

文章编号: 1009-6248(2007)01-0072-11

从铀成矿条件分析西北地区砂岩型铀矿找矿

王永和¹, 焦养泉², 吴立群²

(1. 西安地质矿产研究所, 陕西 西安 710054; 2. 中国地质大学 湖北 武汉 430074)

摘要: 随着地浸技术的引进与不断完善, 沉积盆地砂岩型铀矿床已经成为我国铀资源找矿重点。可地浸砂岩型铀矿主要受层间氧化带控制, 同时与高背景的铀蚀源区、盆地较弱的新构造运动、沉积和成矿期不同的古气候、有利的岩相岩性、富含有机或无机质还原剂、良好的地下水径流动力条件等密切相关。通过对西北地区典型砂岩型铀矿富集区及其相关盆地成矿地质条件的宏观分析, 指出吐哈、伊犁盆地南部和鄂尔多斯盆地周边具有良好的成矿地质条件和找矿潜力, 对具有类似于上述盆地的西北地区铀矿找矿前景进行了展望。

关键词: 砂岩型铀矿; 成矿条件; 找矿前景; 西北地区

中图分类号: P619.14 **文献标识码:** A

砂岩型铀矿床是主要的铀矿床类型之一。随着铀资源地下浸出技术不断完善, 沉积盆地中砂岩型铀资源由原来的山地工程采矿技术所不能利用的贫铀矿化, 转变为环保和经济可采的铀资源, 从而成为一种经济价值可观的能源矿产(赵鹏大等, 2003)。20世纪70~80年代以来, 前苏联、美国等许多国家和地区铀矿地质工作主要集中在寻找和勘探沉积盆地中的砂岩型铀矿, 在发现了大批矿床的同时, 在砂岩型铀矿的预测、评价、采矿等方面积累了丰富经验和开发技术(Crawly Richard A, 1983; IAEA, 1985; Franz J. Dahlkamp, 1993; 侯惠群等, 2002)。我国在20世纪90年代以来, 铀矿地质工作的重点也从原来主要寻找火山岩型和花岗岩型等内生铀矿床, 转变到主要寻找沉积盆地内砂岩型铀矿上来, 并陆续在我国北方的伊犁、吐哈、鄂尔多斯、二连等盆地获得找矿突破, 发现了一大批铀矿床(Bureau of Geology, 2002; 吴伯林, 2005)。

与找矿工作进展同步, 砂岩型铀矿的成矿理论

随之创立。在区域铀矿成矿规律方面, 美国提出了“古老富铀地块内外边缘中生代活化区控矿”; 前苏联通过中亚地区的铀矿勘查和研究工作提出了“次构造带控矿”的区域成矿理论。近年来, 俄罗斯专家通过对俄罗斯和蒙古境内古河道型砂岩铀矿的研究, 提出其成因类型属于潜水-层间水渗入氧化作用成因, 完善了潜水氧化带型砂岩铀矿成矿理论。近5~6年来, 俄罗斯对以往发现的矿点、矿化点从不整合面型铀矿的角度进行了再评价, 在覆于中元古代黑云母和石榴石黑云母片麻岩和片岩之上的中晚里菲期地台盖层性质的细砾岩-砂岩段的最底部, 发现了多期成矿的不整合面型富铀矿床, 成矿时代从中新元古代、古生代到中生代共5次成矿。拓宽了人们以往主要在中新生代盆地找矿的视野。在我国, 核工业地质局系统、中国地质大学等单位和相关专家学者, 在砂岩型铀矿的地质找矿和科学研究工作的同时, 在盆地构造沉积演化、砂体非均质性(焦养泉等, 2005)、盆地流体地质作用(焦养泉等,

收稿日期: 2006-12-18; 修回日期: 2007-02-27

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973计划-2003CB214600)

作者简介: 王永和(1962-), 男, 教授级高级工程师, 从事区域地质、矿产地质工作。通讯地址: 710054, 西安市友谊东路438号, 西安地质矿产研究所; 电话: 029-87821940; E-mail: xawyonghe@cgs.gov.cn。

2004)与砂岩型铀矿成矿机理(Jiao et al, 2005)等方面结合相关盆地进行了研究工作,提出了许多新认识、新观点,为我国砂岩型铀矿的地质找矿起到了重要的指导作用。

