突出的弧形、近南北向展布,矿石中主要铀矿物以细分散状沥青铀矿和铀石为主,富集于含矿砂岩的黏土和粉砂质胶结物的孔隙中。英凯铀矿床主要控制因素是:首先是有利层位,上白垩统门库杜克组、英库杜克组沉积巨大的透水性良好、单层厚度适中的滨海三角洲相砂体;其次是后期青藏高原隆升的影响,天山开始造山隆升并影响楚—萨雷苏盆地东缘掀斜剥蚀,来自天山含铀含氧水源源不断地渗入这些容矿层位,层间氧化作用发育充分,这一作用延续时间大概有25 Ma(12~37 Ma),由东南向西北方向发育多层巨大层间氧化带,在氧化还原过渡带,层间水中的铀被还原沉淀富集成矿,多层氧化前锋线和矿体呈阶梯状逐渐尖灭(图4)。

库捷尔太铀矿床位于伊犁盆地南缘西段,矿区地层总体上呈向北缓倾斜的单斜构造,但沿走向具次级隆凹特征。矿区地层自下而上发育有中上三叠统小泉沟群,下侏罗统八道湾组、三工河组,中侏罗统西山窑组、头屯河组以及白垩系、古近系、第四系,其中,侏罗系为主要含矿层。矿体主要受层间氧化带的尖灭线控制(图5),在平面上呈蛇曲带状;矿体有卷状、板状和透镜状3种剖面形态,以卷状矿体为主,其次是板状矿体和透镜状矿体。矿石呈松散、较松散的块状构造,铀矿物主要有沥青铀矿、铀石。矿床成因属渗入层间氧化带型。含矿建造水西沟群在温暖潮湿古气候条件下形成灰色还原建造,沉积成岩之后,即到晚侏罗世时,盆地南缘相继发生了地壳的抬升,古气候随之转向干旱,含矿建造被抬升至近地表,在表生作用下含氧含铀水渗入砂体,进行层间氧化淋滤,形成层间氧化带,氧化带砂体中的部分铀也活化进入层间地下水,向过渡带迁移。由于砂体内还原剂的作用,沿含氧含铀水运移方向氧化作用不断减弱,并在氧化-还原过渡带地球化学障处使铀发生沉淀和富集成矿。

3.2 叠合复成因型砂岩铀矿床

由于印度板块与青藏高原陆陆碰撞的多期次作用,相应也形成了复杂的多成因叠合的砂岩铀矿,分别以鄂尔多斯盆地东北部和乌兹别克斯坦肯迪克秋别砂岩铀矿床为例阐述。

鄂尔多斯盆地东北部矿带北西-南东方向延伸100多km,主要包括孙家梁地段、沙沙圪台、皂火豪、纳岭沟和大营地等。铀矿化受侏罗纪直罗组灰绿色砂岩与灰色砂岩之间的过渡带控制,这与传统的砂岩铀矿受黄色和灰色过渡带控制不同(图6a~d),矿床主矿体在平面上呈不规则状,在剖面上,形态以卷状、板状为主,少数为透镜状。含矿主岩主要为深灰色-浅灰色岩屑长石石英砂岩,碎屑成分以石英为主,并含有许多长石和岩屑,还含有石榴子石、锆石等重砂矿物。铀矿物主要是呈胶状、短柱状、晶簇状分布的铀石,少量的沥青铀矿,与钾长石、黏土矿物、黄铁矿、金红石、方解石、钛铁矿伴生。矿床的形成,经历了构造的多期次的“动-静”耦合、潜水氧化与层间氧化成矿作用的叠加、油气-热流体的复合改造等复杂的成矿过程。李子颖等(2009)提出了东胜砂岩型铀矿的“叠合复成因成矿模式”(图6a~d),即成矿铀源、流体和作用均具有多元叠合特征。成矿作用包括预富集阶段(约170 Ma)、潜水氧化作用阶段

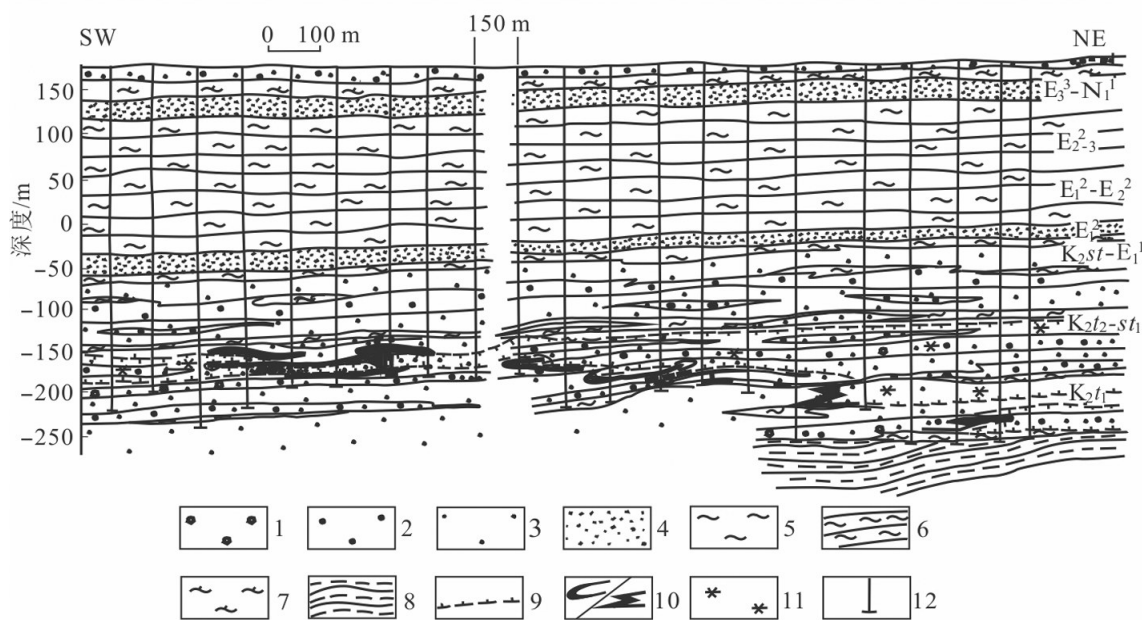


图4 中亚楚—萨雷苏盆地英凯铀矿床地质剖面铀矿化的位置图(据赵凤民,2014修改)

$E_3^3-N_1^1$: 别特巴克达拉组; $E_{2,3}^2$: 乌尤克组下段; $E_1^2-E_2^2$: 乌伐纳斯组—依康组; E_1^2 : 乌伐纳斯组; $K_2st-E_1^1$: 查尔巴克组; K_2st-st_1 : 英库杜克组; K_2t_1 : 门库杜克组
1—砂-细砾质岩; 2—不等粒砂; 3—中粒砂; 4—细粒砂; 5—黏土; 6—层状黏土; 7—钙质黏土; 8—古生代建造泥岩、粉砂岩; 9—层间氧化带边界; 10—铀矿化; 11—褐铁矿化; 12—钻孔

Fig. 4 Geological section shows uranium mineralization location of the Yingkai uranium deposit in the Chu-Sareisu Basin, Central Asia (modified after Zhao, 2014)

$E_3^3-N_1^1$: Bietebakedala Formation; $E_{2,3}^2$: Lower Wuyouke Formation; $E_1^2-E_2^2$: Wufanasi Formation—Yikang Formation; E_1^2 : Wufanasi Formation; $K_2st-E_1^1$: Chaerbake Formation; K_2st-st_1 : Yingkuduke Formation; K_2t_1 : Menkuduke Formation
1—Sand-fine gravel rock; 2—Inequigranular sandstone; 3—Medium sandstone; 4—Fine sandstone; 5—Clay; 6—Lamellar clay; 7—Calcareous clay; 8—Paleozoic mudstone, siltstone; 9—Interlayer oxidation zone boundary; 10—Uranium mineralization; 11—Limonitization; 12—Drillhole

(约 135~160 Ma)、层间氧化作用阶段(约 65~125 Ma)和油气还原加热改造作用(约 8~20 Ma)。晚期较强烈的油气还原和热改造作用,形成铀石、硒化物、硫化物和一些中低温矿物,以及 P、Se、Si、Ti、REE 等元素的叠加富集,使该铀矿床具有自己独特的特征。

产于乌兹别克斯坦中央卡兹库姆肯迪克秋别铀矿床,是另一个叠合复成因砂岩铀矿例子。该矿床产于别什布拉克盆地北缘,赋矿地层是上白垩统下土伦阶、上土伦阶和康尼亚克阶沉积岩,但 70% 以上的铀资源量集中于上部的康尼亚克阶中。铀矿体在平面上呈不规则的云朵状,矿石铀品位不高,为 0.011%~0.096%,平均品位为 0.025%。铀矿物主要为沥青铀矿。该矿床除受层间氧化带控制外,还受断裂构造控制(图 7a~c),其不仅产于灰色岩石内,也产于原生红色砂岩内(赵凤民,2014),与其中次生还

原的砂岩关系密切,而这些次生还原作用可能与深部来源的还原性富铀流体有关。肯迪克秋别床为渗入氧化流体和渗出还原流体多种流体成矿作用结果,具备叠合复成因特征。事实上,乌兹别克斯坦中央克孜库姆砂岩铀成矿区的许多砂岩铀矿床中存在这种次生还原现象,或被称作后生热还原蚀变,即碳酸盐化、黄铁矿化,对其包裹体测温变化范围在 100~200°C(赵凤民,2014),如苏格拉雷矿床等,应于深部渗出成矿流体密切相关。

3.3 构造活动带型砂岩铀矿床

鄂尔多斯盆地西部瓷窑堡地区铀矿化发育于强烈构造活动区,属于先强烈构造变形后渗入氧化成矿的独特类型,为构造活动带型砂岩成矿作用。含矿层位为侏罗系直罗组和延安组,属于典型的层间氧化带型砂岩铀矿,受氧化还原带控制,以卷状为主,层状和透镜状矿体较少(图 8a~e)。含矿层砂体

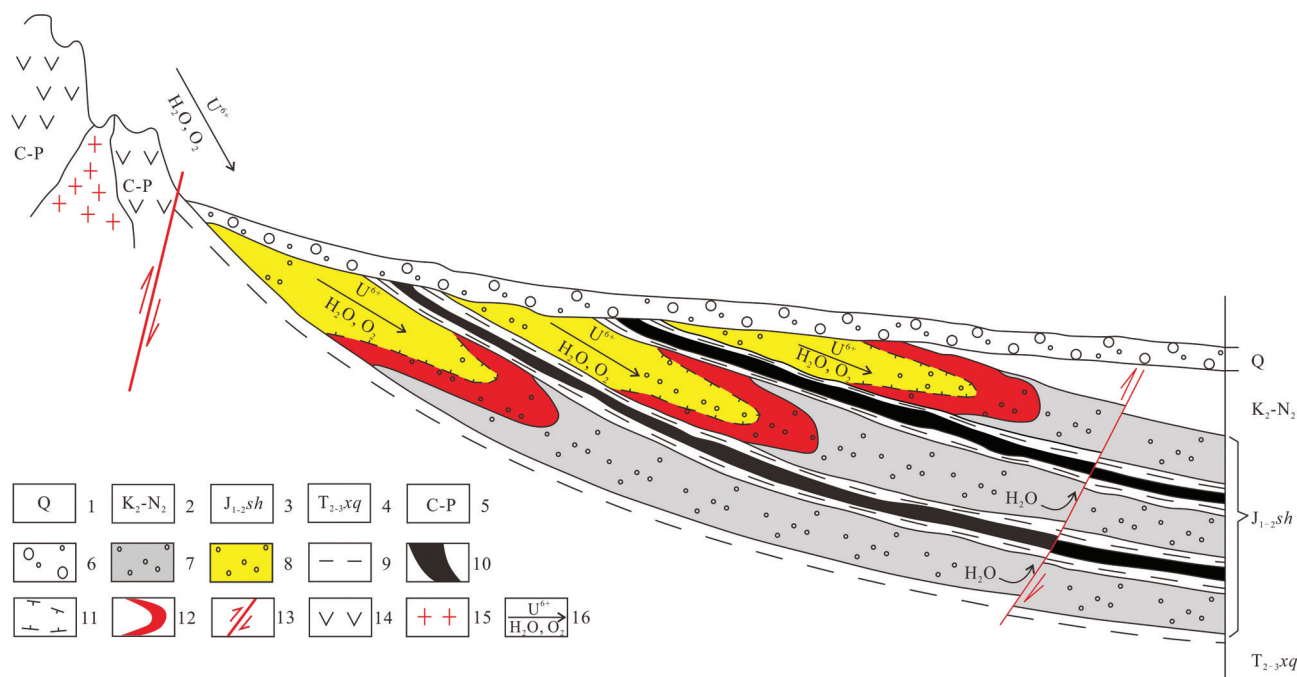


图5 库捷尔太铀矿床成矿模式示意图(据李胜祥等,2006修改)

