

doi: 10.13745/j.esf.2015.01.016

中国北方古亚洲构造域中沉积型铀矿形成发育的沉积-构造背景综合分析

焦养泉¹, 吴立群¹, 彭云彪², 荣 辉¹, 季东民³, 苗爱生², 里宏亮³

1. 中国地质大学(武汉) 构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北 武汉 430074

2. 核工业二〇八大队, 内蒙古 包头 014010

3. 辽河石油勘探局 新能源开发公司, 辽宁 盘锦 124010

JIAO Yangquan¹, WU Liqun¹, PENG Yunbiao², RONG Hui¹, JI Dongmin³,
MIAO Aisheng², LI Hongliang³

1. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources(China University of Geosciences), Ministry of Education, Wuhan 430074, China

2. Geological Team No. 208, BOG, CNNC, Baotou 014010, China

3. Development Company of New Energy Sources of Liaohe Petroleum Exploration Bureau, CNPC, Panjin 124010, China

JIAO Yangquan, WU Liqun, PENG Yunbiao, et al. Sedimentary-tectonic setting of the deposition-type uranium deposits forming in the Paleo-Asian tectonic domain, North China. *Earth Science Frontiers*, 2015, 22(1): 189-205

Abstract: Exploration over the past two decades indicates that the Paleo-Asian orogenic belts across north China and Mesozoic-Cenozoic continental basins around their both sides are the most important metallogenic tectonic domain for the formation of the deposition-type uranium deposits in China. The Paleo-Asian orogenic belts are essential uranium-rich geological bodies. The uranium delivery system depends on the transportation of the surface drainage restricted by basin-mountain coupling mechanics. Mudstone-type uranium deposits were fed by the single uranium source, whereas sandstone-type uranium deposits were fed by the double uranium source, and the regenerated uranium source originated from uranium reservoirs is quite important. Slack and sustained geotectonic background during the dormant period of the thrust-orogeny process and the post-fault thermal subsidence is a period favorable to the formation of depositional-metallogenic environment. Mudstone-type uranium deposits need synsedimentary sustained tectonic setting. Sandstone-type uranium deposits were formed under not only the synsedimentary sustained tectonic setting, but also the tip-tilting tectonic setting during the mineralization period. Some sandstone-type uranium deposits were obviously affected by the tectonic setting after mineralization. Survey indicates that the efficiency of interlayer oxidation is the highest, and the transported flux of uranium is the largest, and the large even super large uranium deposits tend to be formed when the mineral-charged flow field during the mineralization period was consistent to the synsedimentary palaeocurrent. Synsedimentary palaeoclimate is a significant geologic factor affecting the development of uranium reservoirs and interlayer oxidation zone, which constrained not only the architecture and size of uranium reservoirs, but also the types of reductive media inside and outside uranium reservoirs and their spatial distribution. The morphology and architecture of uranium reservoirs restricted the direction and track of interlayer oxidation zone, whereas the reductive media inside and outside uranium reservoirs controlled the advancing mileage and location of frontal line of the interlayer oxidation zone. Uranium mineralization is related to the redox geochemical barrier. This study shows that the Mesozoic-Cenozoic basins around the Paleo-Asian

收稿日期: 2014-07-13; 修回日期: 2014-08-11

基金项目: 中国核工业地质局高校科技攻关项目; 国土资源部中央地质勘查基金专题研究项目(2008150013, 2013150011); 国家自然科学基金项目(40772072, 40802023); 中国石油辽河油田分公司重大项目; 中国石化河南油田分公司协作项目

作者简介: 焦养泉(1963—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事沉积盆地分析与能源矿产研究的科研与教学工作。E-mail: yqjiao@cug.edu.cn; 895818905@qq.com

orogenic belts are primary prospective area for deposition-type uranium deposits. Based on the in-depth analysis of the regional tectonic framework and recharge-runoff-discharge system of the mineral-charged flow field, the prospecting target can be delineated and evaluated according to the synsedimentary palaeoclimate, types of reductive media and their spatial distribution of uranium-bearing series in the target basin.

Key words: sandstone-type (mudstone-type) uranium deposits; tectonic domain of uranium mineralization; Palaeo-Asian orogenic belts; Mesozoic-Cenozoic sedimentary basins

摘要:近20年的勘查实践表明,横贯中国北方的古亚洲洋造山带及其两侧的中—新生代陆相沉积盆地,是我国最重要的沉积型铀矿床形成发育的铀成矿构造域。研究认为,古亚洲洋造山带是重要的富铀地质体,盆地—山耦合机制制约下的地表水系搬运沉积作用是形成铀源供给系统的必要前提,泥岩型铀矿表现为单一铀源供给系统,而砂岩型铀矿则表现为双重铀源供给系统并且铀储层砂体本身的“再生铀源”不容忽视。在逆冲—造山间歇期或裂后热沉降时期,相对松弛和稳定的大地构造背景有利于沉积—成矿环境的形成,泥岩型铀矿需要同沉积期的稳定构造背景,而砂岩型铀矿不仅需要同沉积期的稳定构造背景,也需要成矿期具有适当掀斜作用的构造背景,有些矿床对成矿期后的构造环境还非常敏感。调查发现,当成矿期的含矿流场与沉积期的古水流体系基本一致时,铀储层砂体中层间氧化效率最高而且铀搬运通量最大,更加有利于成就大型和超大型矿床。在区域古构造等因素的协同影响下,同沉积期的古气候背景是制约铀储层砂体和成矿期层间氧化带发育方向和规模的极为重要的地质因素。同沉积期古气候不仅制约了铀储层砂体发育的结构和规模,同时更重要地制约了铀储层内部和外部还原介质的类型及其空间分布规律。铀储层砂体的形态和结构制约了层间氧化带发育的方向和轨迹,而铀储层内部和外部的还原介质则控制着古层间氧化带推进的里程及前锋线位置,铀矿化作用则与氧化还原地球化学障有关。基于此,毗邻古亚洲洋造山带的中—新生代沉积盆地都是沉积型铀矿勘查的主要远景区,而针对目标沉积盆地,则需要在深入剖析盆地构造格架以及区域含矿流场补—径—排关系基础上,再依据含铀岩系自身的特征(古气候背景、还原介质类型与分布空间)圈定和评价找矿靶区。

关键词:砂(泥)岩型铀矿床;铀成矿构造域;古亚洲洋造山带;中—新生代沉积盆地

中图分类号:P619.14 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2321(2015)01-0189-17

区域大地构造背景对于大规模的成矿作用具有重要控制作用,于是人们从不同尺度将成矿作用活跃的大地构造域命名为成矿构造域。在成矿构造域中,人们认为,种种地质作用过程——岩石圈演化、地质构造、岩浆活动、沉积容矿岩、成矿金属元素地球化学性能等制约成矿作用。与内生的成矿作用相比,位于沉积盆地中的铀资源,其成矿作用过程更多地受到了沉积盆地演化历史和沉积作用的控制。从更大尺度来看,盆地中的沉积作用和铀成矿作用受制于区域大地构造背景,是区域构造单元中铀从造山带迁移汇聚到沉积盆地中的一种地质现象。

近十几年来,随着我国铀矿勘查主攻目标由硬岩型向砂岩型的重大转移,赋存于沉积盆地中的铀资源一系列特大型和超大型的砂(泥)岩型铀矿床被陆续发现,沉积型铀矿床特别是砂岩型铀矿床已经成为我国铀矿地质储量持续增长的主要矿种类型,相关的研究还进一步展示出我国北方陆相盆地仍具有极大的勘查潜力。因此,总结区域构造特征与沉积型铀成矿的关系,建立沉积型铀成矿构造域,对于进一步阐明区域成矿规律和勘查预测具有重要意义。

1 中国沉积型铀矿床与古亚洲洋造山带的关系

在矿床学界,人们一直运用区域构造单元和成矿单元的空间配置关系,划分成矿域^[1-9],或称构造成矿域^[10]、构造—成矿域^[11]。这种划分既有助于阐明构造作用制约下的区域成矿机理,又有利于指导区域找矿勘查。在铀矿地质领域,黄净白和黄世杰^[12]主要依据区域构造单元与铀成矿分布规律的关系,把中国的铀成矿域划分为滨太平洋、古欧亚大陆和特提斯三大单元。

从目前已探明的沉积型铀矿床来看^[13],我国大型的砂岩型和泥岩型铀矿床主要分布于北纬40°~44°中纬度带上,自西向东依次为伊犁盆地南缘铀矿田(洪海沟—蒙其古尔—达拉第铀矿床)、吐哈盆地南缘十红滩铀矿床、巴音戈壁盆地塔木素铀矿床、鄂尔多斯盆地北部东胜铀矿田(皂火壕—纳岭沟—大营铀矿床)、二连盆地努和廷铀矿床和赛罕高毕—巴彦乌拉铀矿床、松辽盆地钱家店铀矿田等(图1,表1)。

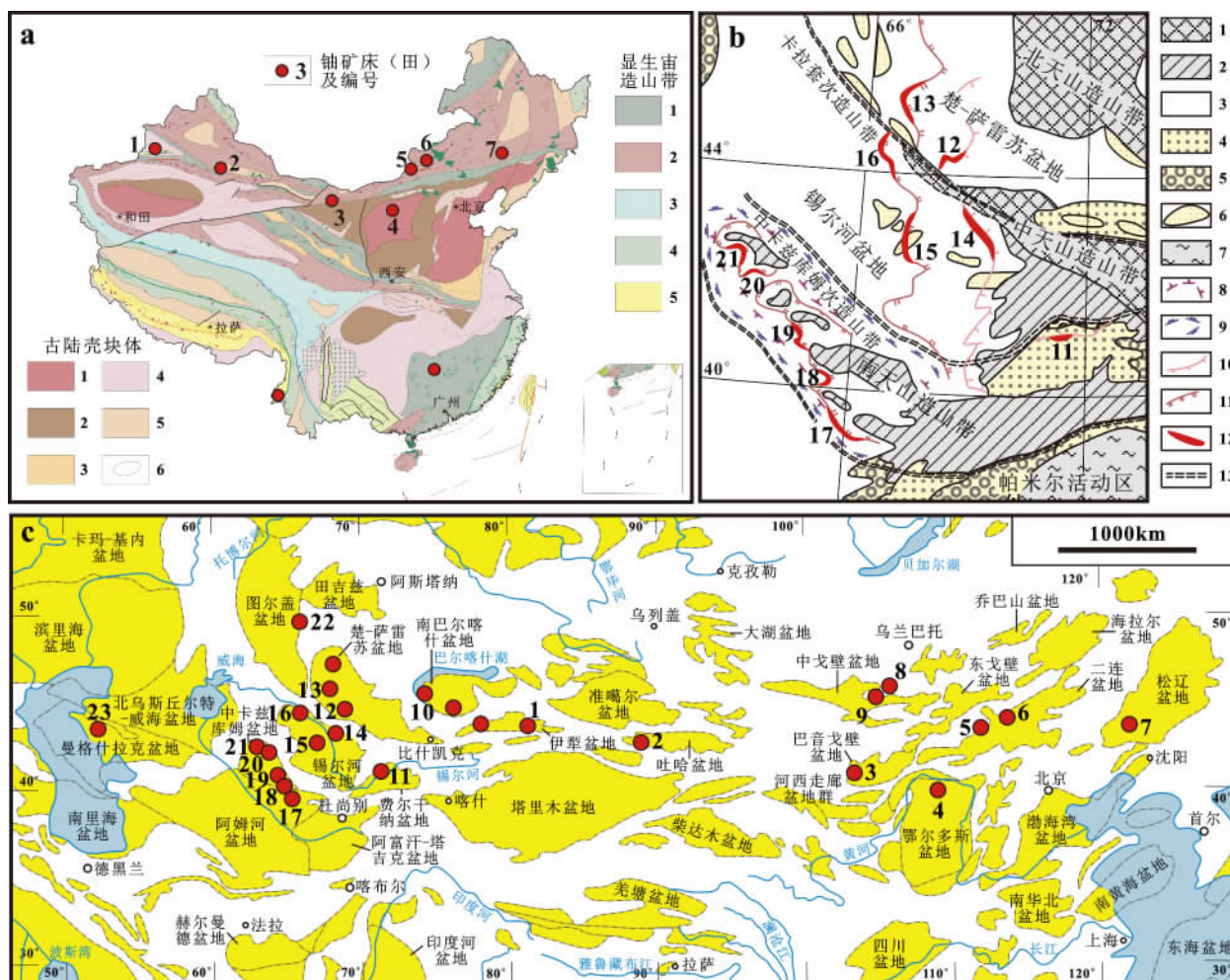


图1 中—东亚主要沉积型铀矿床空间分布规律及其与区域大地构造的关系

(据文献[8,29-31]资料编制)