1—第四系;2—上白垩统—上新统;3—上侏罗统水西沟群;4—中上三叠统小泉沟群;5—石炭系—二叠系;6—砾岩;7—灰色砂岩;8—黄色砂岩;9—泥岩;10—煤层;11—层间氧化带及其前缘;12—卷状铀矿体;13—断层;14—安山岩;15—花岗岩;16—含铀流体

Fig. 5 Schematic diagram of metallogenic model of Kugertai uranium deposit (modified after Li et al., 2006)

1—Quaternary; 2—Upper Cretaceous—Pliocene series; 3—Upper Jurassic Shuixigou Group; 4—Middle and Upper Triassic Xiaoquangou Group; 5—Carboniferous—Permian; 6—Conglomerate; 7—Grey sandstone; 8—Yellow sandstone; 9—Mudstone; 10—Coal seam; 11—Interlayer oxidation zone and its front; 12—Rolled uranium ore body; 13—Fault; 14—Andesite; 15—Granite; 16—Uraniferous fluid

主要为中-粗粒长石石英砂岩,富含炭屑、黄铁矿等还原介质,初始铀含量较高,砂体连通性较好,空间展布稳定。贫矿石中铀主要以吸附态存在,其中铀被有机质、黏土矿物等吸附;富矿石中可见铀矿物,主要为沥青铀矿,其次为铀石。砂岩铀成矿作用是直罗组沉积之后,燕山运动使盆地西缘发生强烈的构造变形,发育西陡东缓的背斜构造及逆冲断裂带,形成西缘冲断带,受盆地刚性基底控制,变形强度由盆缘向盆内逐渐减弱至消失。成矿区位于盆山耦合过渡部位,构造作用中等偏强。成矿的过程主要是:96 Ma时期,全区抬升,背斜的核部长期暴露地表遭受剥蚀,含矿层被剥露地表形成“天窗”构造;新生代时期,气候干旱,目标层遭受地下水的渗入改造,发生层间氧化作用并成矿,具有多期成矿的特征,铀成矿年龄为52~59 Ma、21.9 Ma和6.2~6.8 Ma(郭庆银等,2010)。

3.4 渗出砂岩型铀矿床

近些年中国在砂岩铀矿勘查中,发现在白垩系、古近系和新近系,甚至第四系红杂色沉积建造中发

现了铀矿或显示很好的铀矿找矿前景,如二连盆地产于赛汉组上段的哈达图铀矿床、鄂尔多斯盆地洛河组、环河组中的铀矿化等。它们具有与传统砂岩铀矿不同的独特特征,如铀矿体受红杂色沉积岩系中灰色砂体控制,具“两黄(红)夹一灰”的特点,即剖面上显示控制铀矿化灰色砂体的上下左右均是氧化色砂岩,灰色体呈不连续的透镜状或板状,矿体也主要呈板状,并具多层性,富铀矿石中常发现铜铅锌硫化物与铀矿物共伴生,显示出不同的地球化学元素组合特征(李子颖等,2022;贺锋等,2023)。李子颖等(2022)基于对哈达图砂岩铀矿床的系统研究,提出了渗出砂岩铀成矿理论和模式。渗出砂岩铀成矿作用是指具有一定温度、压力的深部富有机质富铀还原性流体沿有利构造通道向上迁移至氧化沉积建造中,温度和压力明显降低,酸碱度、氧化还原性质等产生明显的变化,导致铀化合物、络合物发生氧化、分解、去碳酸基、脱水、脱硫等作用,致使其中的铀等元素发生沉淀,导致富集沉淀成矿(图9);该理论的要点是:①成矿铀源:来自深部富含有机质富

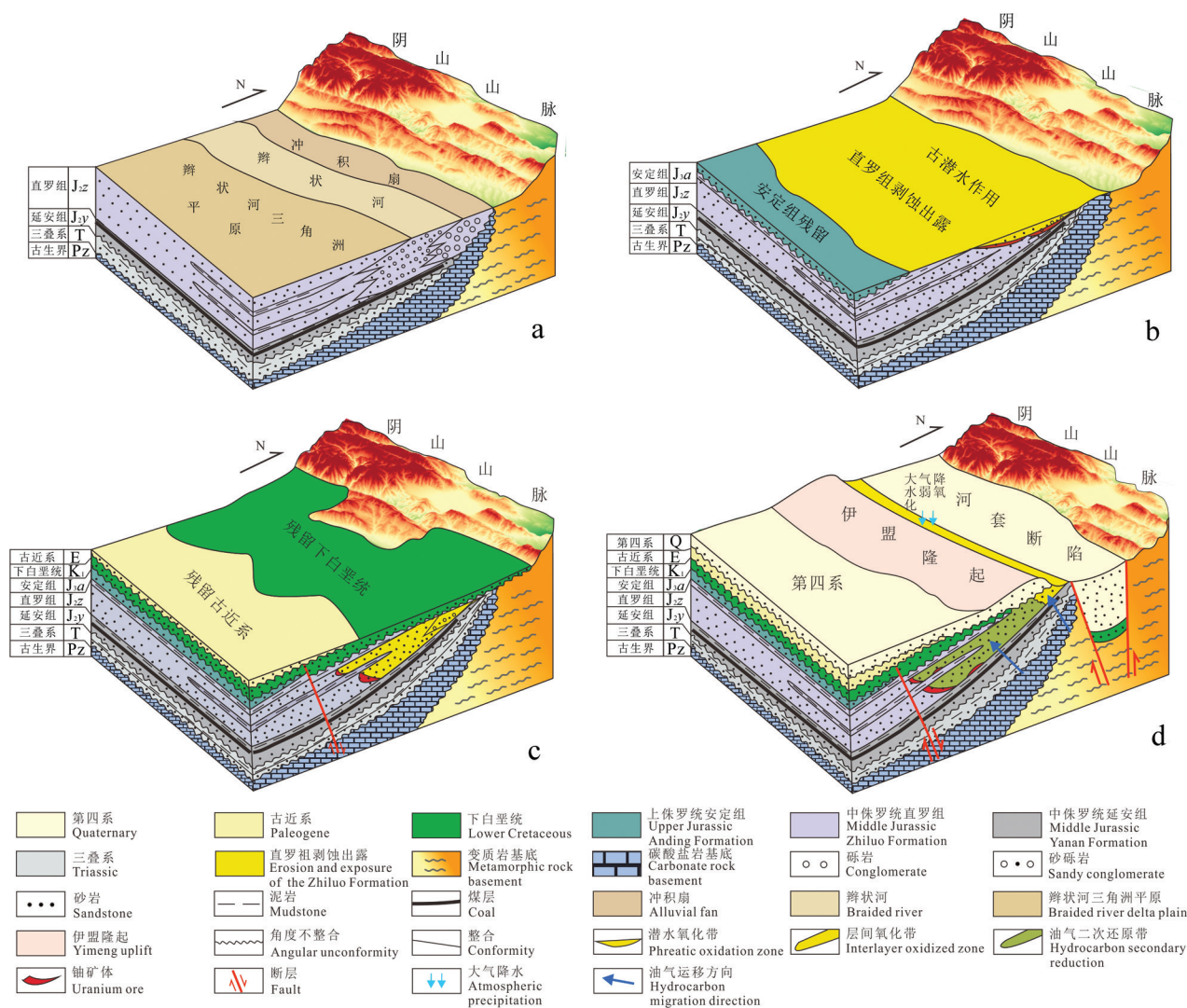


图6 鄂尔多斯盆地东北部砂岩型铀矿叠合成矿模式

a. 预富集阶段; b. 潜水氧化作用阶段; c. 层间氧化作用阶段; d. 油气还原加热改造作用

Fig. 6 Superimposed metallogenic model of sandstone-type uranium deposits in Northeast Ordos Basin

a. Pre-enrichment stage; b. Phreatic oxidation stage; c. Interlayer oxidation stage; d. Oil and gas reduction heating transformation

铀建造(如烃源岩、厚大灰黑色泥岩建造),即深部铀源;② 成矿流体:是深部烃源岩、厚大灰黑色泥岩建造在沉积演化过程中受热动力的驱使产生,它是一种富铀和相关金属元素(取决于源岩)及富有机质酸性还原流体;③ 铀的迁移:是流体中有机酸、官能团对铀及共伴生元素产生配位、溶解而进行迁移的;④ 迁移通道:是沟通深部富铀富有机质建造和上部含矿层的断裂构造及相连通的河道或砂体、不整合面、天窗隆起等;⑤ 沉淀富集:是溶解的逆过程,即深部富铀成矿流体进入上部砂岩层中,由于流体的Eh值、pH值改变和温度、压力的降低等物理化学条件的变化,促使铀的沉淀富集成矿。

4 青藏高原碰撞演化对砂岩铀成矿的制约

砂岩铀成矿往往受“构造—建造—改造”的控制,“次造山环境”、稳定的构造斜坡带、有利的沉积建造、长时间多期次的含铀含氧水的渗入以及深部富铀渗出流体,都影响着砂岩型铀矿的发育。天山及分支山脉之间构成的一系列新生代盆地,常常是重要的砂岩型铀矿产出盆地,青藏高原碰撞及隆升演化对这些盆地的构造、沉积建造和后期流体改造等方面具有重要的影响,从而也控制了砂岩铀矿的形成。新生代以来,印度板块与欧亚板块开始碰

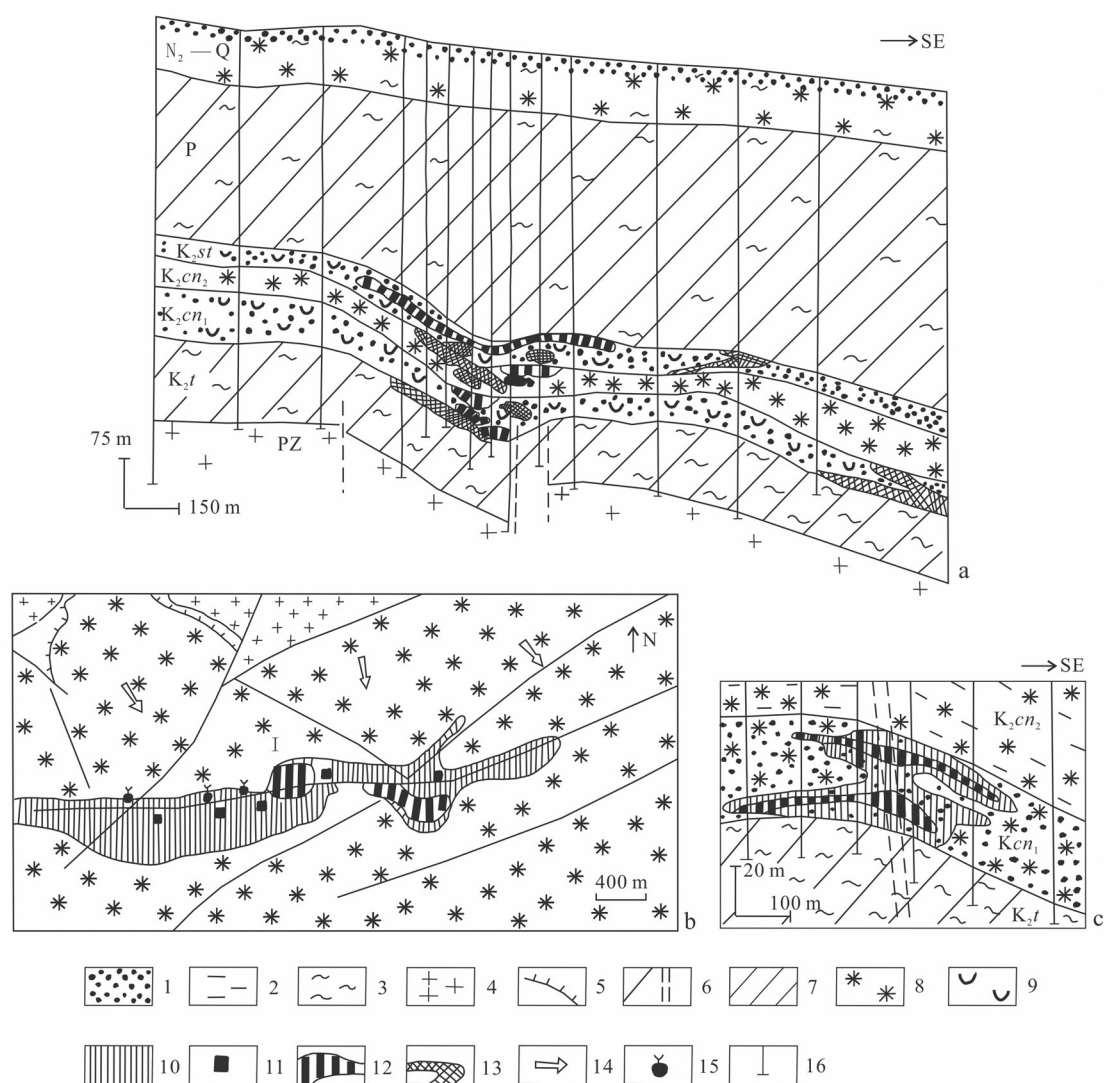


图7 中央克孜库姆肯迪克秋别矿床受断裂构造控制的铀矿体(据赵凤民,2014修改)

a. 矿床岩性-地球化学剖面图; b. 矿床成矿特征示意图; c. 典型铀矿化剖面图

1—砂; 2—粉砂岩; 3—黏土; 4—古生代基底岩; 5—上康尼亚克组出露区; 6—断裂与裂隙带; 7—未发生后生氧化的灰色岩石; 8—原生红色岩石; 9—层状褐铁矿化; 10—次生还原岩石, 含黄铁矿与铀含量增高; 11—强黄铁矿化; 12—渗入型铀矿体; 13—渗出型铀矿体; 14—层间渗入含氧水; 15—含硫化氢上升水排泄区; 16—钻孔

N_2-Q —上新统一第四系; K_2t —土伦组; Pz —古生界; K_2cn_2 —上康尼亚克组; Kcn_1 —下康尼亚克组; P —二叠系

Fig. 7 Uranium ore body controlled by fault in the Central Kizumkendyke Qiube deposit (modified after Zhao, 2014)

a. Lithologic-geochemical profile of the deposit; b. Schematic diagram of metallogenic characteristics of the deposit;

c. Typical uranium mineralization profile

1—Sand; 2—Siltstone; 3—Clay; 4—Paleozoic basement rock; 5—Emerging area of Upper Connac Formation; 6—Fracture and fracture zone; 7—Gray rock without epigenetic oxidation; 8—Primary red rock; 9—Layered limonization; 10—Secondary reduced rocks with increased pyrite and uranium content; 11—Strong pyritization; 12—Infiltrative type uranium ore; 13—Exudative type uranium deposits; 14—Infiltration of oxygenated water between layers; 15—Hydrogen sulfide rising water discharge area; 16—Drillhole

N_2-Q —Pliocene—Quaternary; K_2t —Tulon Formation; Pz —Paleozoic; K_2cn_2 —Upper Connac Formation;

Kcn_1 —Lower Connac Formation; P —Permian

撞,自此青藏高原经历了多阶段、多层次的隆升演化过程,其远程效应使天山造山带再度强烈隆升,天山

及分支山脉之间构成的一系列中生代盆地也进入一个新的发展阶段,形成一系列新构造变形,而这些

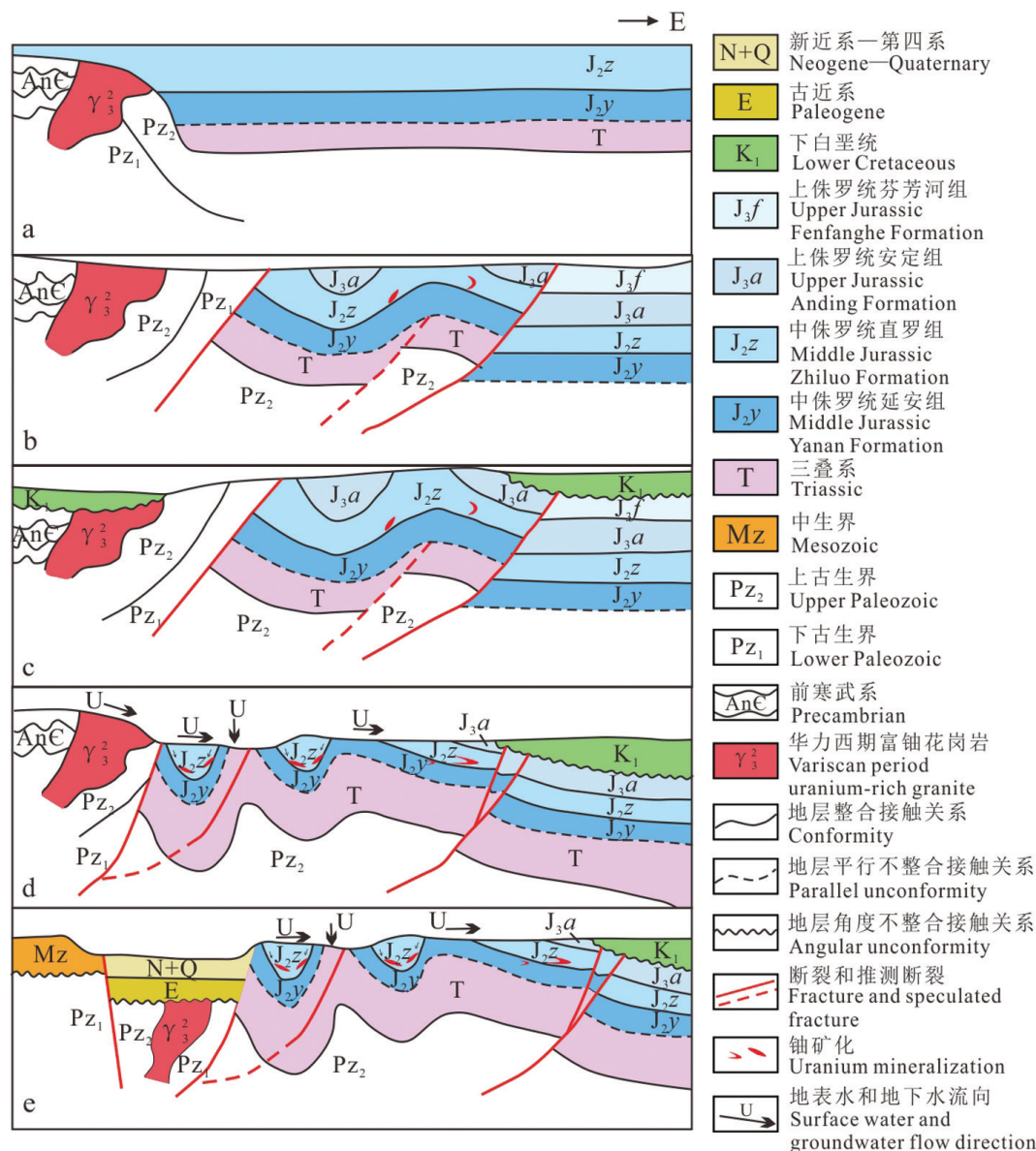


图8 鄂尔多斯盆地西缘褶皱断带铀成矿模式(据郭庆银等,2010修改)

a. 含矿主砂体发育阶段; b. 早期成岩阶段; c. 埋藏阶段; d. 主要成矿阶段; e. 改造保矿阶段

Fig. 8 Uranium metallogenetic model in the fold fault belt of the western margin of the Ordos Basin (modified after Guo et al., 2010)

a. Ore-bearing master sand body development stage; b. Early diagenetic stage; c. Burial stage; d. Main mineralization stage; e. Transformation and ore preservation stage

新构造活动与中国西北部及中亚邻区盆地砂岩铀成矿作用具有时空上的密切联系。

4.1 青藏高原碰撞隆升与砂岩铀成矿事件

青藏高原碰撞隆升演化准确时段存在较大争论,不同区域也具有一定差异,仅青藏高原抬升到现今面貌的起始时限就有 14 Ma、8 Ma、2.5~3.4 Ma 和 0.9 Ma 等多种不同观点。潘裕生(1999)认为,青藏高原的隆升是多阶段、非均匀、不等速过程,是多种机制联合作用的产物,主要可分为 38~45 Ma, 17~25 Ma

与 8~13 Ma, 0~3 Ma 阶段,青藏高原现今的面貌是 3~4 Ma 以来快速抬升的结果(Chung et al., 1998; Yin et al., 2000; Tapponnier et al., 2001; 侯增谦等, 2006a; 2006b; 2006c; 2006d; 王成善等, 2009); 侯增谦等(2006a)根据碰撞造山带成矿理论,将青藏高原碰撞演化分为同碰撞造山阶段(41~65 Ma)、晚碰撞转换阶段(26~40 Ma)、后碰撞伸展阶段(0~25 Ma)等。综合前人研究成果,本文将青藏高原的隆升划分为前碰撞阶段(>65 Ma)、主碰撞阶段(45~65 Ma)、

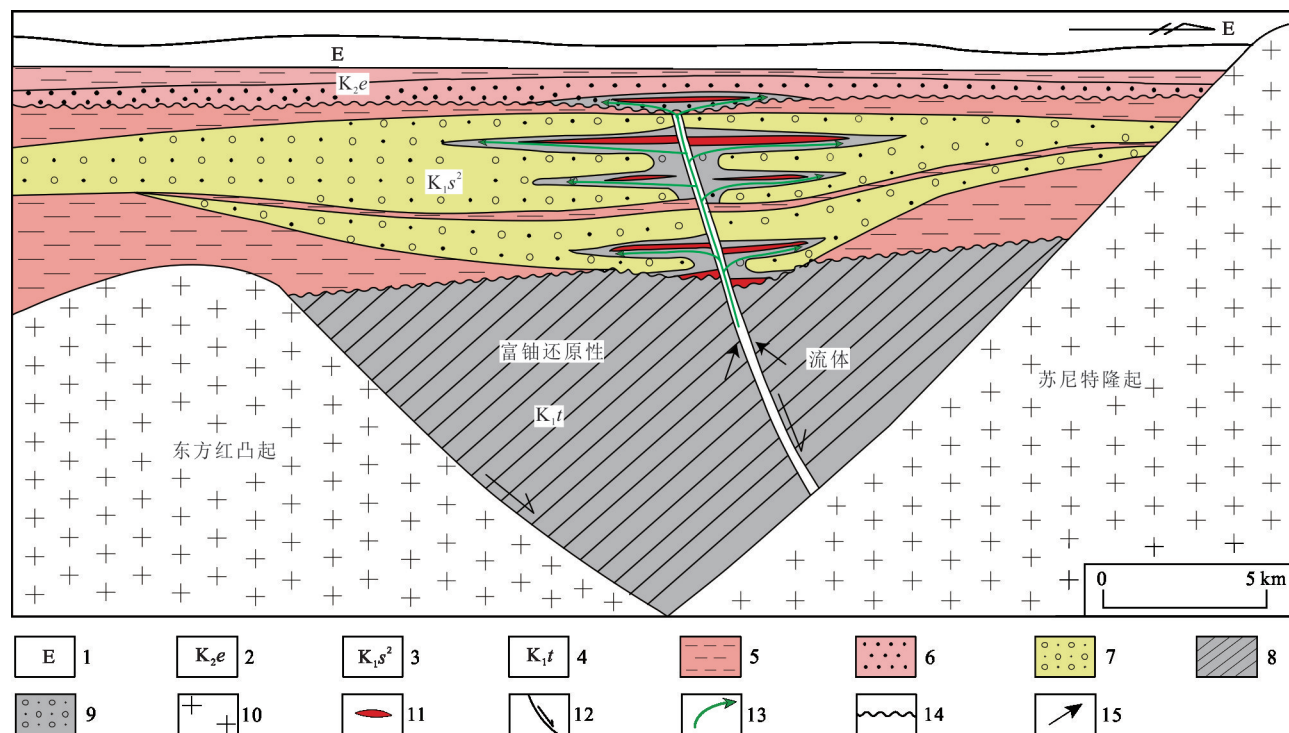


图9 哈达图铀矿床渗出铀成矿模式图(据李子颖等,2022修改)

1—古近系褐黄色泥、砂岩;2—二连组红色泥岩夹砂岩;3—赛汉组上段红杂色砂砾岩夹泥岩;4—腾格尔组—阿尔善组灰色含烃源岩建造;
5—红色泥岩;6—红杂色砂岩;7—黄色砂砾岩;8—灰色富铀含烃源岩建造;9—灰色砂砾岩;10—基底花岗岩;11—铀矿体;12—断裂;
13—深部流体渗出方向;14—角度/平行不整合;15—富铀还原性液体运移方向

Fig. 9 Uranium exudative metallogenic model of Hadatu uranium deposit (modified after Li et al., 2022)

1—Paleogene brown mud, sandstone; 2—Erlian Formation red mudstone with sandstone; 3—Red variegated sand conglomerate with mudstone in the upper part of Saihan Formation; 4—Tenger Formation—Alshan Formation grey source rock Formation; 5—Red mudstone; 6—Red variegated sandstone; 7—Yellow sand conglomerate; 8—Gray uranium-rich source rock construction; 9—Grey sand conglomerate; 10—Basement granite; 11—Uranium ore body; 12—Fracture; 13—Direction of deep fluid seepage; 14—Angular/parallel unconformity; 15—Migration direction of uranium-rich reducing liquid