Fig. 1 Distribution of the deposition-type uranium deposits and its relationship with the regional tectonics in Middle-East Asia

a—中国主要沉积型铀矿床与岩石圈板块构造关系图。古陆块体:1—陆核(2 600 Ma 前固结);2—古元古代末陆块(1 850 Ma 前固结);3—中元古代早期陆块(1 700 Ma 前固结);4—新元古代早期陆块(850 Ma 前固结);5—中间地块(元古宙末固结);6—陆核、陆块及中间地块界线。显生宙造山带:1—早古生代造山带;2—晚古生代造山带;3—早中生代造山带;4—晚中生代造山带;5—新生代造山带。b—中亚主要沉积型铀矿与南、中、北天山造山带关系图。1—早古生代褶皱基底;2—晚古生代褶皱基底;3—中生代—早、中生代地台盖层;4—晚中生代构造盆地;5—活化造山期沉积凹陷;6—中—晚侏罗世含煤沉积盆地;7—新生代造山褶皱带;8—晚古生代褶皱隆起带;9—晚中生代活化构造隆起带;10—古新世沉积内的层间氧化带;11—晚白垩世沉积内的层间氧化带;12—铀矿带、矿田和矿床;13—北、中和南天山分界线。c—中—东亚主要沉积盆地及其与沉积型铀矿床关系。铀矿床、铀矿田或铀矿带编号:1—伊犁盆地南缘铀矿田;2—吐哈盆地南缘红滩铀矿床;3—巴音戈壁盆地塔木素铀矿床;4—鄂尔多斯盆地北部东胜铀矿田;5—二连盆地努尔廷铀矿床(泥岩型);6—二连盆地赛罕高毕—巴彦乌拉铀矿床;7—松辽盆地钱家店铀矿田;8—海拉尔铀矿床;9—哈拉特铀矿床;10—南巴尔喀什湖铀矿带(煤岩型);11—玛利苏伊铀矿田;12—坎茹干—乌瓦纳斯铀矿带;13—英凯—门库杜克铀矿带;14—卡拉克套铀矿田;15—基细尔柯里—卡尼麦赫铀矿田;16—卡拉木伦铀矿田;17—克特门奇—萨贝尔萨伊铀矿田;18—布基纳伊—卡尼麦赫铀矿田;19—列夫列亚坎—比什凯克铀矿田;20—苏格拉雷铀矿田;21—乌奇库杜克铀矿田;22—拉扎列夫斯科耶铀矿田;23—曼格什拉克铀矿带(含铀鱼骨泥岩型)。未标注说明者均为砂岩型铀矿。

该纬度带总体平行于古亚洲洋造山带——天山—西拉木伦活动带构造单元,隶属于古欧亚大陆构造体系。在该构造体系中,重要的沉积型铀矿床均赋存于古亚洲洋造山带两侧的中—新生代沉积盆地中,显然该地区特别是东部地区的大规模区域铀成矿过程受到了滨太平洋构造域的叠加影响。从造山带演化的角度看,古亚洲洋造山带自晚古生成

型^[14-16]以来,虽然在随后的印支运动^[17-21]、燕山运动^[18-19,22-25]和喜山运动过程中受到了强烈改造,但总体轮廓未变而表现为周期性隆升剥蚀状态,这种构造背景使中—新生代的盆—山耦合作用过程得以充分体现。造山带丰富的铀源供给、沉积盆地潜在含铀岩系的充分发育,以及造山带与沉积盆地间区域缓斜坡背景等有利因素的叠合,造就了我国北方

表 1 中国北方主要沉积型铀矿床的基本特征

Table 1 Characteristics of the deposition-type uranium deposits in north China

	矿田或矿床名称	产出位置	矿床类型	矿床规模	成因类型	产出层位	
伊犁铀矿田	洪海沟、库捷尔太、乌库尔其、扎基斯坦、蒙古阿尔和达拉第铀矿床	伊犁盆地南缘	砂岩型 + 煤岩型	超大型	层间氧化型	中侏罗统水西沟群 上三叠统小泉沟群	
	十红滩铀矿床		吐哈盆地南缘	砂岩型	大型	层间氧化型	中侏罗统西山窑组
	塔木素铀矿床		巴音戈壁盆地	砂岩型	大型	同沉积+层间氧化型	下白垩统巴音戈壁组
东胜铀矿田	大营铀矿床 皂火壕铀矿床 纳岭沟铀矿床	鄂尔多斯盆地北缘		超大型			
			砂岩型	超大型	古层间氧化型	中侏罗统直罗组	
				大型			
	努和廷铀矿床	二连盆地	泥岩型	超大型	同沉积泥岩型	上白垩统二连达布苏组	
	巴彦乌拉铀矿床		砂岩型	中型	古层间氧化型	下白垩统赛汉塔拉组	
	赛罕高毕铀矿床			小型			
	钱家店铀矿田	松辽盆地南缘	砂岩型	超大型	同沉积+层间氧化型	上白垩统姚家组	

沿古亚洲洋造山带两侧中—新生代陆相含铀沉积盆地群的形成。所以,古亚洲洋造山带及其两侧的中—新生代陆相沉积盆地,是中国最重要的沉积型铀矿床形成发育的铀成矿构造域。

该铀成矿构造域,相当于陈祖伊等^[26]划分的两个砂岩型铀成矿体系,即天山成矿体系和西太平洋成矿体系的总和。有资料显示,该成矿构造域一直向西至少可以延伸到中亚的哈萨克斯坦和乌兹别克斯坦,特别是天山造山带两侧的楚-萨雷苏盆地、锡尔河盆地和中卡兹库姆盆地的铀成矿作用活跃^[8,27-28],有学者将其称之为东土伦砂岩型铀成矿巨省。由此看来,这也是全球最重要的沉积型铀矿床成矿构造域之一(图1)。

2 沉积型铀成矿构造域中的铀源供给系统

充足的铀源是沉积型铀矿床形成的必要物质基础,盆-山耦合作用是形成铀源供给系统的必要前提。沉积型铀矿床的形成在很大程度上依赖于沉积作用过程,地表水系的沉积作用是连接造山带和沉积盆地的纽带,它制约了铀的迁移输送途径。但是,由于沉积型铀矿床的差异性,如同沉积泥岩型铀矿床和沉积之后的砂岩型铀矿床,铀源供给系统具有明显的差异,前者表现为单一铀源供给系统而后者表现为双重铀源供给系统。

2.1 古亚洲洋造山带是重要的富铀地质体

由于铀的亲氧性和变价性地球化学特征,决定

了富铀体(层)通常产出于多旋回区域构造活动区^[12],中酸性岩浆岩是最好的载体。洪大伟等^[32]指出,中亚造山带的一个显著特点是广泛发育古生代—中生代的花岗岩,其出露面积超过 5 000 000 km²。这使得绵延几千 km 的古亚洲洋造山带就成为重要的富铀地质体,它为相邻的中—新生代沉积盆地提供了良好的铀源。

在鄂尔多斯盆地以北的阴山造山带中,太古宇乌拉山岩群中的片麻岩组具有较高的铀背景值(2.54×10^{-6})。大约在 1 800 Ma,大规模的钾质混合岩化作用使微量铀从片麻岩中得到了初步富集。海西期、印支期和燕山期的酸性岩浆侵入作用及其衍生的高温和低温热流体作用,使铀再次富集(均值可高达 9.92×10^{-6}),从而构成了主要的富铀母岩。从前白垩纪阴山造山带地质图的编制及其与鄂尔多斯盆地北部侏罗纪含铀岩系(直罗组)沉积体系域的空间叠加(图2),以及含铀岩系沉积物粒度、重矿物分布规律和古水流测量等信息,均证明鄂尔多斯盆地北部砂岩型铀矿田的铀(物)源来自于阴山造山带^[33-36]。除此之外,沿阴山造山带向西或者向东延伸,天山造山带和燕山造山带均具有高铀背景值的中酸性侵入岩和火山(碎屑)岩,它们都被证明是优质铀源岩并参与到了伊犁铀矿田^[37]和钱家店铀矿田^[38-39]的成矿作用过程中。

2.2 泥岩型铀矿床的沉积期单一铀源供给系统

同沉积泥岩型铀矿床的铀源系统,由盆缘富铀地质体-溶解铀(U^{6+})搬运-稳定湖泊三大地质要素构成。位于盆缘的富铀地质岩体通过风化作用可以

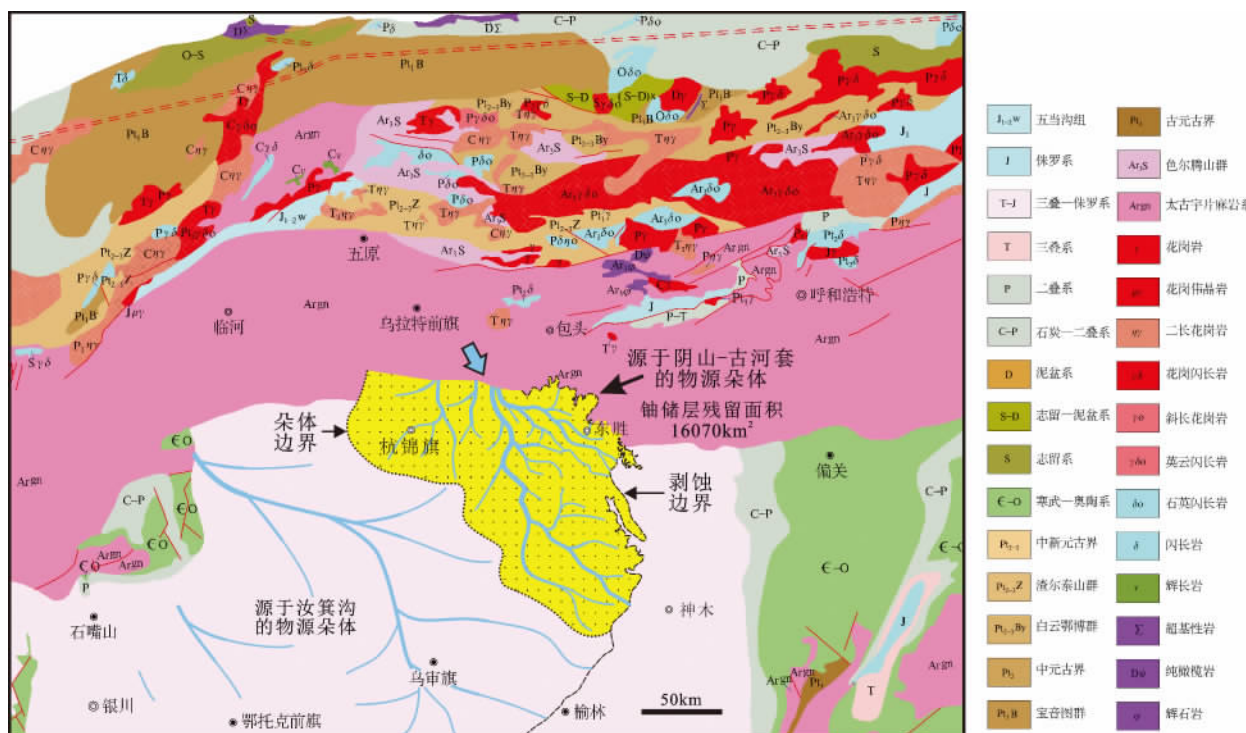


图2 中侏罗世阴山造山带及其与盆地北缘富铀大型物源-朵体空间配置图

Fig.2 Middle Jurassic Yinshan orogenic belt and its spatial arrangement with the large lobes rich in uranium in the northern Ordos Basin