晚碰撞阶段(26~45 Ma)、隆升阶段(3~25 Ma)和强烈隆升阶段(0~3 Ma)。

4.1.1 前碰撞阶段

前碰撞阶段(>65 Ma)主要发生在前新生代时期,碰撞主要发生在青藏高原的南部,中国西北部及中亚地区盆地主要是接受沉积,隆起山脉遭受剥蚀,也可称为后褶皱造山作用阶段,以地壳构造活动性及其热机制减弱为特征。进一步可主要划分为三叠纪—侏罗纪和白垩纪。

三叠纪—侏罗纪阶段:基本保持微弱的隆升,并形成充填沉积-火山岩的上叠盆地和地堑。早中三叠世,在保留或局部活化的岩浆源处,形成火山岩带或亚碱性的流纹岩、白岗岩的次火山岩带。另外,还发育有富碱的岩浆岩,伴随有与火山岩的反差大的辉长岩-正长岩-花岗岩组合。在继承晚古生代的早

中三叠纪岩浆作用的同时,还发育有晚古生代火山作用,首先是与裂谷作用有关的火山作用。晚三叠世末期,发生了构造运动,当时近东西向的古生代构造被北西向的右行剪切断裂所切割,其位移最大达120 km。其中,一些大的剪切断裂还伴有一系列小断距(0.5~12 km)的右行剪切断裂。所有这些剪切断裂几乎都未伴有岩浆作用,只是在南东地区见有玄武岩脉侵入,侏罗系沉积于裂谷盆地(赵凤民, 2014)。这些盆地都与右行的剪切断裂和逆冲断裂相耦合;产于相对孤立的近断裂拗陷中的三叠系和侏罗系沉积层以高碳质为特征,形成一套灰色岩系,并在盆地可容纳空间持续增加和温暖湿润的古气候阶段形成了煤系地层和富铀烃源岩层,是中国西北部地区层间氧化带砂岩型铀矿重要的找矿目的层,也是一些渗出砂岩铀成矿作用重要的铀源层。

进入白垩纪,以形成普遍较弱的独立沉降构造单元为特征。晚白垩世—古近纪表现为广泛的后陆浅海海侵,古气候转变为干旱,许多沉积盆地区,尤其在中国西北部地区,形成了原生陆相红色建造。

4.1.2 主碰撞阶段

印度-亚洲大陆主碰撞始于65 Ma,延续至45 Ma,相继发育印度板块与亚洲板块大规模陡深俯冲(52~65 Ma)和板片破碎-软流圈地幔物质上涌(42~52 Ma);在空间上形成了藏南前陆冲断带、冈底斯主碰撞构造-岩浆带和藏北陆内褶皱-逆冲带;青藏高原北部及西北部盆山耦合加强,山体抬升、凹陷加深,开始形成较明显的近东西向展布的盆山相隔体系。在盆地中形成了厚度巨大的沉积建造和不同的隆凹格局。在隆起区,尤其是在盆地边缘,有利含矿建造出露,接受含氧大气降水渗入,开始形成层间氧化带型砂岩铀矿。

4.1.3 晚碰撞阶段

这一阶段是印度板块与亚洲板块碰撞高峰时期,时间跨度在25~45 Ma阶段,青藏高原平均隆升高度为0~0.9 km(彭建兵等,2004),特提斯海全部退出青藏高原及滇西地区,转为陆内环境,气候由炎热向湿热转化。伴随喜马拉雅地块与拉萨地块的碰撞和构造隆升,在青藏高原边缘,尤其是中国西北部及邻区集中出现一系列构造抬升运动,是层间氧化带砂岩铀矿发育时期。晚渐新世—早中新世(25~30 Ma),中亚东南部地区造山作用加强,在盆地中形成粗碎屑岩层。在距造山运动较远的台坪地区造山作用相对要弱的多,仅出现褶皱构造,例如卡拉套巨型背斜的抬升和相邻的苏扎拗陷的沉降,楚—萨雷苏、锡尔达林台向斜发生弯曲。这一强碰撞抬升同样对天山地区产生巨大影响,是山间盆地抬升与剥蚀的主要时期,不仅使同期盆地逐渐萎缩、消亡或被分割、沉积层变薄、盆地及盆缘区多次抬升降起,在盆地盖层中形成多个沉积间断,使早期盆地遭受剥蚀、风化淋滤改造,对盆地潜水或层间氧化作用的发育极为有利。

伊犁盆地南缘23~45 Ma期间,遭受过一次挤压-夷平作用,侏罗系各旋回砂体暴露至地表,遭受含氧含铀介质的改造,形成伊犁盆地南缘早期砂岩型铀矿化,为后期层间氧化带砂岩型铀矿化再富集打下了基础。吐哈盆地西南缘受印度—欧亚板块碰撞远程作用的影响也发生相对快速构造隆升,源区富铀岩体再次隆升、剥蚀,外部铀源提供数量变大。

含矿层侏罗系发生适度抬升和掀斜,为含铀含氧流体提供动力,也促使铀进一步富集。强烈的构造变形导致了吐哈盆地博格达山地区的急剧隆升和地层大面积剥蚀,其山前分布的中生代沉积物也被剥蚀,甚至完全剥蚀,沉积物被运移至盆地北缘且深埋,形成巨厚的沉积物质,使得含铀含氧水不易运移至目的层。

始新世开始,鄂尔多斯盆地主要受来自西南部特提斯构造域的挤压和东南部环太平洋板块北西向的俯冲作用,盆地周缘形成裂陷盆地,相应阴山山脉、贺兰山脉及秦岭山脉隆升,这期构造事件对鄂尔多斯盆地砂岩型铀矿成矿作用有着重要意义。同时,该构造事件造成盆地深部流体向上迁移,对在红杂色白垩系中形成渗出砂岩铀矿具有重要作用。

4.1.4 隆升阶段(3~25 Ma阶段)

这一构造活动阶段主要发生在3~25 Ma时期,青藏高原平均隆升高度为1~2 km(彭建兵等,2004),以碰撞较快的构造隆升活动为特点,使地槽阶段形成的富铀地层、岩浆岩内预富集的铀和地台阶段形成的富铀砂岩层中的铀,产生强烈活化和转移,并在中生代盆地固结程度差、透水性能好的砂岩层内,形成渗入层间氧化带砂岩型铀矿床,并伴有热流体叠加成矿的复成因砂岩型铀矿床。这些砂岩型铀矿的成矿年龄,不论其赋矿层位的时代,主成矿年龄均<25 Ma,与构造活化时限合拍,是形成层间氧化带砂岩铀矿的主要时期。同时,深部还原性流体向上迁移,对原来氧化的地层进行次生还原改造,形成独特的铀矿化受灰绿色和灰色砂岩控制,如鄂尔多斯盆地东北部砂岩铀矿(图6d)。

晚渐新世末,中亚地区“巴克斗卡雷”构造期出现了持续的(7~9 Ma)沉积间断(图10a~c),为楚—萨雷苏和锡尔达林铀成矿区发生区域性层间氧化作用创造了有利地质条件(赵凤民,2014)。该时期气候中等干燥,天山区冲积相发育,地下水补给区和渗流面积最大。中-晚中新世“托尔盖”和“帕夫洛达尔”构造活化为下一个后生成矿创造了地质环境。此时,在楚—萨雷苏洼地西缘—别特巴克拉是相对有利的地区,区内中新统为冲积扇相,伴有含铀含氧水的强烈渗入。由于成矿时代上的相近,且没有区分晚渐新世和中新世的可靠界限,铀沉淀成矿期便合并为统一的晚渐新世—中新世后生成矿阶段,总体上可划分为晚渐新世—中新世(后生成矿主要阶段)

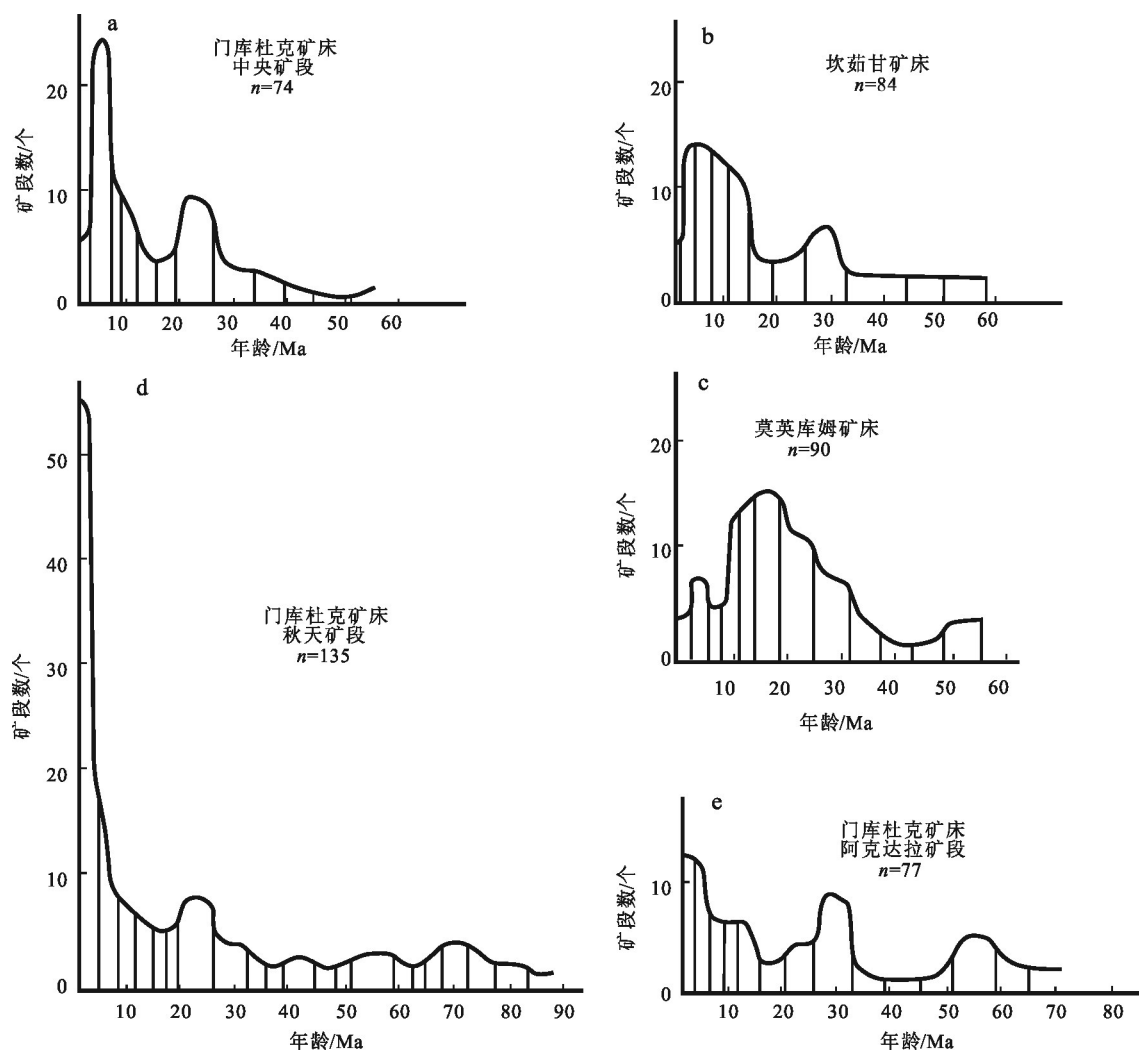


图10 中亚地区典型渗入型铀矿床年龄数据图(据赵凤民,2014修改)

a. 门库杜克矿床10号矿体近东西向身段(184层、176层); b. 乌伐纳斯-坎茹甘层1~6 k矿体; c. 乌尤克层1y矿体; d. 门库杜克层(620层、32~15层)近南北向矿体前锋部分; e. 扎尔巴克层(482层)

Fig. 10 Age data of typical infiltration type uranium deposits in Central Asia (modified from Zhao, 2014)

a. Near East-West section of No. 10 orebody of Menkuduk deposit (184 layer, 176 layer); b. 1~6 k orebody in Uwanas-Kanrugan layer; c. 1y ore body of Wuyuk layer; d. Menkuduk layer (620, 32~15 layers) near the South-North orebody forward part; e. Zalbak layer (482 layer)

和晚上新世—第四纪(早先形成的矿化发生再富集)(图10a~e)2个阶段。

作为印度板块继续向北推挤与欧亚大陆发生碰撞的远程效应,该时期构造运动所引发的砂岩铀矿成矿作用显然也波及到中国的西构造域,导致西构造域伊犁盆地、吐哈盆地等新一轮的层间渗入铀矿成矿作用,通过叠加富集,形成较高品位的铀矿床。在伊犁盆地,除了形成砂岩型铀矿床之外,还伴有煤岩型铀矿床产出,且煤岩型铀矿形成与区内砂岩型铀矿有密切联系。古近纪—新近纪持续性的区域隆升和地层掀斜,造成吐哈盆地十红滩铀矿床

第二次层间氧化成矿作用,对应其成矿年龄24 Ma和7.0~8.8 Ma(A.И. 别列里曼,1995;M.Φ. 马克西莫娃等,1996)。

4.1.5 强烈隆升阶段

这一时期是青藏高原强烈隆升阶段,发生在3 Ma至现在,青藏高原平均隆升高度为2~5 km(彭建兵等,2004),对中亚及中国西北部盆地也产生深远影响。该阶段天山大幅度隆起,中亚地区部分盆地早先形成的层间氧化带前峰向前移动,导致铀元素再度活化、迁移和重新富集,并发生多层层间氧化还原带铀矿。对于伊犁盆地,上新世末期—早更新

世新构造水平挤压活动使盆地内断裂活化及含矿层掀斜,为地下水的排泄提供了通道,形成了良好的补给-径流-排泄循环体系,有利于层间渗入水在透水性岩层中的运移和砂岩型铀矿的成矿或叠加富集,形成了较高品位或多层位产出砂岩铀矿床。

同时,该阶段隆凹幅度大,山前表现挤压挠曲沉降作用,盆地整体表现为下沉,并快速堆积了一套巨厚的磨拉石建造,对早期盆地沉积起到叠合理深作用,从而不利于盆地后期地下水的大范围渗入,造成一些地段对砂岩型铀成矿不利。在盆地的局部边缘地区可发生进一步的叠加改造,而形成富铀矿石,如伊犁盆地富铀矿矿石成矿时代为 1 Ma,甚至现在成矿作用还在进行。

4.1.6 砂岩铀矿床时间变化规律

中国西部及其邻区铀矿床形成的开始时间与赋矿岩层时代受地质构造环境影响,具有一定变化规律(图 11)。中国西北部盆地的矿化期次集中在 3~45 Ma。该阶段青藏高原进入晚碰撞阶段-隆升阶段,铀矿化作用在北西部盆地持续时间较长,3 Ma 至今,青藏高原进入强烈隆升阶段。由东至西成矿时代有变新的趋势,即东部的铀矿化作用持续时间较长,而西部有变短的趋势。在靠近中国边境伊犁、伊塞克盆地等山间与河谷盆地内,赋矿围岩主要是侏罗系,少量上白垩统。最早的铀成矿年龄(51~61.5 Ma)见于中国伊犁盆地,向西至

楚—萨雷苏、锡尔—达林、中央克孜尔库姆盆地,赋矿围岩主要为上白垩统、上中新统及个别第四纪河谷泥炭,最早的铀成矿年龄为 20 Ma;西端滨里海地区,赋矿围岩则主要为新近系,在第四系内也发育少量蒸发岩型铀矿点。新生代后,印度板块向北强烈挤压的新构造运动,首先引起该区东部的地壳隆升,形成地下水的补、径、排体系,并伴随外生渗入铀成矿作用。随着挤压强度的持续与增强,构造活化区不断向西扩展,铀成矿作用地区也不断向西部扩大。

在中亚地区内,也有类似的变化规律。新构造运动引起的造山作用在楚—萨雷苏、锡尔达林和中央克孜尔库姆 3 个盆地内发生的时间和强度并不完全相同,有由南东而北西逐渐变晚的趋势,这与新构造运动是由南东逐渐往北西方向扩展有关(图 11)。中央克孜尔库姆盆地主要受南天山隆升影响,最南面的齐阿特金—齐拉布拉克盆地造山作用始于下中新世初,而其最西北面的布肯套盆地到上新世初才受到新构造运动的影响。楚—萨雷苏、锡尔达林盆地主要受中天山隆升影响,则始于上中新世初期。外生渗入型铀成矿作用亦具有相似的趋势。另外,由于受南面造山作用,在中央克孜尔库姆盆地南面形成大型山前拗陷盆地,大幅度的沉降,伴随含碳氢化合物富铀富有机流体的渗出作用,形成叠合复成因砂岩铀矿。

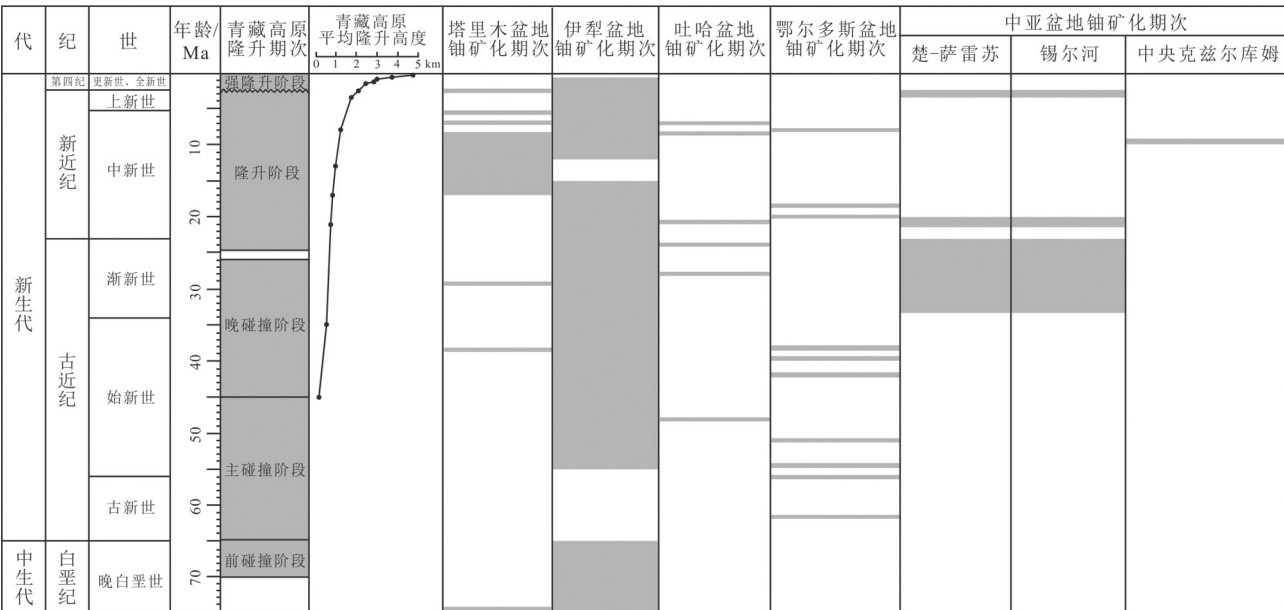


图 11 青藏高原隆升期次与北西部盆地铀矿化期次对比图

Fig. 11 Comparison between the uplift period of the Tibetan Plateau and the uranium mineralization period of the north-western basin

4.2 青藏高原碰撞隆升对砂岩铀成矿作用影响分析

4.2.1 青藏高原碰撞隆升使铀源活化

青藏高原整体快速隆升使中国西北部和中亚地区已被准平原化的古造山带复活,形成新的盆山体系,活化造山带中的含铀岩层或岩体随着不断隆升剥蚀,为盆地提供源源不断的铀源,如中亚造山带前寒武纪地层片麻岩、早古生代中酸性岩浆以及晚古生代海相碳硅质页岩,是中亚产铀盆地的主要铀源;天山造山带晚古生代中酸性火山岩是伊犁盆地和吐哈盆地的主要铀源。因此,青藏高原阶段隆升及其远程效应的造山运动,加速了含铀岩层或岩体的剥蚀速度,促使铀元素进一步被氧化淋滤出,后随水流进入盆地,所以青藏高原隆升是铀源活化的构造动力。

4.2.2 青藏高原碰撞隆升使盆地抬升掀斜形成稳定补-径-排水动力体系

层间氧化砂岩型铀矿的发生需要稳定的水动力条件,而这往往取决于长期稳定的构造斜坡。环青藏高原巨型盆山体系从内向外构造变形强度、盆山耦合程度具有依次降低的规律。克拉通边缘的单个盆山组合也具有从山前向克拉通方向构造变形强度依次降低,构造变形样式逐渐变得简单、构造变形时间依次变新的规律。受青藏高原隆升作用,中国中西部及中亚邻区产铀盆地主要发育为不对称的向斜结构,古造山带复活一侧表现为强烈的逆冲冲断特征,盆地沉积构造层也随之发生强烈的掀斜变形,不利于稳定层间水动力的形成;远离冲断构造的盆地另一侧,受前陆构造的影响发生挤压弱掀斜作用,形成稳定的、弱变形的单斜构造,为层间水动力的形成提供了有利条件。环青藏高原盆山体系中的盆地均有上述的演化特征,同时也说明受青藏高原隆升使盆地逆冲冲断一侧对铀成矿作用具有破坏性的改造,不利铀成矿作用的发生;而盆地另一侧则为建设性的改造,形成单斜隆升剥蚀-层间渗入体系,有利于铀成矿作用的发生。

4.2.3 青藏高原碰撞隆升导致气候变迁形成易于铀迁移的干旱气候

砂岩型铀矿的形成与古气候关系密切。干燥炎热的气候地表植被发育差,有机质和其它还原物质少,使地表水中的游离氧消耗少,有利于富铀含氧地下水和层间氧化带的形成。

受青藏高原碰撞隆升的影响,中亚地区从中新世至今气候逐渐变得更加干旱炎热,是缺乏有机质

的红色地层形成时期。该时期伴有荒漠的地貌景观,土壤及潜水中的有机质含量极低,大气中大量的游离氧以及铀源层(体)中被氧化的活性铀随大气降水沿早期形成的浅色、高渗透性的白垩系、古近系砂岩层渗透,促使深部层间氧化带持续向前发育,并使铀元素在适当的氧化-还原部位还原、沉淀,从而导致矿床的形成(简晓飞等,1996)。渐新世气候骤然变冷到中新世气候炎热干旱的时期,正是中亚地区铀矿床形成的主要时期。

中国中西部地区中新世以来,构造-地貌格局由东高西低转化为西高东低4个阶梯状,导致地表水和地下水由总体自东向西运移转化为由西向东迁移的总体趋势。同时,由于喜马拉雅山的强烈隆升,阻隔了印度洋温湿气候对中国中西部内陆的影响,中国大陆的中间地带均处于干旱、半干旱气候带。尤其到上新世干旱气候区仅缩小发育在内蒙古西部和西北五省区。这期间出现了鄂尔多斯、潮水、河套、北山、柴达木、吐哈、塔里木、准噶尔等内陆干旱盆地(吴柏林,2005)。中新世及上新世也是天山造山带山间盆地砂岩型铀矿床的重要成矿期。

4.2.4 青藏高原隆升与油气逸散作用

中国西北部及中亚邻区盆地的油气生排烃明显受控于青藏高原的隆升。青藏高原的隆升使这些盆地普遍发育为前陆盆地,在前陆冲断一侧沉积了巨厚的磨拉石建造。这种快速堆积导致下部烃源岩深埋增温,迅速进入生排烃高峰或高温裂解生气阶段。在构造挤压下,天然气沿地层或断层上倾方向运聚或逸散,并导致铀成矿作用中普遍存在油气的参与。目前来看,油气参与铀成矿作用主要有3种方式:首先,油气逸散与铀成矿作用同期发生,如中亚乌兹别克斯坦中央克兹尔库姆铀矿省的研究证实,油气还原流体(主要是硫化氢和氢气)上升后与含铀、含氧的地下水直接反应,促进铀的富集成矿;其次,油气逸散早于铀成矿作用,此时油气可在铀成矿作用之前进入容矿层,增加还原容量,为氧化还原作用的发生提供必要的还原化学环境,尤其对一些红色和杂色岩层更加有利;最后,若油气逸散晚于铀成矿作用,则表现为“保矿”作用。例如,鄂尔多斯东北缘中侏罗统直罗组铀成矿区就发育了明显早期的古层间氧化带和后期油气还原蚀变特征。此外,青藏高原的隆升也为深部富铀富有机流体的渗出成矿创造了条件(李子颖等,2022;2024),对在

白垩纪及其以后的红色地层中形成渗出砂岩铀矿具有重要作用。

4.3 青藏高原隆升对铀成矿作用类型和产出的控制作用

4.3.1 青藏高原隆升对构造活动及铀成矿地质条件的影响

青藏高原隆升的远程效应造成了中国西北部盆地南北向的挤压,对周缘造山系统如天山、昆仑山都造成了一定的影响,这些挤压作用导致山脉的隆升和剥蚀,影响中亚地区盆地结构、沉积建造以及铀元素的迁移,但不同地区的周缘造山带的隆升和剥蚀在强度上有所差异。