提供丰富的溶解铀(U^{6+}), 铀的搬运主要依赖于同沉积期的地表水系, 稳定的湖泊水体是溶解铀(U^{6+})的暂时性聚集载体, 而富有机质和硫化物的湖泊淤泥对湖泊水体中铀的持续吸附是泥岩型铀矿床形成发育的重要地质过程。二连盆地额仁淖尔凹陷的努和廷铀矿床是同沉积泥岩型铀矿的典型代表^[40]。在额仁淖尔凹陷, 西缘的富铀地质体——卫镜花岗岩体在风化过程中能够提供大量的溶解铀(U^{6+}), 这一铀源特征已被最新的研究证实^[41]。

2.3 砂岩型铀矿床的沉积期和成矿期双重铀源供给系统

砂岩型铀矿的形成具有双重铀源供给特征, 它们既需要成矿期蚀源区溶解铀(U^{6+})的稳定输入, 也需要同沉积期潜在砂岩型铀矿储层砂体(简称铀储层)本身微量铀的贡献。同沉积期铀储层本身的微量铀, 可以通过成矿阶段的层间氧化作用释放出来而参与铀成矿, 本文称为铀储层砂体本身的“再生铀源”, 有些学者如夏毓亮等^[42]认为此类铀源的贡献更为重要。

在砂岩型铀矿床的双重铀源供给系统中, 铀的迁移输送性质在时间和形式上具有明显差别。

在同沉积期, 潜在铀储层中的微量铀通过地表

水系迁移输送至沉积盆地, 微量铀既可以是含铀碎屑颗粒, 也可以是溶解铀(U^{6+})。在含铀碎屑被搬运至沉积盆地中时, 它们随同其他碎屑颗粒一同沉积并构成潜在铀储层, 这一现象在大营铀矿床的铀源研究中得以揭示, 潜在铀储层中确实存在同沉积期搬运而来的含铀碎屑(图3)。而同沉积期的溶解铀(U^{6+}), 在被输送到沉积盆地中时, 则可能被潜在含铀岩系中的吸附剂所吸附。由此可见, 同沉积期的含铀碎屑的沉积及溶解铀(U^{6+})的吸附造就含铀岩系的自身铀源。例如, 钱家店铀矿田铀储层中灰色砂岩的微量铀平均含量为 7.17×10^{-6} ^[38], 鄂尔多斯北部东胜铀矿田铀储层中灰色砂岩的微量铀平均含量为 5.75×10^{-6} ^[35-36], 伊犁盆地铀矿田铀储层中灰色砂岩的微量铀平均含量为 7.74×10^{-6} ^[43-44]。夏毓亮等^[42]关于我国北方盆地铀矿床原生微量铀的地球化学特征研究也证明了这一点。但是, 由Hamilton^[45]提供的资料表明, 全球砂岩铀的平均含量仅为 0.45×10^{-6} (图4)。这说明在沉积过程中铀通常是不富集的, 而只有在特定时期和特殊地质条件下, 造山带母岩中的微量铀才能够通过沉积过程富集于砂岩中, 铀背景值较高的砂岩就成为期后砂岩型铀矿发育的充要条件。

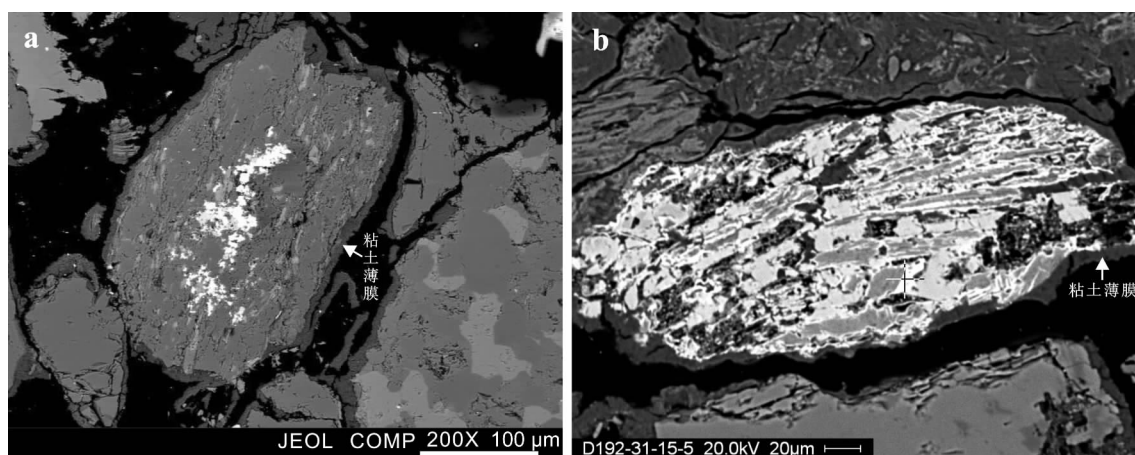


图3 鄂尔多斯盆地大营铀矿直罗组铀储层中的具有搬运磨圆特征的含铀碎屑颗粒

Fig. 3 Clastic particles containing uranium with rounded appearance in the uranium reservoirs of the Zhiluo Formation in the Daying uranium deposit, north Ordos Basin

a—水硅铀矿(亮白)与锐钛矿(次白)分布于碎屑颗粒中心, D192-31-16-8; b—由均匀分布的钛铀矿(亮白)、锐钛矿(次白)和绿泥石(灰)构成的含铀碎屑颗粒, D192-31-15-5。含铀碎屑颗粒具有较好的磨圆度, 碎屑颗粒边缘具有黏土矿物胶结的包圈层(箭头所指), 说明沉积之后经历了泥质胶结作用。

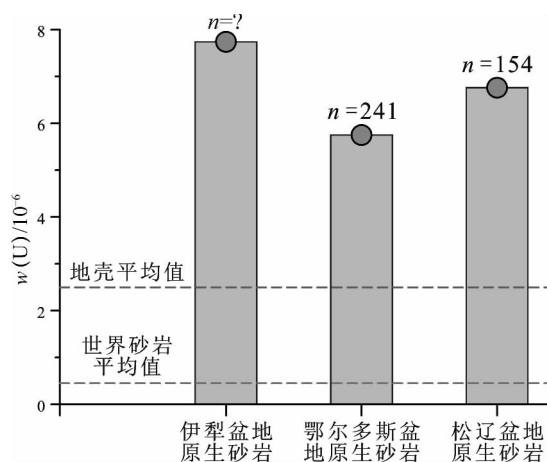


图4 全球砂岩和铀储层砂岩中原始微量铀含量背景值 (地壳平均值和全球砂岩平均值据文献[45], 伊犁盆地原生砂岩平均值据文献[43-44], 其余资料据文献[35-36, 38])

Fig. 4 Uranium content of the world sandstone and uranium reservoirs sandstone

在铀成矿时期, 源于蚀源区的铀既可以是含铀碎屑也可以是溶解铀(U^{6+}), 但是当其被搬运至沉积盆地后, 却仅有溶解铀(U^{6+})作为有效铀源的输送形式参与铀成矿, 此时的铀储层多孔介质则限制了含铀碎屑的输入。

但是从铀源的本质讲, 参与砂岩型铀矿成矿过程的铀质——无论是含铀碎屑还是溶解铀(U^{6+}), 它们均来自于造山带的富铀地质体, 只是被运移输送的时间和形式上具有差别而已(图5)。砂岩型铀矿的双重铀源供给系统, 进一步地证实铀的

富集成矿是铀的多级预富集^[12]的结果。

3 沉积型铀成矿构造域中的有利沉积-成矿环境

沉积型铀成矿构造域中周期性区域构造事件以及盆-山结合部位“宽缓大斜坡”地貌^[46-51]在更大尺度上制约区域铀成矿作用过程。在盆-山耦合作用过程中, 相对松弛和稳定的大地构造环境有利于沉积-成矿环境的形成, 当然泥岩型铀矿床和砂岩型铀矿床形成发育的构造背景是有区别的: 前者强调了稳定的同沉积构造背景, 而后者既强调同沉积构造背景, 也强调成矿期的构造背景, 有些古老的砂岩型铀矿床还对成矿期后的构造环境非常敏感。

3.1 泥岩型铀矿床形成发育的沉积-成矿环境

对于泥岩型铀矿床而言, 更强调了同沉积期稳定大地构造背景的重要性。二连盆地额仁淖尔凹陷努和廷铀矿床就是一个典型的实例(图6)。

额仁淖尔凹陷的泥岩型铀矿床产出上白垩统二连达布苏组。区域调查和盆地分析认为, 二连达布苏组形成发育于断陷盆地的裂后热沉降阶段。这种构造背景既有利于持续铀源供给系统的形成, 也有利于稳定的湖泊沉积-成矿环境的发育。稳定的湖泊环境, 首先意味着富铀湖泊水体充盈, 它能够暂时储存大量溶解铀, 其次湖泊淤泥能够有充分的时间吸附铀而成矿(图6)。

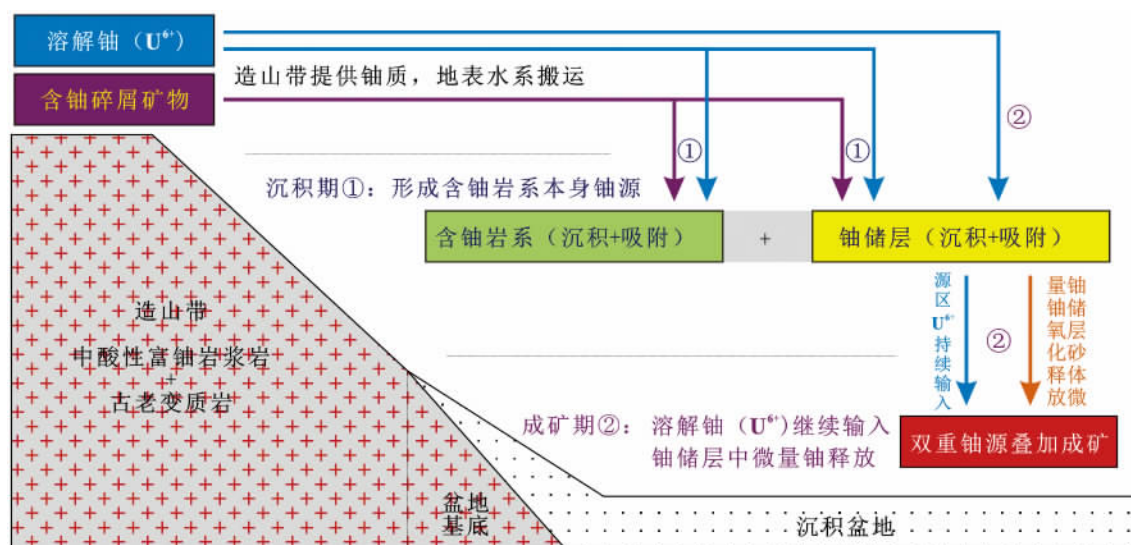


图5 砂岩型铀矿床的双重铀源供给机理

Fig. 5 Supply mechanism of the double uranium source in the sandstone-type uranium deposits

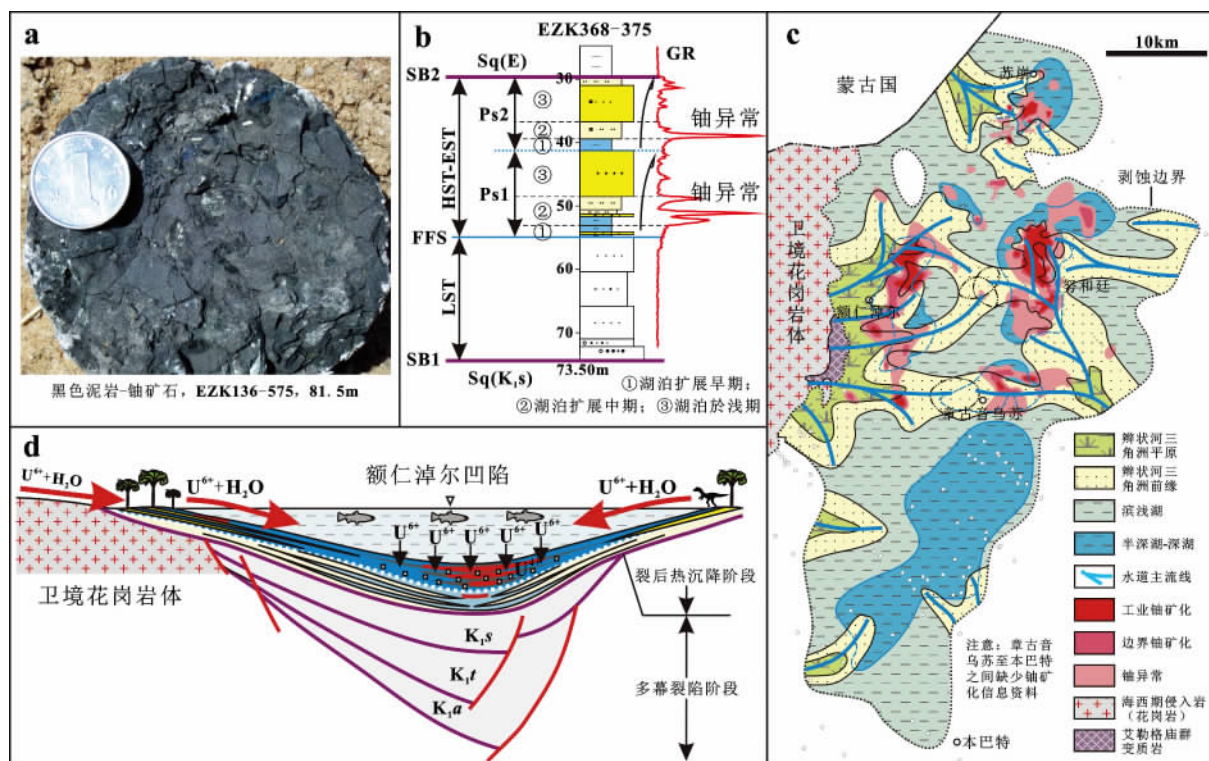


图6 二连盆地额仁淖尔凹陷二连达布苏组努和廷同沉积泥岩型铀矿床

(据文献[40]修改)

Fig. 6 Nuheting mudstone-type uranium deposits hosted in the Eren Dabusu Formation of the Erennaoer sag, Erlian Basin
 a—铀矿石——湖泊相富含有机质和黄铁矿的含石膏泥岩;b—小层序中铀矿化与湖泊扩展事件关系;c—湖泊扩展体系域与含矿性叠合图,显示铀矿化与湖泊中心及其伴生的三角洲前缘关系密切;d—湖泊扩展体系域发育时期的铀成矿模式图。

在额仁淖尔凹陷,铀矿化作用与沉积层序演化过程以及湖泊扩展事件具有密切关系(图6)。在二连达布苏组低位体系域(LST)发育时期,辫状河体

系和辫状河三角洲体系较为发育,湖泊体系规模较小,铀矿化规模有限。在湖泊扩展体系域(EST)发育期,稳定半深水湖泊发育,蚀源区卫境花岗岩体在

风化作用下 U^{6+} 充分供给, 湖泊水体成为 U^{6+} 的间接载体, 干旱气候导致的盐水分层既有利于分散有机质保存也有利于硫化物形成, 于是湖泊中心富有机质和黄铁矿淤泥通过持续吸附 U^{6+} 而富集成矿。在一次湖泛事件中, 湖泛初期通常无铀富集, 中期最为活跃, 晚期(淤浅期)有所降低, 这可能与湖泊环境演变有关。正是由于同沉积期构造条件稳定, 形成的铀矿体就成为严格意义上的地层对比标志层, 其单个铀矿体的储量规模即可达到超大型。至高位体系域(HST)发育时期为湖泊消亡期, 碎屑沉积物供给量增加。由于气候干旱, 水体持续蒸发, 湖盆中心形成弱渗透的石膏层和含膏泥岩, 从而使先前形成的铀矿体得以保存^[40]。

3.2 砂岩型铀矿床发育的沉积-成矿环境

对于砂岩型铀矿床而言, 铀的富集成矿既取决于含铀岩系形成发育期的古构造背景, 也取决于成矿期的古构造背景, 对于像鄂尔多斯盆地北部东胜铀矿田而言成矿期后的构造作用也同等重要。

含铀岩系形成发育期的古构造背景直接控制了潜在铀储层及其隔水层的基本特征——成因类型、分布规律、非均质性、内部和外部还原介质、溶解铀和碎屑铀的预富集等。而成矿期的古构造背景往往充当了形成大型成矿流体系统的角色, 适当的构造掀斜作用可以导致潜在铀储层剥蚀暴露地表而沟通了与蚀源区的通道, 相对稳定的构造背景促使源区充氧富铀流体源源不断渗入铀储层, 形成大型区域层间氧化带并成矿。成矿期之后的构造作用则直接决定了铀矿体的命运, 或者被改造破坏(强烈构造作用叠加氧化环境), 或者被封存保护(微弱构造作用叠加还原环境), 东胜铀矿田显然属于后者。下面以东胜铀矿田为例, 分析盆-山耦合作用过程中沉积-成矿环境的变迁及其对铀成矿作用的影响。

3.2.1 造山带逆冲间歇期的继承性坳陷为大型潜在铀储层形成奠定了基础

一个含铀盆地的形成是盆-山耦合作用的产物。中生代的鄂尔多斯盆地的形成发育, 与秦岭造山作用和阴山造山作用关系密切, 实际上它们共处于统一的区域大地构造背景中, 只不过是构造作用的表现形式不同而已。前者表现为挤压背景下的挠曲沉降, 而后者表现为挤压背景下的隆升造山。鄂尔多斯盆地是一个大型的叠合盆地, 它由多个盆地单型构成^[52-55]。但真正具有陆相盆地特色的盆地单

型形成于晚三叠世, 是一种挤压背景下形成的前陆盆地, 因此具有典型的楔状形态^[56-57]。演化至早中侏罗世, 秦岭造山带和阴山造山带处于逆冲间歇期, 鄂尔多斯盆地随之演变为继承性坳陷, 这为大规模的、稳定的潜在铀储层的发育奠定了基础。如图7所示, 在鄂尔多斯盆地北部, 源于阴山山脉的赋存东胜铀矿田的沉积体残留面积为 16 070 km², 沉积体根部的铀储层砂砾岩体厚度接近 200 m, 有利成矿区通常位于朵体两侧边缘厚度为 20~40 m 的铀储层砂体或者朵体中的大型分流间湾中。

在盆地北部及其外围地区, 古亚洲洋碰撞造山过程及其之后的印支期陆内挤压褶皱造山变形过程中强烈岩浆活动和剥蚀作用, 以及从阴山造山带到鄂尔多斯盆地的南倾“古伊陕大斜坡”和水系, 为潜在铀储层砂体的充分发育, 特别是含铀碎屑和溶解铀在铀储层中的预富集奠定了良好基础。在直罗组铀储层中, 一些磨圆很好且内部铀矿物均匀分布的、各种含铀碎屑颗粒的发现(图3), 均显示了同沉积期造山带蚀源区(含铀)碎屑物随地表水系机械搬运至沉积盆地中堆积的基本特征。同沉积期碎屑铀和溶解铀在铀储层中的预富集虽然达不到工业性铀矿化的级别, 但可以大大地增强铀储层本身的铀源性能, 为后期大规模区域层间氧化带发育过程中将铀从储层中释放出来参与成矿作用准备了充分条件。

3.2.2 早燕山运动成就了完整的大规模的补-径-排成矿流体系统

晚侏罗世的早燕山运动, 在阴山造山带表现为大规模逆冲推覆造山作用^[18-19, 22-25], 这一过程波及了鄂尔多斯盆地北部地区, 从而为大规模的铀成矿作用奠定了基础。

一方面, 早燕山运动将直罗组铀储层剥露地表, 使源于阴山造山带的溶解铀(充氧富铀流体)能充分地入渗到铀储层中, 形成区域层间氧化带并使铀富集成矿; 另一方面, 区域地质调查发现, 早燕山运动的逆冲推覆体系影响到了研究区, 泊尔江海子逆冲断层有可能隶属于阴山逆冲推覆体系^[59-60], 它可能充当了区域含矿流场的泄水通道。这样一来, 就构成了完整的大规模的补-径-排成矿流体系统, 于是主要铀成矿作用开始发生(图8)。