印度板块—欧亚板块碰撞的远程效应导致中生代昆仑山和天山的暴露和剥蚀。昆仑山自渐新世以来经历了极缓慢的隆升阶段(5~15 Ma),较快的隆升阶段(3~5 Ma)和加速隆升阶段(3 Ma至今)。东昆仑中新世早期(~22 Ma)至风尘口组(8.1~15.3 Ma)期间平均剥蚀速率为220~450 m/Ma,中新世早期(~17.5 Ma)至碱土梁组沉积(2.5~8.1 Ma)期间的平均剥蚀速率为200~320 m/Ma(周波,2019)。昆仑山山前地带1.66~4.15 Ma间总共抬升了1380 m,平均抬升速率550 m/Ma,1.66 Ma以来抬升了5140 m,平均抬升速率为3190 m/Ma(柏道远等,2003;2007)。晚上新世—早更新世,西昆仑山的最低隆升速率为210~250 m/Ma,100 ka以来的隆升速率为1500 m/Ma(潘家伟等,2007;2013)。在东天山,始新世中期(约(45±5)Ma)剥蚀速率加快(李丽等,2008),晚白垩世—早新生代中期隆升的平均速率为183 m/Ma(朱文斌等,2007),吐哈盆地南缘晚白垩世—始新世最大剥蚀速率达到270~580 m/Ma,12~20 Ma以来隆升相对缓慢,剥蚀速率为23~50 m/Ma(刘红旭等,2014)。多个剖面显示北天山的最近一次暴露事件发生在10 Ma,0~18 Ma期间隆升速率最大,视隆升速率为71.7 m/Ma(姚志刚等,2010),而中天山的磷灰石裂变径迹显示在46 Ma存在一次快速剥蚀(吕红华等,2013)。低温热年代学研究揭示南天山的快速剥蚀发生在渐新世末期—中新世中期(约(20±5)Ma),库车和阳霞地区中新世隆升速率为139~199 m/Ma(杨树锋等,2003),库鲁克塔格地区中新世隆升速率在200~260 m/Ma(朱文斌等,2007),库车坳陷30 Ma以来剥蚀速率为70 m/Ma(贾承造等,2003;杜治利等,2007)。

根据天山、昆仑山山脉的隆升、剥蚀速率显示位

于青藏高原北缘的昆仑山隆升速率明显大于天山的隆升速率,对青藏高原隆升的响应更明显,而西天山的隆升和剥蚀速率要比东天山快,说明西天山受青藏高原隆升的影响较大,具有更强的构造作用。

4.3.2 青藏高原隆升对铀成矿作用类型和产出的控制作用

在沉积建造方面,中亚地区在中新生代广泛遭受海侵,晚白垩世—古近纪海侵规模较大,中国塔西南地区也遭受部分海侵,而东北部发育陆相冲积扇-辫状河沉积,形成了海陆交互的沉积建造,发育大型滨海三角洲沉积,构成多旋回“泥-砂-泥”结构为砂岩型铀矿提供了良好的储铀空间。中国西北部伊犁、吐哈、准噶尔和鄂尔多斯等盆地砂岩型铀矿主要集中在中下侏罗统,沉积建造形成于弱伸展拗陷期,盆地四周一般发育较为河流-三角洲沉积体系,形成有利的一套含煤碎屑岩建造。

青藏高原隆升对铀成矿地质条件有较大的影响,进而制约铀成矿作用类型和产出。中亚地区构造变形相对较弱,盆地未遭受强烈逆冲破坏,盆缘的斜坡带基本保留而稳定,为形成渗入的层间水动力创造了条件。青藏高原强烈碰撞阶段(第四纪),同样受青藏高原的快速隆升,天山山脉也急剧隆升,中亚地区大卡拉套山脉的抬升把楚萨雷苏和锡尔达林盆地分隔开来,在山前沉积了磨拉石主造山的特征,但强度没有中国中西部的前陆逆冲作用强,对构造斜坡的破坏作用稍弱,更多的是强化了层间水动力机制,使铀矿化再分配和再沉淀,部分地段叠加形成品位较高的砂岩铀矿。中国西北部砂岩型铀矿主要产于鄂尔多斯盆地、吐哈盆地、银额盆地和伊犁盆地。从盆地类型来看,塔里木盆地和鄂尔多斯盆地是在前寒武系基底上多阶段发育起来的大型叠合盆地,都经历中生代—古近纪断陷-拗陷或前陆-拗陷沉积阶段和新近纪以来的前陆盆地演化阶段,有较好的铀源、含矿围岩以及后生氧化还原和渗出砂岩铀成矿作用窗口期,但受青藏高原隆升影响较大的昆仑山山前构造活动强烈,总体表现形式为大型的造山隆起及降幅很大的深拗陷,且褶皱断裂发育,已形成的铀矿体多已破坏,塔里木盆地北部逆冲构造带上,铀矿床(点)均具有破坏残留的特征,产状复杂,体现后期构造改造强烈的特征。塔里木盆地边缘构造运动相对弱的地区和局部相对稳定区是砂岩型铀矿选区的重点,天山周围地区有一定深

度的砂岩型铀矿是下一步勘探的重点。近年来在准噶尔盆地也有所突破,塔里木和柴达木盆地砂岩型铀矿从层位和类型上略有不同,真正意义上层间氧化带型砂岩铀矿还未突破,渗出砂岩型铀矿潜力和前景较大。

5 结 论

(1) 青藏高原碰撞隆升效应形成了中国西北及中亚邻区主要以北西或近东西向分布的盆山体系,为砂岩铀矿的形成提供了空间和成矿动力学条件。青藏高原碰撞隆升演化与盆地结构、建造改造使中国西北部沉积盆地具有不同的结晶基底特征,多为叠合盆地。

(2) 中国西北部盆地沉积建造主要是陆相沉积,特别是新生代沉积厚度大;侏罗纪沉积以潮湿环境为主,白垩纪及以后以干旱、半干旱为主;较强烈的构造作用使盆缘侏罗系抬升或出露,侏罗系成为中国西北部盆地渗入氧化还原砂岩主要含矿层位,而白垩纪和新生代层位则有可能成为渗出砂岩铀矿主要层位。中亚产铀盆地基底固结较晚,为下古生界或上古生界褶皱岩系,沉积建造以海-陆交互为主,形成了较稳定规模大的“泥-砂-泥”结构,构造改造作用不是很强,为“次造山”特征,这些特点为大规模砂岩铀矿形成奠定了基础。

(3) 由于不同地区经历不同的地质构造演化,中国西北部和邻区中亚盆地不同类型砂岩铀矿的成矿流体既有渗入,也有渗出作用,形成了复杂的多种不同类型的砂岩铀矿,主要有层间氧化带型、叠合复成因型、构造活动带型及渗出型。

(4) 青藏高原碰撞演化对中国西北部及中亚邻区盆地砂岩铀成矿的制约。砂岩铀矿的形成受“构造-建造-改造”的耦合控制。受青藏高原影响较大的昆仑山山前地区铀矿体易受到破坏,较为复杂的产状和大埋深导致开采存在难度,而构造活动较弱地区总体较为稳定,易形成品位较高的砂岩型铀矿。青藏高原碰撞隆升演化对砂岩铀矿形成具有重要的制约作用,中亚地区受青藏高原隆升的远程效应,构造活动相对较弱,浅层的砂岩型铀矿是勘探的重点。中国环青藏高原造山带受影响较大,浅部和深部砂岩铀矿均是找矿方向。

致 谢 感谢中核集团和中核铀业(中国核工

业地质局)的大力支持,审稿专家给出了诸多宝贵的意见,在此表示衷心的感谢!

References

- Bai D Y, Meng D B, Liu Y R and Ma T Q. 2003. Apatite fission-track records of the tectonic uplift of the central segment of the Kunlun Mountains on the northern margin of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *China Geology*, 30(3): 240-246(in Chinese with English abstract).
- Bai D Y, Xiong Y W and Liu Y R. 2007. The forming ages and uplift size of the middle Kunlun mountain-based on study of planation surface and apatite fission-track ages[J]. *Resources Survey and Environment*, 28(1): 5-11(in Chinese with English abstract).
- Bird P. 1991. Lateral extrusion of lower crust from under high topography in the isostatic limit[J]. *Journal of Geophysical Research*, 96 (B6): 10275-10286.
- Chen Y, Li S, Liu J, Jiang S, Liu Y and Peng Y. 2023. Microplate boundaries and patterns in the southern Tibetan Plateau revealed by gravity and magnetic data[J]. *Tectonophysics*, 856: 229858.
- Chi X G, Li C, Jin W, Liu S and Yang R H. 1999. Spatial-temporal evolution of Cenozoic volcanism and uplifting in North Tibet[J]. *Geological Review*, 45(Supp.): 978-986(in Chinese with English abstract).
- Chi X G, Li C, Liu S and Yang R H. 2000. Relation between rapid uplifting and gravitational equilibrium, tectonics and thermodynamic effect in Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Earth Science Frontiers*, (Supp.): 336-338.
- Chung S L, Lo C H, Lee T Y, Zhang Y Q, Xie Y W, Li X H, Wang K L and Wang P L. 1998. Diachronous uplift of the Tibetan plateau starting 40?Myr ago[J]. *Nature*, 394(6695): 769-773.
- Cui Z Z. 1987. Characteristics of deep-seated geology in the Qinghai-Xizang(Tibet) Plateau and mechanism of its formation[J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences*, (3): 4-18(in Chinese with English abstract).
- Deng W M. 1998. Cenozoic intraplate volcanic rocks in the northern Qinghai-Tibet Plateau[M]. Beijing: Geology Press(in Chinese).
- Dewey J F, Shackleton R M, Chang C F and Sun Y Y. 1988. The tectonic evolution of the Tibetan Plateau[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London(Series A)*, Mathematical and Physical Sciences, 327(1594): 379-413.
- Ding L, Kapp P, Cai F L, Garzione C N, Xiong Z Y, Wang H Q and Wang C. 2022. Timing and mechanisms of Tibetan Plateau uplift[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 3(10): 652-667.
- Du Z L, Wang Q C and Zhou X H. 2007. Mesozoic and Cenozoic uplifting history of the Kuqa-South Tianshan basin-mountain system from the evidence of apatite fission track analysis[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 26(5): 399-408(in Chinese with English abstract).
- England P and McKenzie D. 1982. A thin viscous sheet model for continental deformation[J]. *Geophysical Journal of the Royal Astro-*