3.2.3 喜山运动的河套断陷作用终止了铀成矿作用过程但又保护了铀矿床

河套断陷的形成^[61-62], 破坏了“古大型伊陕斜

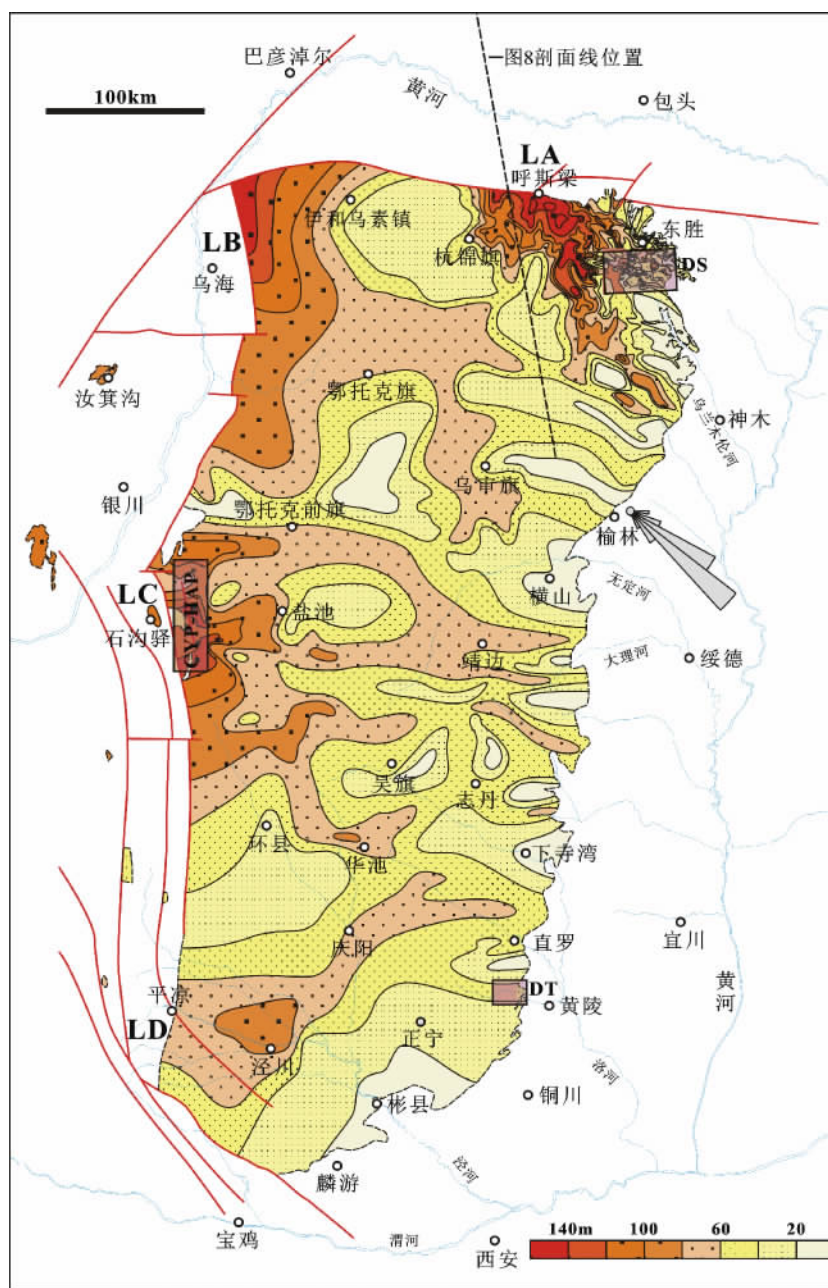


图7 鄂尔多斯盆地直罗组潜在铀储层分布规律

(据文献[58]修改)

Fig. 7 Distribution of the potential uranium reservoirs in the Zhiluo Formation, Ordos Basin
 LA—北部阴山物源-沉积垛体; LB—西北部汝箕沟物源-沉积垛体; LC—西部石沟驿物源-沉积垛体; LD—西南部平凉物源-沉积体系; DS—东胜铀矿田; CYP-HAP—惠安堡-磁窑堡铀矿床; DT—店头铀矿床。

坡”的完整性,切断了阴山造山带铀源向鄂尔多斯盆地输送的途径,导致大规模铀成矿作用被终止。源于造山带的充氧富铀流体缺失必将导致盆地还原流场的增强,而不同时期不同性质的断层可能为流场的重大转换提供了重要输导通道。在盆地内部,河套断陷南缘的配套正断层系列已经影响到了东胜铀矿田。这些正断层以及少数长期活动的诸如泊尔江

海子逆断层,可能为盆地还原介质向铀储层和铀矿体中的运移提供了输导通道,从而导致大规模二次还原作用的发生,使东胜铀矿田得以完整保存(图8)。

3.3 盆-山结合部位继承性“宽缓大斜坡”制矿驱动机制

盆-山结合部位的“宽缓大斜坡”,是同沉积期地表水系的径流区,通过地表水系将造山带物源区大

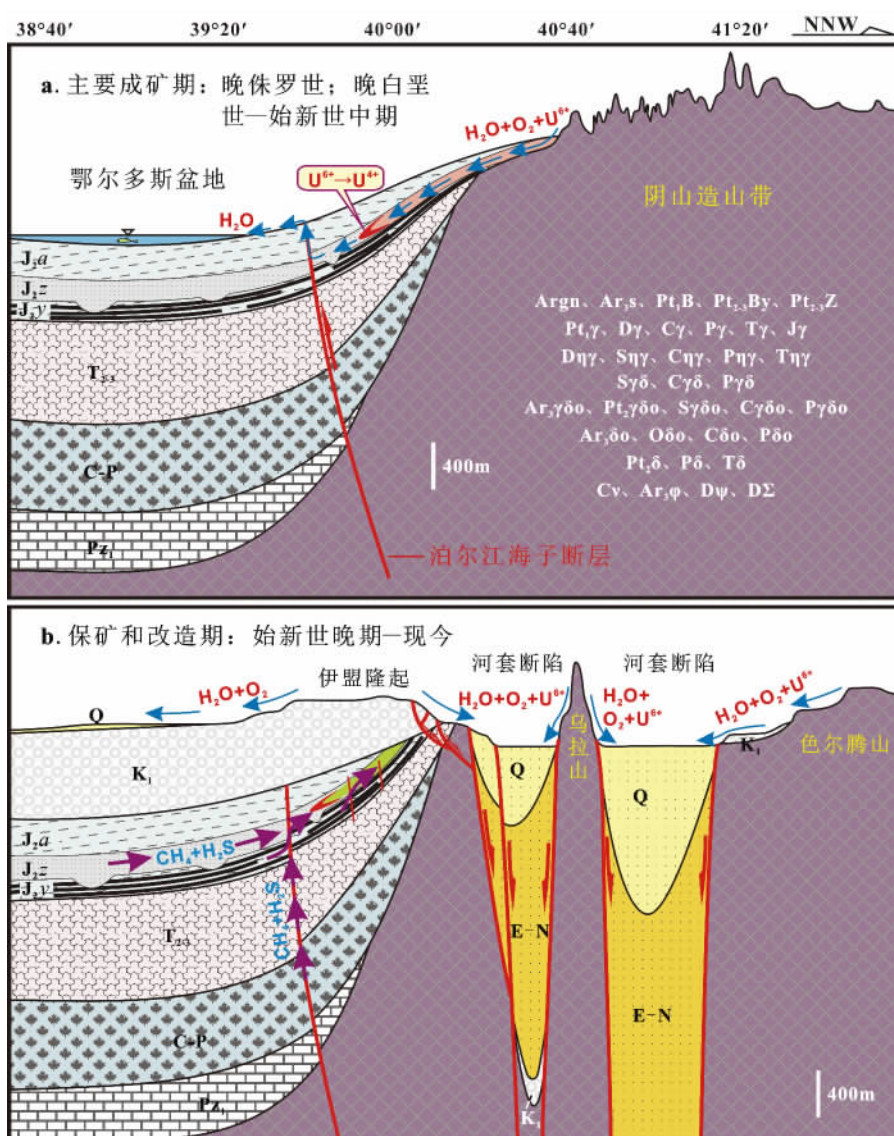


图8 鄂尔多斯盆地北部东胜铀矿田的区域成矿模式图

Fig. 8 Regional metallogenic model of the Dongsheng uranium ore field in the northern Ordos Basin
a—早燕山运动为区域大规模补-径-排含矿流体系统和铀成矿作用奠定了基础;b—喜山期伸展变形构造体制终止了铀成矿作用并通过大规模二次还原作用保护了铀矿田;剖面位置见图7。

量的风化剥蚀物搬运至沉积盆地沉积而构成潜在的含铀岩系。同样,在成矿期,盆-山结合部位的“宽缓大斜坡”也成为富氧含铀成矿流体的径流区与补给区。对多个砂岩型铀矿床的比较研究发现,当成矿期的含矿流场与沉积期的古水流场同位同向且基本一致时,往往更加有利于大型层间氧化带型砂岩铀矿床的形成^[34],伊犁盆地南缘铀矿田如此,鄂尔多斯盆地北部东胜铀矿田如此,松辽盆地南缘的钱家店铀矿田也同样如此。究其原因,主要在于铀储层砂体的多孔介质具有各向异性特征,其平行古水流的水平渗透率相对最高^[63](图9),所以当

含矿流场具有继承性时铀储层砂体中的层间氧化效率最高而且铀的搬运通量最大,这就是成就大型矿床的根本所在——有利的“宽缓大斜坡”构造驱动背景。而一旦“宽缓大斜坡”被破坏,那么成矿作用就被终止或者形成流场面貌迥异的新成矿系统。

继承性的流场系统能够保证铀储层砂体的空间分布与其内部区域层间氧化带的发育空间相一致,这样就能形成以物源—朵体为单位的超级成矿系统,在这个系统中成矿作用特别是蚀变作用类型就往往具有良好的一致性。例如,在鄂尔多斯盆地北

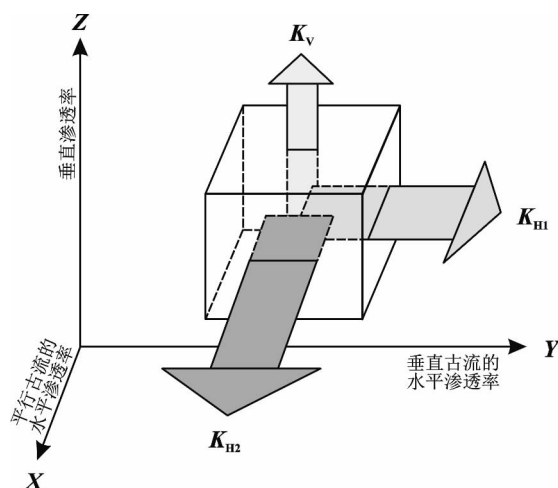
图9 砂岩储层的多孔介质各向异性特征模式^[63]

Fig. 9 Anisotropic model of properties in the sandstone reservoirs^[63]

部东胜铀矿田, 虽然由于铀储层的原因或者由于还原介质的原因, 造成皂火壕铀矿床、大营铀矿床、纳岭沟铀矿床等在成矿层位和空间位置等方面存在差异, 但是蚀变作用类型均表现为具有二次还原性质的“绿色”古层间氧化特征。

4 沉积型铀成矿构造域中古气候要素的匹配

长期以来, 铀矿地质学家在讨论砂岩型铀矿的成矿机理时, 都特别强调了成矿时期干旱古气候的重要性, 因为干旱的古气候环境可以避免溶解铀从造山带搬运至盆地要改的途径中被吸附耗散, 从而保证造山带溶解铀的高效率输导。但是, 通过对我国沉积型铀成矿构造域中, 不同地区、不同时代的砂岩型铀矿床的对比研究发现, 含铀岩系形成发育的沉积期古气候对铀成矿起到了更为重要的影响。在区域古构造的协同影响下, 沉积期的古气候不仅制约了潜在铀储层砂体的发育, 而且制约了铀储层和整个含铀岩系内部的还原介质类型、丰度和分布, 继而在成矿期配合盆缘造山带物源区的抬升程度以及斜坡带的水力梯度和排泄区等构造因素联合控制层间氧化带发育的规模、形态和空间定位特征, 进而约束着层间氧化带型铀矿的形成条件与重要特征(图10)。笔者曾形象地比喻为, 铀储层砂体结构(非均质性)及其顶底板隔水层的特征制约着层间氧化带发育的方向和轨迹, 而铀储层内部和外部还原介质

的丰度则控制着古层间氧化带推进的里程及前锋线的具体位置^[35]。

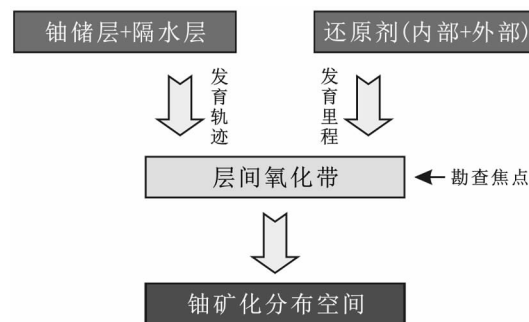


图10 铀储层和还原剂对铀成矿作用的制约关系

Fig. 10 Effects of the uranium reservoirs and reductive media on the uranium mineralization

4.1 沉积期潮湿古气候背景下的铀成矿特征——伊犁-吐哈模式

在我国沉积型铀成矿构造域的西部, 砂岩型铀矿产出于伊犁盆地和吐哈盆地的水西沟群含煤岩系中, 潮湿的古气候环境使铀储层砂体中的还原介质丰富而且分布均匀, 所以成矿时期的层间氧化带规模往往发育有限, 纵向延伸几 km 至十几 km (图11), 矿体位于盆地边缘且多为卷状矿体。

4.2 沉积期由潮湿→干旱古气候转换背景下的铀成矿特征——鄂尔多斯东胜模式

在我国沉积型铀成矿构造域的中部, 以鄂尔多斯盆地为代表, 砂岩型铀矿主要产于直罗组底部。该层位介于古气候由潮湿向干旱的转换阶段^[34], 铀储层砂体中的还原介质丰度有限且垂向分布不均匀, 层间氧化带的发育和铀矿化还需要借助铀储层外部的还原介质, 即铀储层直接顶底板的还原介质能量——薄煤线或炭质泥岩(图12), 这种沉积背景直接导致了大规模区域层间氧化带的发育。

如果粗略恢复鄂尔多斯盆地原型并考虑其与古阴山山脉的关系, 则该区古层间氧化带的纵向延伸规模可能为 150 km, 现存于铀储层中的古层间氧化带的面积超过 5 500 km²。另外, 处于由潮湿向干旱气候过渡阶段形成的铀储层, 其内部还原介质丰度在垂向上具有逐渐减少的趋势, 这在某种程度上可能影响了铀矿体的几何形态——少量的卷状矿体和大量的板状矿体。有鉴于此, 笔者在继承前人“古层间氧化铀成矿模式”的基础上, 进一步地提出了“微弱聚煤作用制约下的古层间氧化成矿模式”, 指出在大营铀矿乃至整个东胜铀矿田“铀储层顶板的微弱

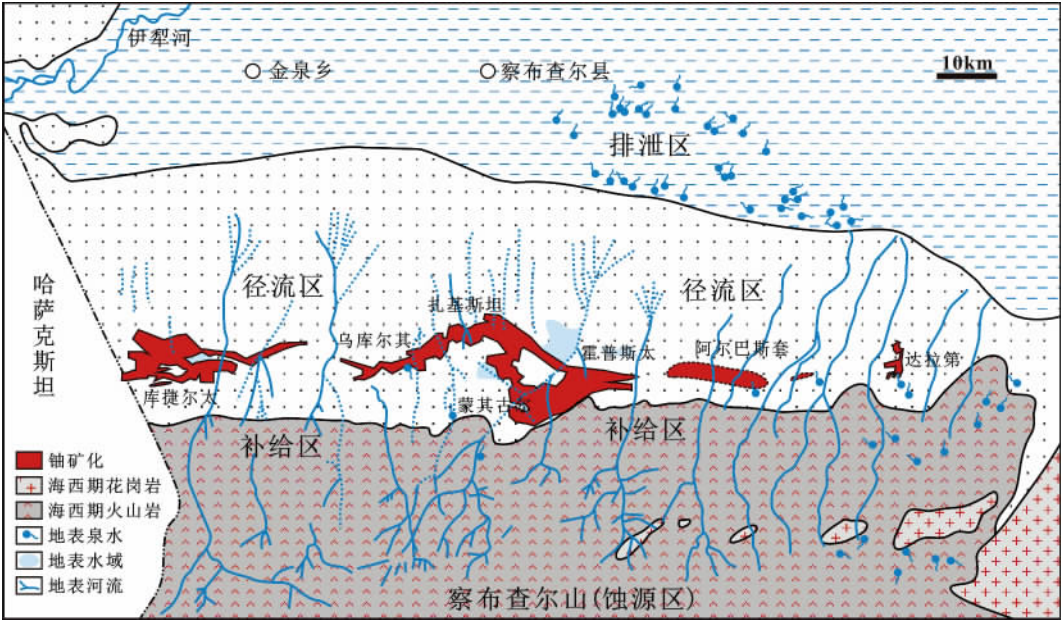


图 11 伊犁盆地南部铀矿化及其与物源区和含矿流体系统的平面配置关系
Fig. 11 Uranium deposits in the southern Yili Basin and their spatial arrangement with provenance and mineral-charged flow field
注意矿化带距离蚀源区不超过 20 km。

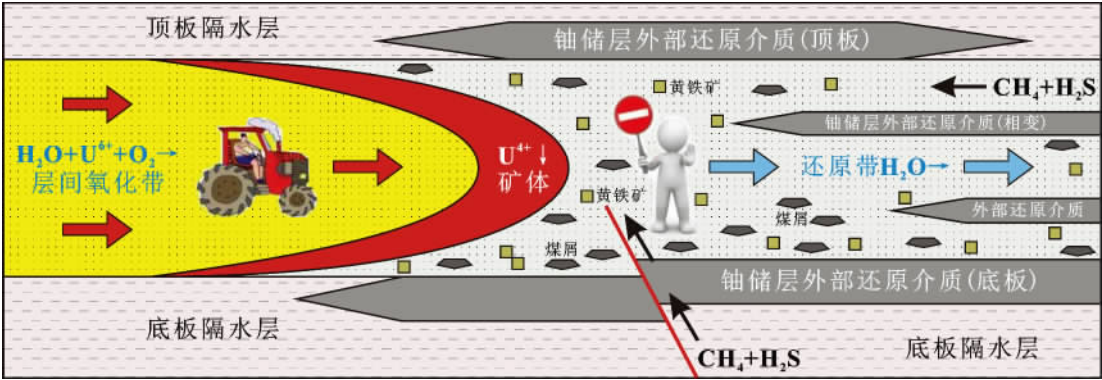


图 12 砂岩型铀矿储层内部和外部还原介质的联合控矿机理
Fig. 12 Ore-controlling mechanism of the reductive media inside and outside uranium reservoirs

聚煤事件”成为重要的区域找矿标志^[35]。

4.3 沉积期干旱古气候背景下的铀成矿特征——松辽钱家店模式

在我国沉积型铀成矿构造域的东部,以松辽盆地南部钱家店铀矿田为代表,砂岩型铀矿形成于上白垩统姚家组。在松辽盆地,姚家组是典型的红层,这可以从含铀岩系中大量的红色泥岩、红色粉砂岩,以及大量钙质姜结核和微体古生物化石种属得到印证,实际上钱家店铀矿田是一种发育于红层中的砂岩型铀矿床的聚集区,所以笔者用“红层相控模式”来阐明该类型铀成矿机理^[39]。由于姚家组是红层,

所以铀储层中缺乏还原介质,成矿时期的含氧富铀成矿流体可以叠加氧化早期的储层砂体,这使得层间氧化带具有巨大规模。对盆地的原型恢复及其考虑与燕山造山带的物源供给关系,笔者认为其层间氧化带的纵向延伸规模超过了 250 km(图 13)。

缺乏还原介质是“红层”制矿的关键问题。研究发现,松辽盆地南部的姚家组系辫状河-辫状河三角洲成因,姚家组在钱家店附近存在一个持续发育的大型分流间湾,分流间湾成因的暗色沉积物中包含有大量分散的有机质和硫化物,它们是最好的还原剂——一种铀储层外部还原剂。当富氧含矿流体运

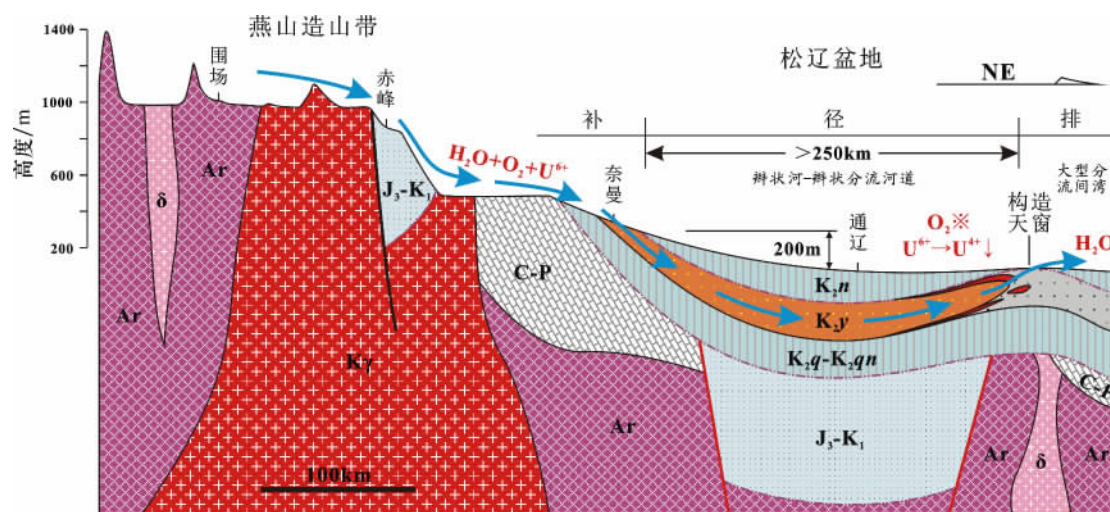


图 13 松辽盆地南部钱家店铀矿田的区域铀成矿模式

Fig. 13 Regional metallogenetic model of the Qianjiadian uranium ore field in the southern Songliao Basin
 嫩江组末期松辽盆地的区域构造反转事件促成了姚家组大规模的含矿流体补-径-排系统,导致了超大型铀矿床的形成。注意铀成矿期的构造天窗为泄水区。新生代的沉积超覆事件使成矿系统废弃,矿床总体处于改造破坏阶段。

移抵达该区时,氧化作用就会受到抑制而形成的区域稳定发育的层间氧化带前锋线,所以该区的铀矿化体总体呈现向盆地中心延伸的“U”字型(图 14)。对姚家组不同层位暗色泥岩厚度分布规律的编图发现,暗色泥岩沉积中心具有继承性且向盆地边缘迁移,这说明分流间湾稳定发育并总体处于湖泊扩展序列中,铀矿化作用主要位于暗色泥岩靠近上游边缘一侧,即迎水面一侧。这进一步地说明了,在干旱古气候背景下发育的含铀岩系中,分流间湾相暗色沉积物对层间氧化型的铀矿化具有控制作用^[39]。或许由于“红层”中还原介质不足以及垂向分布不均匀,导致该区的铀矿化体多呈现为板状。

5 讨论

对沉积型铀矿成矿规律总结和铀成矿构造域研究的主要目的在于指导勘查预测。笔者认为,在中国的沉积型铀成矿构造域中进行预测应该分层次展开:

(1) 盆地级别的筛选。应该说毗邻古亚洲洋造山带的大中型沉积盆地都是沉积型铀矿勘查的主要远景区。我们既要在已有发现的沉积盆地中继续寻找新的铀矿床,还要特别重视目前尚未突破的沉积盆地,特别是准噶尔盆地、塔里木盆地、河西走廊盆地群、海拉尔盆地等。