- nomical Society, 70(2): 295-321.
- England P and McKenzie D. 1983. Correction to: A thin viscous sheet model for continental deformation[J]. *Geophysical Journal International*, 73(2): 523-532.
- England P C and Houseman G A. 1988. The mechanics of the Tibetan Plateau[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. (Series A), Mathematical and Physical Sciences*, 326 (1589): 301-320.
- Fan L G, Meng, Q R, Wu G L, Wei H H, Du Z M and Wang E. 2019. Paleogene crustal extension in the eastern segment of the NE Tibetan plateau[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 514: 62-74.
- Fang S H, Guo Z J, Zhang Z C and Wu C D. 2004. Discussion on Mesozoic-Cenozoic evolution of Tianshan and its adjacent basins[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 40(6): 886-897(in Chinese with English abstract).
- Fang X M. 2017. Phased uplift of the Tibetan Plateau[J]. *Science & Technology Review*, 35(6): 42-50(in Chinese with English abstract).
- Fu R S, Li L G, Huang J H, Xu Y M and Chang Y H. 1998. Numerical simulation of the three step uplift model of the Tibet Plateau[A]. *Commemoration of academic papers collection for the 50th anniversary of academic work of academician Liuguangding[C]*. 15p (in Chinese with English abstract).
- Fu R S, Huang J H, Li L G and Chang Y H. 2000. Numerical simulation of the three-step uplift model of the Tibet Plateau[J]. *Earth Science Frontiers*, 7(4): 588-596(in Chinese with English abstract).
- Gao J, Long L L, Klemd R, Qian Q, Liu D Y, Xiong X M, Su W, Liu W, Wang Y T and Yang F Q. 2009. Tectonic evolution of the South Tianshan orogen and adjacent regions, NW China: Geochemical and age constraints of granitoid rocks[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 98: 1221-1238.
- Golonka J. 2004. Plate tectonic evolution of the southern margin of Eurasia in the Mesozoic and Cenozoic[J]. *Tectonophysics*, 381(1-4): 235-273.
- Guo Q Y. 2010. Tectonic evolution at the western margin of Ordos Basin with respect to metallogenesis of sandstone type uranium deposits[D]. Supervisor: Zhou M F and Yan D P. Beijing: China University of Geosciences Beijing(in Chinese with English abstract).
- He F, Li Z Y, Liu X Y, Zhang Z L, Wang L H, Liu C H, Zhang Y, Qiu L F and Han M Z. 2023. Study on the metallogenic mechanism of Telaaobao occurrence in the Lower Cretaceous, northwestern Ordos Basin[J]. *Uranium Geology*, 39(6): 859-874(in Chinese with English abstract).
- Hou Z Q, Mo X X, Yang Z M, Wang A J, Pan G T, Qu X M and Nie F J. 2006a. Metallogenesis in the collisional orogen of the Qinghai-Tibet Plateau: Tectonic setting, tempo-spatial distribution and ore deposit types[J]. *Geology in China*, 33(2): 340-351(in Chinese with English abstract).
- Hou Z Q, Pan G T, Wang A J, Mo X X, Tian S H, Sun X M, Ding L, Wang E Q, Gao Y F, Xie Y L, Zeng P S, Qing K Z, Xu J F, Qu X M, Yang Z M, Yang Z S, Fei H C, Meng X J and Li Z Q. 2006b. Metallogenesis in Tibetan collisional orogenic belt: II. Mineralization in late-collisional transformation setting[J]. *Mineral Deposits*, 25(5): 521-543(in Chinese with English abstract).
- Hou Z Q, Qu X M, Yang Z S, Meng X J, Li Z Q, Yang Z M, Zhen M P, Zhen Y Y, Nie F J, Gao Y F, Jiang S H and Li G M. 2006c. Metallogenesis in Tibetan collisional orogenic belt: III. Mineralization in post-collisional extension setting[J]. *Mineral Deposits*, 25(6): 630-651(in Chinese with English abstract).
- Hou Z Q, Yang Z S, Xu W Y, Ding L, Gao Y F, Dong F L, Li G M, Qu X M, Zhao Z D, Jiang S H, Meng X J, Li Z Q, Qin K Z and Yang Z M. 2006d. Metallogenesis in Tibetan collisional orogenic belt: I. Mineralization in main collisional orogenic setting[J]. *Mineral Deposits*, 25(4): 337-358(in Chinese with English abstract).
- Jia C Z, Chen H L, Yang S F, Lu H F and Zhou Y Z. 2003. Late Cretaceous uplifting process and its geological response in Kuqa depression[J]. *Acta Petroli Sinica*, 24(3): 1-5+15(in Chinese with English abstract).
- Jian X F and Qin L F. 1996. Preliminary discussion on metallogenesis of the sandstone type uranium deposits in interlayer oxidation zone in Central Asia region[J]. *Uranium Geology*, 12(2): 65-70(in Chinese with English abstract).
- Li J J. 2013. The uplift of the Qinghai-Tibet Plateau and environmental changes in the Late Cenozoic[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Science)*, 49(2): 154-159(in Chinese).
- Li L, Chen Z L, Qi W X, Wang S X, Chen X H, Wu Y P, Gong H L, Wei X C, Yang Y and Li X Z. 2008. Apatite fission track evidence for uplifting-exhumation process of mountain surrounding the Junggar Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(5): 1011-1020(in Chinese with English abstract).
- Li S X, Han X Z, Cai Y Q, Huang J B and Cai G Q. 2006. Metallogenic model and prospecting targets for interlayer oxidation type sandstone-hosted uranium deposits in intermountain basins of the Tianshan orogenic belt[J]. *Mineral Deposits*, 25(Supp.): 241-244 (in Chinese).
- Li Z Y, Fang X H, Chen A P, Ou G X, Xiao X J, Sun Y, Liu C Y and Wang Y. 2007. Genesis of gray-green sandstone in target layer of sandstone type uranium deposit in northern Ordos Basin[J]. *Science in China (Earth Sciences)*, 23(Supp.): 139-146(in Chinese).
- Li Z Y, Fang X H, Chen A P, Ou G X, Sun Y, Zhang K, Xia L L, Zhou W B, Chen Z F, Li M G, Liu Z H and Jiao Y Q. 2009. Superposition metallogenic model of sandstone-type uranium deposit in the northeastern Ordos Basin[J]. *Uranium Geology*, 25(2): 65-70+84 (in Chinese with English abstract).
- Li Z Y. 2019. Uranium mineralization in sandstone in the northern Ordos Basin[M]. Beijing: Geology Press(in Chinese).
- Li Z Y, Qing M K, Cai Y Q, Fang X H, Guo Q Y, Yi C, Xia L L, Sun Y, Zhang Z L and Jia L C. 2020. Metallogenic models and prospective analysis of sandstone-type uranium deposits in Ordos Basin[J]. *Uranium Geology*, 36(1): 1-13(in Chinese with English abstract).
- Li Z Y, Liu W S, Li W T, Li X D, Qing M K, Cai Y Q, Zhang Y L, He

- S, Wu Q B, Qiu L F, Liu C H, Zhu P F, Ji H W and Guo J. 2022. Exudative metallogeny of the Hadatu sandstone-type uranium deposit in the Erlan basin, Inner Mongolia[J]. *Geology in China*, 49 (4): 1009-1047(in Chinese with English abstract).
- Li Z Y, Qing M K, Guo Q Y, He F, Cai Y Q, Zhong J, Liu W S, Qiu L F, Liu C H, Ji H W, Guo J, Lin J R, Li X D, Tian M M, Huang Z X, Yi L S, Wang J X, Liu X Y, Li W T, Zhang Y L, He S, Zhang Z L, Guo Q, Ou G X, Jia L C, He Z B, Wu Y, Xing Z C, Wang W Q, Liu J X, Han M Z and Luo X N. 2024. Metallogenic prediction and exploration indication of exudative sandstone type uranium deposit[J]. *Uranium Geology*, 40(1): 1-15(in Chinese with English abstract).
- Liang X F, Chen L, Tian X B, Chu Y and Li W T. 2023. Uplifting mechanism of the Tibetan Plateau inferred from the characteristics of crustal structures[J]. *Science in China (Earth Sciences)*, 53(12): 2808-2829(in Chinese).
- Liu H X, Yan D P, He J G, Chen F, Gao H L, Suo S X, Wang X, Zhang X, Cao Q Y, Wang Y W and Zhao J. 2014. Apatite fission track evidence for the Mesozoic-Cenozoic tectonic uplift of Aqishan-Yamansu area, East Tianshan: With discussion of tectonic activity and geological disposal of radioactive waste[J]. *Geological Journal of China Universities*, 20(1):81-92(in Chinese with English abstract).
- Lu H Y, Wang X Y, An Z S, Miao X D, Zhu R X, Ma H Z, Li Z, Tan H B and Wang X Y. 2004. Geomorphologic evidence of phased uplift of the northeastern Qinghai-Tibet Plateau since 14 million years ago[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 47(9): 822-833.
- Lu H Y, Wang X Y and Vandenberghe J. 2014. Landform evolution and the uplift of northeastern Tibetan Plateau[J]. *China Journal of Nature*, 36(3): 176-181(in Chinese with English abstract).
- Lü H H, Wang W, Chang Y and Zhou Z Y. 2013. Cenozoic episodic exhumation of the Tianshan range, NW China[J]. *Quaternary Research*, 33(4): 812-822(in Chinese with English abstract).
- Pan G T, Wang L Q, Li R S, Yuan S H, Ji W H, Yin F G, Zhang W P and Wang B D. 2012. Tectonic evolution of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 53: 3-14.
- Pan J W, Li H B, Woerd J V D, Sun Z M, Pei J L, Barrier L and Si J L. 2007. Late Cenozoic morphotectonic features of the thrust belt in the front of the West Kunlun Mountain[J]. *Geological Bulletin of China*, 26(10): 1368-1379(in Chinese with English abstract).
- Pan J W, Li H B, Sun Z M, Si J L, Pei J L and Liu D L. 2013. Late Quaternary uplift of the northwestern Tibetan Plateau: Evidences from river terraces in the Ashikule area, West Kunlun Mountain[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(6): 2199-2210(in Chinese with English abstract).
- Pan Y S, Zhou W M, Xu R H, Wang D A, Zhang Y Q, Xie Y W, Xie T E and Luo H. 1996. Geological characteristics and evolution of the Kunlun Mountains region during the Early Paleozoic[J]. *Science China Earth Sciences*, (4): 337-347.
- Pan Y S. 1999. Formation and uplifting of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Earth Science Frontiers*, 6(3): 153-163(in Chinese with English abstract).
- Peng J B, Ma R Y, Lu Q Z, Li X A and Shao T Q. 2004. Geological hazards effects of uplift of Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Advances in Earth Science*, 19(3): 457-466(in Chinese with English abstract).
- Powell C M and Conaghan P J. 1973. Plate tectonics and the Himalayas[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 20(1): 1-12.
- Qing M K, He Z B, Liu Z Y, Guo Q, Song J Y and Xu Q. 2017. Study on metallogenic environments and prospective direction of sandstone type uranium deposits in Junggar Basin[J]. *Geological Review*, 63(5): 1255-1269(in Chinese with English abstract).
- Shi Y F, Li J J, Li B Y, Yao T D, Wang S M, Li S J, Cui Z J, Wang F B, Pan B T, Fang X M and Zhang Q S. 1999. Uplift of the Qinghai-Xizang (Tibetan) plateau and East Asia environmental change during Cenozoic[J]. *Acta Geographica Sinica*, (1): 12-22(in Chinese with English abstract).
- Sun J M, Liu W G, Liu Z H and Fu B H. 2017. Effects of the uplift of the Tibetan Plateau and retreat of Neotethys Ocean on the stepwise aridification of mid-latitude Asian Interior[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 32(9): 951-958(in Chinese with English abstract).
- Tapponnier P and Francheteau J. 1978. Necking of the lithosphere and the mechanics of slowly accreting plate boundaries[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 83(B8): 3955-3970.
- Tapponnier P, Xu Z Q, Roger F, Meyer B, Arnaud N, Wittlinger G and Yang J S. 2001. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau[J]. *Science*, 294(5547): 1671-1677.
- Wang B, Faure M, Cluzel D, Shu L S, Charvet J, Meffre S and Ma Q. 2006. Late Paleozoic tectonic evolution of the northern West Chinese Tianshan belt[J]. *Geodinamica Acta*, 19(3-4): 237-247.
- Wang C S, Zhao X X, Liu Z F, Lippert P C, Graham S A, Coe R S, Yi H S, Zhu L D, Liu S and Li Y L. 2008. Constraints on the early uplift history of the Tibetan Plateau[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(13): 4987-4992.
- Wang C S, Dai J G, Liu Z F, Zhu L D, Li Y L and Jia G D. 2009. The uplift history of the Tibetan Plateau and Himalaya and its study approaches and techniques: A review[J]. *Geoscience Frontiers*, 16 (3): 1-30(in Chinese with English abstract).
- Wang Q, Zhang P Z, Freymueller J T, Bilham R, Larson K M, Lai X A, You X Z, Niu Z J, Wu J C, Li Y X, Liu J N, Yang Z Q and Chen Q Z. 2001. Present-day crustal deformation in China constrained by global positioning system measurements[J]. *Science*, 294: 574-577.
- Wu B L. 2005. Geology and mineralization mechanism of sandstone-type uranium deposits in the middle and new recent period basins of northwest China[D]. Supervisor: Liu C Y. Xi'an: Northwest University(in Chinese with English abstract).
- Xu Z Q, Li S T, Zhang J X, Yang J S, He B Z, Li H B, Lin C S and Cai Z H. 2011. Paleo-Asian and Tethyan tectonic systems with docking the Tarim Block[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(1): 1-22(in Chinese with English abstract).

- Yang F Q, Geng X X, Yang C D, Zhang Z X, Wang C, Li S N and Li Q. 2024. A review of geological characteristics and time-space distribution as well as prospecting direction of iron ore deposit in Central Asian Orogenic Belt, Xinjiang[J]. Mineral Deposits, 43 (5): 951-978(in Chinese with English abstract).
- Yang S F, Chen H L, Cheng X G, Xiao A C, Zhou Y Z, Lu H X, Jia C Z and Wei G Q. 2003. Cenozoic uplifting and unroofing of South Tianshan, China[J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 39(1):1-8(in Chinese with English abstract).
- Yao Z G, Zhou L F, Gao P, Gao S and She G. 2010. Meso-Cenozoic uplift and exhumation history in the North Tianshan Mountains[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 39(1): 121-126(in Chinese with English abstract).
- Ye Z, Gao R, Li Q S, Xu X, Huang X F, Xiong X S and Li W H. 2018. Eastward extrusion and northward expansion of the Tibetan Plateau—Discussions for the deep processes of the plateau uplift[J]. Chinese Science Bulletin, 63(31): 3217-3228(in Chinese with English abstract).
- Yin A and Harrison T M. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 28: 211-280.
- Zhang P Z, Shen Z K, Wang M, Gan W J, Bürgmann R, Molnar P, Wang Q, Niu Z J, Sun J Z, Wu J C, Sun H R and You X Z. 2004. Continuous deformation of the Tibetan Plateau from global positioning system data[J]. Geology, 32(9): 809-812.
- Zhang Z M and Santosh M. 2012. Tectonic evolution of Tibet and surrounding regions[J]. Gondwana Research, 21(1): 1-3.
- Zhang Z M, Ding L, Zhao Z D and Santosh M. 2017. Tectonic evolution and dynamics of the Tibetan Plateau[J]. Gondwana Research, 41: 1-8.
- Zhao F M. 2014. Uranium geology of Central Asia[M]. Beijing: Research Institute of Uranium Geology(in Chinese).
- Zhong D L and Ding L. 1996. Study on uplift process and mechanism of Qinghai-Tibet Plateau[J]. Science in China (Series D), 26(4): 289-295(in Chinese).
- Zhou B. 2019. The thermal history and uplift-exhumation process of the East Kunlun Orogenic Belt during Meso-Cenozoic time[D]. Supervisor: Dong Y P. Xi'an: Northwest University(in Chinese with English abstract).
- Zhu R X, Zhao P and Zhao L. 2022. Tectonic evolution and geodynamics of the Neo-Tethys Ocean[J]. Science China Earth Sciences, 65: 1-24.
- Zhu W B, Zhang Z Y, Shu L S, Wan J L, Wang S L, Yang W and Su J B. 2007. Uplift and exhumation history of the Precambrian basement, northern Tarim: Evidence from apatite fission track data[J]. Acta Petrologica Sinica, 23(7): 1671-1682(in Chinese with English abstract).
- Берриман А. М. 1995. Hydrogenic uranium deposit[R]. No. 203 Research Institute of Nuclear Industry(in Chinese).
- Максимова М. Ф. and Шмаревич Е. М. 1996. Interlayer infiltration mineralization[R]. No. 203 Research Institute of Nuclear Industry (in Chinese).