(2) 在沉积盆地中,要在深入剖析盆地构造格架

以及区域含矿流场补-径-排关系基础上,再依据含铀岩系自身的特色圈定和评价找矿靶区。要特别重视同沉积期不同古气候背景下发育的铀储层砂体所具有的原生还原介质类型和能量的差别,准确估计层间氧化带发育的规模。通常情况下,随着同沉积期古气候条件由潮湿向干旱演变,铀储层的内部还原介质类型将由富砾级煤碎屑向分散有机质演化,而铀储层外部还原介质将由含煤岩系向暗色泥质岩系演化。这种变化导致含铀岩系对层间氧化作用的抑制力降低,层间氧化带规模将逐渐变大,由 km 级别到百 km 级别乃至数百 km 级别(表 2)。在极端情况下,一些含煤和含油岩系“拒绝”富氧含铀成矿流体的渗入,而一些“红层”砂体却构成了富氧含铀成矿流体的运移通道。所以,当铀储层和成矿流场等条件具备时,应该依据还原介质类型和丰度评价预测远景区。在半潮湿半干旱古气候沉积背景条件下,距盆地边缘百 km 左右的辫状河三角洲平原分流河道是重点刻画对象,铀储层砂体顶底板薄煤线和炭质泥岩分布区及其迎水面一侧应该是重点靶区。而在干旱红层中,应将重点聚焦到相对远离盆地边缘约数百 km 的辫状河三角洲平原与三角洲前缘过渡带,具有一定规模的暗色细粒沉积物及其迎水面一侧是重点区域。以松辽盆地姚家组干旱红层为例,应该在全盆地精细刻画和识别第二个或者更多类似于钱家店地区稳定发育的大型分流间湾,其上游边缘可能存在大规模的铀矿化。

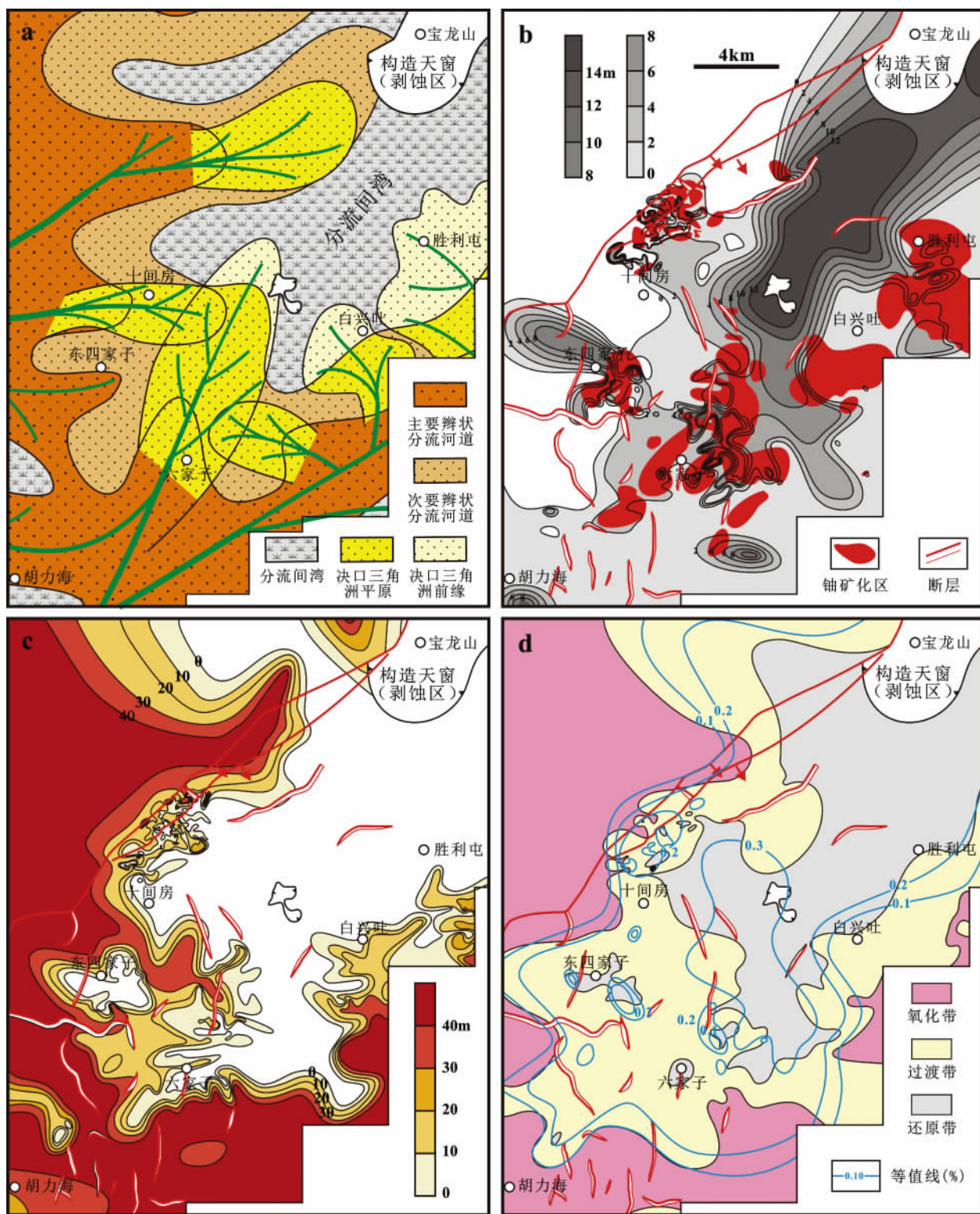


图 14 松辽盆地南部钱家店铀矿田主要成矿要素空间配置图

Fig. 14 Spatial arrangement of the primary metallogenetic factors of the Qianjiadian uranium ore field in the southern Songliao Basin

a—沉积体系图; b—暗色泥岩厚度与铀矿化体叠合图; c—铀储层中氧化砂体厚度图; d—层间氧化带分带性与 TOC 含量叠合图。解剖层位: 湖泊扩展体系域第 1 小层序(SQ_{K2y}—EST(Pss1))。

表2 中国北方铀成矿构造域含铀岩系沉积期古气候类型对大规模外生铀成矿作用的约束

Table 2 Synsedimentary palaeoclimate types in uranium-bearing series and their effects on the large-scale epigenetic uranium mineralization in the tectonic domain of uranium mineralization, North China

含铀岩系沉积时期古气候类型	盆缘造山带	盆地类型	盆地规模	含铀岩系层位	铀储层特征	铀矿类型	层间氧化带延伸规模/km		矿床规模	矿体形态	成矿时代
							横向长度	纵向宽度			
潮湿	北天山与中天山造山带	山间盆地伊犁盆地与吐哈盆地南缘	中型盆地 $3.6 \times 10^4 \text{ km}^2$ (境内)	早、中侏罗世水西沟群	暗色含煤岩系	层间氧化带型砂岩铀矿为主	350± (境内)	2~15	大型、超大型铀矿床	典型卷状,少数板状	1~30 Ma 为主
由半潮湿转向半干旱	阴山造山带	逆冲造山间歇期鄂尔多斯盆地北缘	大型盆地 $25 \times 10^4 \text{ km}^2$	中侏罗世直罗组下段	含煤岩系与红色岩系之间的灰色岩系	层间氧化带型砂岩铀矿	350 ±	150	大型、超大型铀矿床	板状为主,少数卷状	(120±11) Ma、 (80±5) Ma、 (20±2) Ma、 (8±1) Ma
干旱	燕山造山带	裂后热沉降松辽盆地西南缘	大型盆地 $26 \times 10^4 \text{ km}^2$	晚白垩世姚家组	红色岩系	层间氧化带型砂岩铀矿	400 ±	>250	大型、超大型铀矿床	板状为主,少数卷状	(89±11) Ma、 (67±5) Ma、 (53±3) Ma

6 结论

(1)通过对大型沉积型铀矿床分布规律与区域构造单元的空间配置关系的研究,笔者认为古亚洲洋造山带及其两侧的中—新生代沉积盆地,是中国最重要的沉积型铀矿床形成发育的铀成矿构造域。尽管铀矿床主要赋存于中—新生代沉积盆地,滨太平洋构造域有叠加影响,但是古亚洲洋造山带总体格架和盆—山耦合作用的基础性重大影响却长期延续直至如今,所以它是该成矿构造域内制约产铀盆地、含铀岩系与沉积型铀矿等“三级控制”的基本原因和主控因素。

(2)在沉积型铀成矿构造域中,古亚洲洋造山带是重要的富铀地质体,盆—山耦合作用是形成铀源供给系统的必要前提,地表水系的沉积作用是连接造山带和沉积盆地的纽带,它制约了含铀碎屑和溶解铀(U^{6+})的迁移输送途径。由于泥岩型铀矿床和砂岩型铀矿床的成因差异性,前者表现为同沉积期的单一铀源供给系统,而后者表现为同沉积期和后生成矿期的双重铀源供给系统,其中铀储层砂体本身“再生铀源”不容忽视。

(3)沉积型铀成矿构造域中的周期性区域构造事件以及盆—山结合部位“宽缓大斜坡”在更大尺度上制约含铀岩系形成发育与区域铀成矿作用过程。对于泥岩型铀矿床而言,同沉积期的稳定大地构造

背景,诸如努和廷铀矿床具有的断陷盆地裂后热沉降构造环境,对于充足铀源供给、稳定湖泊发育以及湖泊淤泥对铀的持续吸附具有决定性作用。对于砂岩型铀矿床而言,铀成矿既取决于潜在铀储层砂体形成发育期的稳定古构造背景,也取决于成矿期成就大型含矿流体的补—径—排系统持续发育的古构造背景,有些古砂岩型铀矿床(像东胜铀矿田)还对成矿期后构造环境非常敏感。研究认为,当成矿期的含矿流场与沉积期的古水流体系统基本一致时,铀储层砂体中层间氧化效率最高而且铀搬运通量最大,更加有利于成就大型、超大型矿床。

(4)含铀岩系沉积期的古气候背景研究值得高度重视。在区域古构造的协同影响下,沉积期古气候不仅制约了潜在铀储层砂体发育的规模和结构,同时更重要地制约了铀储层内部和外部还原介质的类型及其空间分布。铀储层砂体结构(非均质性)在隔水层影响下制约着层间氧化带发育的方向和轨迹,而铀储层内部和外部还原介质则控制着古层间氧化带推进的里程及前锋线位置,铀矿化作用则取决于层间氧化带。所以,同沉积期的潮湿型、半潮湿半干旱型和干旱型的古气候背景是制约铀成矿期层间氧化发育方向和规模的极其重要的地质因素。

(5)对我国沉积型铀成矿构造域的研究表明,毗邻古亚洲洋造山带的中—新生代大中型沉积盆地都是沉积型铀矿勘查的主要远景区。在目标沉积盆地中,要在深入剖析盆地构造格架以及区域含矿流场

补-径-排关系基础上,再依据含铀岩系自身的特色(古气候背景、还原介质类型与分布空间)圈定和评价找矿靶区。

感谢中国核工业地质局、国土资源部中央地质勘查基金管理中心、中国石油辽河油田分公司、中国石化河南油田分公司等单位,长期以来为中国地质大学(武汉)盆地铀资源研究团队提供的科研基地和经费资助。感谢李思田教授、郑大瑜研究员级高工、黄净白研究员级高工、黄世杰研究员级高工、赵凤民研究员级高工、张金带研究员级高工在沉积学和铀矿地质学的边缘交叉学科领域给予作者长期的指导、启发和建议。

参考文献

- [1] 李春昱. 矿床与全球构造(米契尔和加森著)中译本序[M]. 北京:地质出版社,1984.
- [2] 王功洛,曾亚参,宫继平. 全球巨型构造体系与成矿域的划分[J]. 地球科学:中国地质大学学报,1984(4):11-24.
- [3] 郭文魁. 1:4000000 中国内生金属成矿图[M]. 北京:地图出版社,1987.
- [4] 陈毓川,陶维屏. 中国金属、非金属矿产资源及成矿规律[J]. 中国地质,1996(8):10-14.
- [5] 朱裕生,王全明,张晓华,等. 中国成矿区带划分及有关问题[J]. 地质与勘探,1999,35(4):1-4.
- [6] 翟裕生. 区域构造、地球化学与成矿[J]. 地质调查与研究,2003,26(1):1-7.
- [7] 徐志刚. 关于中国成矿域划分的讨论[J]. 矿床地质,2004,23(增刊):54-61.
- [8] 刘池洋,邱欣卫,吴柏林,等. 中-东亚能源矿产成矿域基本特征及其形成的动力学环境[J]. 中国科学:D辑,2007,37(增刊I):1-15.
- [9] 梅燕雄,裴荣富,杨德凤,等. 全球成矿域和成矿区带[J]. 矿床地质,2009,28(4):383-389.
- [10] 裴荣富. 中国矿床模式[M]. 北京:地质出版社,1995.
- [11] 王成善,唐菊兴,顾雪祥,等. 喜马拉雅构造-成矿域及其成矿效应初步分析[J]. 矿物岩石,2001,21(3):146-152.
- [12] 黄净白,黄世杰. 中国铀资源区域成矿特征[J]. 铀矿地质,2005,21(3):129-138.
- [13] 张金带,徐高中,林锦荣,等. 中国北方6种新的砂岩型铀矿对铀资源潜力的提示[J]. 中国地质,2010,37(5):1434-1449.
- [14] 王荃. 内蒙古中部中朝与西伯利亚古板块间缝合线的确定[J]. 地质学报,1986(1):31-43.
- [15] 李双林,欧阳自远. 兴蒙造山带及邻区的构造格局与构造演化[J]. 海洋地质与第四纪地质,1998,18(3):45-54.
- [16] 任纪舜,牛宝贵,刘志刚. 软碰撞、叠覆造山和多旋回缝合作用[J]. 地学前缘,1999,6(3):85-93.
- [17] 杨庚,钱祥麟. 中生代天山板内造山带隆升证据:锆石-磷灰石裂变径迹年龄测定[J]. 北京大学学报:自然科学版,1995,31(4):473-478.
- [18] 徐仲元,刘正宏,杨振升. 内蒙古大青山地区中生代造山运动及构造演化[J]. 长春科技大学学报,2001,31(4):317-322.
- [19] 陈志勇,李玉玺,王新亮,等. 包头—呼和浩特北部地区逆冲推覆构造[J]. 地质通报,2002,21(4/5):251-258.
- [20] 刘正宏,徐仲元,杨振升. 内蒙古大青山印支运动厘定[J]. 地质论评,2003,49(5):457-463.
- [21] 张旗,王焰,金惟俊,等. 早中生代的华北北部山脉:来自花岗岩的证据[J]. 地质通报,2008,27(9):1391-1403.
- [22] 和政军,李锦铁,牛宝贵,等. 燕山—阴山地区晚侏罗世强烈推覆-隆升事件及沉积响应[J]. 地质论评,1998,44(4):407-418.
- [23] Davis G A, Wang C, Zheng Y D, et al. The enigmatic Yinshan fold-and-thrust belt of northern China: New views on its intraplate contractional styles[J]. Geology, 1998, 26(1): 43-46.
- [24] 刘正宏,徐仲元,杨振升. 阴山中生代地壳逆冲推覆与伸展变形作用[J]. 地质通报,2002,21(4/5):246-250.
- [25] 董树文,张岳桥,龙长兴,等. 中国侏罗纪构造变革与燕山运动新诠释[J]. 地质学报,2007,81(11):1449-1461.
- [26] 陈祖伊,陈戴生,古抗衡. 中国铀矿床研究评价(第三卷:砂岩型铀矿床)[R]. 北京:中国核工业地质局和核工业北京地质研究院,2011.
- [27] 陈祖伊. 亚洲砂岩型铀矿区域分布规律和中国砂岩型铀矿找矿对策[J]. 铀矿地质,2002,18(3):129-137.
- [28] 王正邦. 国外地浸砂岩型铀矿地质发展现状与展望[J]. 铀矿地质,2002,18(1):9-21.
- [29] 马丽芳,乔秀夫,闵隆瑞,等. 中国地质图集[M]. 北京:地质出版社,2002.
- [30] 姚振凯,向伟东,张子敏,等. 中央克兹勒库姆区域构造演化及铀成矿特征[J]. 世界核地质科学,2011,28(2):84-88,119.
- [31] Dahlkamp F J. Uranium Deposits of the World (Asia)[M]. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2009.
- [32] 洪大卫,王式光,谢锡林,等. 试析地幔来源物质成矿域:以中亚造山带为例[J]. 矿床地质,2003,22(1):41-55.
- [33] 焦养泉,陈安平,王敏芳,等. 鄂尔多斯盆地东北部直罗组底部砂体成因分析:砂岩型铀矿床预测的空间定位基础[J]. 沉积学报,2005,23(3):371-379.
- [34] 焦养泉,吴立群,杨生科,等. 铀储层沉积学:砂岩型铀矿勘查与开发的基础[M]. 北京:地质出版社,2006.
- [35] 焦养泉,彭云彪,李建伏,等. 内蒙古自治区杭锦旗大营铀矿成矿规律与预测研究[R]. 武汉:中国地质大学(武汉),2012.
- [36] 焦养泉,吴立群,荣辉,等. 鄂尔多斯盆地东北部阴山物源-沉积体系重建及与铀成矿关系研究[R]. 武汉:中国地质大

- 学(武汉), 2014.
- [37] 焦养泉, 万军伟, 朱培民, 等. 伊犁盆地铀成矿条件分析与选区研究[R]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2013.
- [38] 焦养泉, 吴立群, 汪小妹, 等. 松辽盆地铀资源评价及南部地区铀成矿规律与预测研究[R]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2012.
- [39] 焦养泉, 吴立群, 荣辉, 等. 钱家店铀矿床铀源及还原介质条件分析[R]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2013.
- [40] 焦养泉, 吴立群, 荣辉, 等. 二连盆地额仁淖尔凹陷泥岩型铀矿形成发育的沉积学背景研究[R]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2009.
- [41] Bonnetti C, Malartre F, Huault V, et al. Sedimentology, stratigraphy and palynological occurrences of the late Cretaceous Erlian Formation, Erlian Basin, Inner Mongolia, People's Republic of China[J]. Cretaceous Research, 2014, 48: 177-192.
- [42] 夏毓亮, 林锦荣, 刘汉彬, 等. 中国北方主要产铀盆地砂岩型铀矿成矿年代学的研究[J]. 铀矿地质, 2003, 19(3): 129-136.
- [43] 王正其, 李子颖, 管太阳, 等. 新疆伊犁盆地 511 砂岩型铀矿床成矿作用机理研究[J]. 矿床地质, 2006, 25(3): 302-311.
- [44] 秦明宽, 赵瑞全, 王正邦. 伊犁盆地可地浸砂岩铀矿床层间氧化带的分带性及后生蚀变[J]. 地球学报, 1999, 20(增刊): 644-650.
- [45] Hamilton E I. Environmental variables in a holistic evaluation of land contaminated by historic mine wastes: A study of multi-element mine wastes in West Devon, England using arsenic as an element of potential concern to human health[J]. The Science of the Total Environment, 2000, 249: 171-221.
- [46] Watson M P, Hayward A B, Parkinson D N, et al. Plate tectonic history, basin development and petroleum source rock deposition onshore China[J]. Marine and Petroleum Geology, 1987, 4: 205-225.
- [47] 王桂梁, 刘桂建, 邹海, 等. 华北地台北缘中生代盆-山的耦合转移及其动力学分析[J]. 煤田地质与勘探, 1999, 27(6): 14-17.
- [48] 方世虎, 郭召杰, 张志诚, 等. 中生代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, 2004, 40(6): 886-897.
- [49] 陈安清, 陈洪德, 徐胜林, 等. 鄂尔多斯盆地北部晚古生代沉积充填与兴蒙造山带“软碰撞”的耦合[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2011, 41(4): 953-965.
- [50] 许欢, 柳永清, 刘燕学, 等. 阴山—燕山地区晚侏罗世—早白垩世土城子组地层、沉积特征及盆地构造属性分析[J]. 地学前缘, 2011, 18(4): 88-106.
- [51] Li D P, Chen Y L, Wang Z, et al. Paleozoic sedimentary record of the Xing-Meng Orogenic Belt, Inner Mongolia: Implications for the provenances and tectonic evolution of the Central Asian Orogenic Belt[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57: 776-785.
- [52] 孙肇才, 谢秋元. 叠合盆地的发展特征及其含油气性: 以鄂尔多斯盆地为例[J]. 石油实验地质, 1980, 2(1): 13-21.
- [53] 孙国凡, 谢秋元. 鄂尔多斯盆地的演化叠加与含油气性: 中国大陆板块内部一个大型盆地的原型分析[J]. 石油与天然气地质, 1986, 7(4): 357-367.
- [54] 李思田, 程守田, 杨士恭, 等. 鄂尔多斯盆地东北部层序地层及沉积体系分析: 侏罗系富煤单元的形成、分布及预测基础[M]. 北京: 地质出版社, 1992.
- [55] 李思田, 林畅松, 解习农, 等. 大型陆相盆地层序地层学研究: 以鄂尔多斯中生代盆地为例[J]. 地学前缘, 1995, 2(4): 133-136.
- [56] Li S T, Yang S G, Tomasz J. Upper Triassic-Jurassic foreland sequences of the Ordos Basin in China stratigraphic, evolution of foreland basins[J]. SEPM Special Publication, 1995, 52: 233-241.
- [57] Jiao Y Q, Lu Z S, Zhuang X G, et al. Dynamical process and genesis of Late Triassic sediment filling in Ordos Basin[J]. Journal of China University of Geosciences, 1997, 8(1): 45-48.
- [58] 焦养泉, 吴立群, 苗爱生, 等. 鄂尔多斯盆地铀储层预测评价研究[R]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2011.
- [59] 刘正宏, 徐仲元, 杨振升, 等. 鄂尔多斯北缘石合拉沟逆冲推覆构造的发现及意义[J]. 地质调查与研究, 2004, 27(1): 24-27.
- [60] 赵国玺. 泊尔江海子断裂带岩性特征及封闭性演化史研究[D]. 西安: 西北大学, 2007.
- [61] 郑孟林, 金之钧, 王毅, 等. 鄂尔多斯盆地北部中生代构造特征及其演化[J]. 地球科学与环境学报, 2006, 28(3): 31-36.
- [62] 韩鹏, 高飞, 王建强. 鄂尔多斯周缘新生代盆地断陷发生时间探讨[J]. 内蒙古石油化工, 2008(5): 38-39.
- [63] Jiao Y Q, Yan J X, Li S T, et al. Architectural units and heterogeneity of channel reservoirs in the Karamay Formation, outcrop area of Karamay oil field, Junggar Basin, Northwest China[J]. AAPG Bulletin, 2005, 89(4): 529-545.