附中文参考文献

- 柏道远, 孟德保, 刘耀荣, 马铁球. 2003. 青藏高原北缘昆仑山中段构造隆升的磷灰石裂变径迹记录[J]. 中国地质, 30(3): 240-246.
- 柏道远, 熊延望, 刘耀荣. 2007. 中昆仑山形成时代与隆升幅度——基于夷平面与磷灰石裂变径迹研究[J]. 资源调查与环境, 28(1): 5-11.
- 迟效国, 李才, 金巍, 刘森, 杨日红. 1999. 藏北新生代火山作用的时空演化与高原隆升[J]. 地质论评, 45(增): 978-986.
- 崔作舟. 1987. 青藏高原深部地质特征及其形成机制探讨[J]. 中国地质科学院院报, (3): 4-18.
- 邓万明. 1998. 青藏高原北部新生代板内火山岩[M]. 北京: 地质出版社.
- 杜治利, 王清晨, 周学慧. 2007. 中新世库车-南天山盆地系统隆升历史的裂变径迹证据[J]. 岩石矿物学杂志, 26(5): 399-408.
- 方世虎, 郭召杰, 张志诚, 吴朝东. 2004. 中新世天山及其两侧盆地性质与演化[J]. 北京大学学报(自然科学版), 40(6): 886-897.
- 方小敏. 2017. 青藏高原隆升阶段性[J]. 科技导报, 35(6): 42-50.
- 傅容珊, 李力刚, 黄建华, 徐耀民, 常筱华. 1998. 青藏高原隆升过程三阶段模式的动力学模拟[A]. 寸丹集——庆贺刘光鼎院士工作50周年学术论文[C]. 15页.
- 傅容珊, 黄建华, 李力刚, 常筱华. 2000. 青藏高原隆升三阶段模型的数值模拟[J]. 地学前缘, 7(4): 588-596.
- 郭庆银. 2010. 鄂尔多斯盆地西缘构造演化与砂岩型铀矿成矿作用[D]. 导师: 周美夫, 颜丹平. 北京: 中国地质大学(北京). 1-241.
- 贺铎, 李子颖, 刘鑫扬, 张宇龙, 王龙辉, 刘持恒, 张艳, 邱林飞, 韩美芝. 2023. 鄂尔多斯盆地西北部特拉敖包矿产地铀成矿机理研究[J]. 铀矿地质, 39(6): 859-874.
- 侯增谦, 莫宣学, 杨志明, 王安建, 潘桂棠, 曲晓明, 聂凤军. 2006a. 青藏高原碰撞造山带成矿作用: 构造背景、时空分布和主要类型[J]. 中国地质, 33(2): 340-351.
- 侯增谦, 潘桂棠, 王安建, 莫宣学, 田世洪, 孙晓明, 丁林, 王二七, 高永丰, 谢玉玲, 曾普胜, 秦克章, 许继峰, 曲晓明, 杨志明, 杨竹森, 费红彩, 孟祥金, 李振清. 2006b. 青藏高原碰撞造山带: II. 晚碰撞转换成矿作用[J]. 矿床地质, 25(5): 521-543.
- 侯增谦, 曲晓明, 杨竹森, 孟祥金, 李振清, 杨志明, 郑绵平, 郑有业, 聂凤军, 高永丰, 江思宏, 李光明. 2006c. 青藏高原碰撞造山带: III. 后碰撞伸展成矿作用[J]. 矿床地质, 25(6): 630-651.
- 侯增谦, 杨竹森, 徐文艺, 莫宣学, 丁林, 高永丰, 董方浏, 李光明, 曲晓明, 李光明, 赵志丹, 江思宏, 孟祥金, 李振清, 秦克章, 杨志明. 2006d. 青藏高原碰撞造山带: I. 主碰撞造山成矿作用[J]. 矿床地质, 25(4): 337-358.
- 贾承造, 陈汉林, 杨树锋, 卢华复, 周宇章. 2003. 库车坳陷晚白垩世隆升过程及其地质响应[J]. 石油学报, 24(3): 1-5+15.
- 简晓飞, 秦立峰. 1996. 浅谈中亚地区层间氧化带砂岩型铀矿成矿作用[J]. 铀矿地质, 12(2): 65-70.
- 李吉均. 2013. 青藏高原隆升与晚新生代环境变化[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 49(2): 154-159.

- 李丽, 陈正乐, 祁万修, 王世新, 陈宣华, 吴益平, 宫红良, 魏新昌, 杨屹, 李学智. 2008. 准噶尔盆地周缘山脉抬升-剥露过程的 FT 证据[J]. 岩石学报, 24(5): 1011-1020.
- 李胜祥, 韩效忠, 蔡煜琦, 黄净白, 蔡根庆. 2006. 天山造山带山间盆地砂岩型铀矿成矿模式及找矿方向探讨[J]. 矿床地质, 25(增): 241-244.
- 李子颖, 方锡珩, 陈安平, 欧光习, 肖新建, 孙晔, 刘池洋, 王毅. 2007. 鄂尔多斯盆地北部砂岩型铀矿目标层灰绿色砂岩成因[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), (增): 139-146.
- 李子颖, 方锡珩, 陈安平, 欧光习, 孙晔, 张珂, 夏毓亮, 周文斌, 陈法正, 李满根, 刘忠厚, 焦养泉. 2009. 鄂尔多斯盆地东北部砂岩型铀矿叠合成矿模式[J]. 铀矿地质, 25(2): 65-70+84.
- 李子颖. 2019. 鄂尔多斯盆地北部砂岩铀成矿作用[M]. 北京: 地质出版社.
- 李子颖, 秦明宽, 蔡煜琦, 方锡珩, 郭庆银, 易超, 夏毓亮, 孙晔, 张字龙, 贾立城. 2020. 鄂尔多斯盆地砂岩型铀矿成矿作用和前景分析[J]. 铀矿地质, 36(1): 1-13.
- 李子颖, 刘武生, 李伟涛, 李西德, 秦明宽, 蔡煜琦, 张云龙, 何升, 吴曲波, 邱林飞, 刘持恒, 朱鹏飞, 纪宏伟, 郭建. 2022. 内蒙古二连盆地哈达图砂岩铀矿渗出铀成矿作用[J]. 中国地质, 49(4): 1009-1047.
- 李子颖, 秦明宽, 郭庆银, 贺锋, 蔡煜琦, 钟军, 刘武生, 邱林飞, 刘持恒, 纪宏伟, 郭建, 林锦荣, 李西得, 田明明, 黄志新, 衣龙升, 王君贤, 刘鑫扬, 李伟涛, 张云龙, 何升, 张字龙, 郭强, 欧光习, 贾立城, 何中波, 吴玉, 邢作昌, 王文全, 刘军港, 韩美芝, 骆效能. 2024. 渗出砂岩型铀矿成矿预测与找矿标志[J]. 铀矿地质, 40(1): 1-15.
- 梁晓峰, 陈凌, 田小波, 褚杨, 李文涛. 2023. 青藏高原地壳结构特征指示的高原隆升机制[J]. 中国科学: 地球科学, 53(12): 2808-2829.
- 刘红旭, 颜丹平, 何建国, 陈峰, 高洪雷, 所世鑫, 王勋, 张晓, 曹清艳, 王永文, 赵建. 2014. 阿齐山-雅满苏地区中-新生代构造隆升裂变径迹证据: 兼论构造活动对核废选址场的意义[J]. 高校地质学报, 20(1): 81-92.
- 鹿化煜, 王先彦, Vandenberghe J. 2014. 青藏高原东北部地貌演化与隆升[J]. 自然杂志, 36(3): 176-181.
- 吕红华, 王玮, 常远, 周祖翼. 2013. 新疆天山造山带新生代多期次剥露作用过程[J]. 第四纪研究, 33(4): 812-822.
- 潘家伟, 李海兵, Woerd J V D, 孙知明, 裴军令, Barrier L, 司家亮. 2007. 西昆仑山前冲断带晚新生代构造地貌特征[J]. 地质通报, 26(10): 1368-1379.
- 潘家伟, 李海兵, 孙知明, 司家亮, 裴军令, 刘栋梁. 2013. 青藏高原西北部晚第四纪以来的隆升作用——来自西昆仑阿什库勒多级河流阶地的证据[J]. 岩石学报, 29(6): 2199-2210.
- 潘裕生. 1999. 青藏高原的形成与隆升[J]. 地学前缘, 6(3): 153-163.
- 彭建兵, 马润勇, 卢全中, 李喜安, 邵铁全. 2004. 青藏高原隆升的地质灾害效应[J]. 地球科学进展, 19(3): 457-466.
- 秦明宽, 何中波, 刘章月, 郭强, 宋继叶, 许强. 2017. 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, 63(5): 1255-1269.
- 施雅风, 李吉均, 李炳元, 姚檀栋, 王苏民, 李世杰, 崔之久, 王富保, 潘保田, 方小敏, 张青松. 1999. 晚新生代青藏高原的隆升与东亚环境变化[J]. 地理学报, (1): 12-22.
- 孙继敏, 刘卫国, 柳中晖, 付碧宏. 2017. 青藏高原隆升与新特提斯海退却对亚洲中纬度阶段性气候干旱的影响[J]. 中国科学院院刊, 32(9): 951-958.
- 王成善, 戴紧根, 刘志飞, 朱利东, 李亚林, 贾国东. 2009. 青藏高原与喜马拉雅的隆升历史和研究方法: 回顾与进展[J]. 地学前缘, 16(3): 1-30.
- 吴柏林. 2005. 中国西北地区中生代盆地砂岩型铀矿地质与成矿作用[D]. 导师: 刘池阳. 西安: 西北大学. 1-243.
- 许志琴, 李思田, 张建新, 杨经绥, 何碧竹, 李海兵, 林畅松, 蔡志慧. 2011. 塔里木地块与古亚洲/特提斯构造体系的对接[J]. 岩石学报, 27(1): 1-22.
- 杨富全, 耿新霞, 杨成栋, 张志新, 王成, 李守能, 李强. 2024. 新疆中亚造山带铁矿床地质特征、时空分布和找矿方向[J]. 矿床地质, 43(5): 951-978.
- 杨树锋, 陈汉林, 程晓敢, 肖安成, 周宇章, 卢华复, 贾承造, 魏国齐. 2003. 南天山新生代隆升和去顶作用过程[J]. 南京大学学报(自然科学版), 39(1): 1-8.
- 姚志刚, 周立发, 高璞, 高珊, 余刚. 2010. 北天山中-新生代隆升和剥蚀史研究[J]. 中国矿业大学学报, 39(1): 121-126.
- 叶卓, 高锐, 李秋生, 徐啸, 黄兴富, 熊小松, 李文辉. 2018. 青藏高原向东挤出与向北扩展——高原隆升深部过程之探讨[J]. 科学通报, 63(31): 3217-3228.
- 赵凤民. 2014. 中亚铀矿地质[M]. 北京: 核工业北京地质研究院.
- 钟大赉, 丁林. 1996. 青藏高原的隆起过程及其机制探讨[J]. 中国科学(D辑), 26(4): 289-295.
- 周波. 2019. 东昆仑造山带中新生代热演化史及隆升-剥露过程研究[D]. 导师: 董云鹏. 西安: 西北大学. 1-171.
- 朱文斌, 张志勇, 舒良树, 万景林, 卢华复, 王胜利, 杨伟, 苏金宝. 2007. 塔里木北缘前寒武基底隆升剥露史: 来自磷灰石裂变径迹的证据[J]. 岩石学报, 23(7): 1671-1682.
- A.И. 别列里曼. 1995. 水成铀矿床[R]. 核工业 203 研究所(内部资料).
- M.Ф. 马克西莫娃, E.M. 什玛廖维奇. 1996. 层间渗入成矿作用[M]. 核工业 203 研究所(内部资料).