1 砂岩型铀矿主要矿床类型及其成矿条件

砂岩型铀矿床的分类,目前尚无统一的划分原则,不同国家和不同地区有不同的划分方案(郭华, 1998, 2004; 王正邦, 2002)。国际原子能机构(IAEA)的世界铀矿床分布图阅读指南(1996),把砂岩型铀矿床划分为卷状、板状、底河道和前寒武纪砂岩四种亚类; Dahlkamp, F. J (1993)把砂岩型铀矿分为板状/准整合、卷状和构造-岩性3个亚类; 前苏联和俄罗斯对砂岩型铀矿多建立在矿床成因的基础上,马什科夫采夫(1997)首先分为同生和后生两类,然后根据矿床产出的构造环境、共生元素、容矿主岩、矿体形态等进一步细分。我国学者对砂岩型铀矿的分类也进行了研究,李胜祥(2001)主要根据含矿沉积建造、容矿主岩沉积环境、矿体形态和矿床成因提出过四种分类方案; 王正邦(2002)重点强调矿床的成因,划分了4种类型; 郭

华(2004)重点根据矿床成因,综合诸多控矿因素,将砂岩型铀矿床划分为表生后成渗人型、外生后成渗人型和外生后成渗人-渗出型3种类型,其中外生后成渗人型又可划分为渗水氧化带型(其中包括底部式古河道型和建造间古河道型两种)和层间氧化带型(其中包括局部性层间氧化带型和区域性层间氧化带型)。

以上这些划分方案,基本上是从矿床成因角度出发,结合世界不同区域、不同盆地砂岩型铀矿成矿作用总结的。但从成矿规模、更适合地浸开采、矿床经济价值等方面考虑,目前发现的矿床更普遍地属于3种类型,即层间氧化带型、古河道型和潜水氧化带型(李思田等, 2004)。

1.1 层间氧化带型砂岩铀矿

层间氧化带型的砂岩型铀矿具有3个特点: ①所有矿体均在含水层中。②矿体发育在砂岩的颜色从黄色向灰色转化的边界面上(即氧化-还原界面,或称蚀变舌的边界,相当于层间氧化带的前锋线)。③在砂体中,许多矿体为卷状(图1)。

1.1.1 成矿条件

砂岩型铀矿床具有成岩-外生的低温起源。地下水化学作用及其迁移使铀从矿源岩石中滤出,并且将其搬运到一个通常由还原介质提供的化学界面的

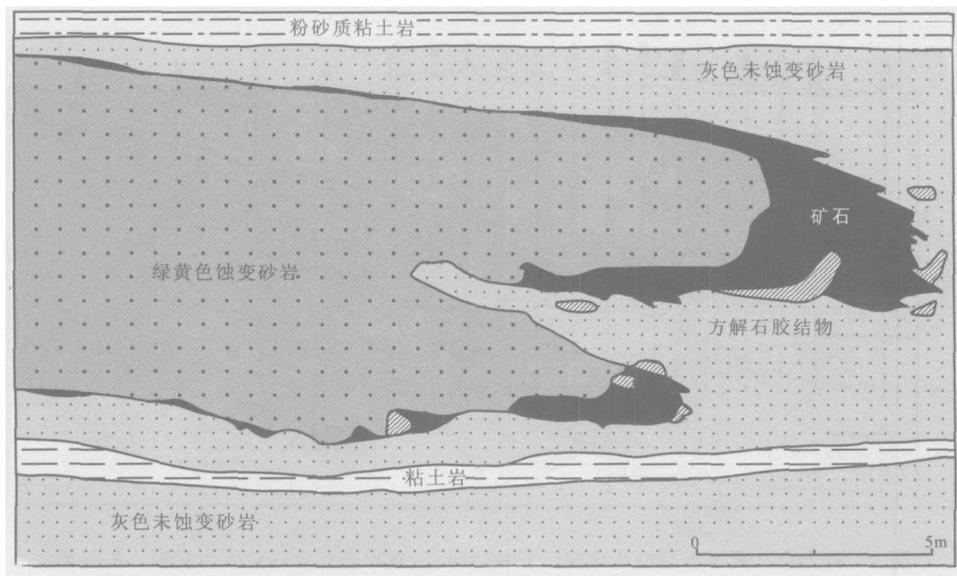


图1 美国怀俄明盆地卷筒状铀矿床剖面特征

(据 Harshman, 1974)

Fig. 1 Profile of rolling uranium deposits in the Wyoming Basin, the USA

附近,铀在此沉淀下来。在这一过程中,成矿作用的诸方面,如古气候、古氧化-还原环境、流体作用性质及其演化均受盆地后期改造及新构造演化特点的制约。控制这些铀矿化作用的过程和就位的实质性参数为沉积环境、主岩岩石学特征、渗透性、吸附/还原介质、足量的溶液和铀源,以及干旱-半干旱的气候条件等。

(1) 区域构造条件:要有稳定的大地构造背景和适当的构造升降作用。前者导致沉积盆地形成宽阔的斜坡带,这不仅有利于形成冲积相和海陆交互地层,也有利于形成局部和区域的层间氧化带。在成矿之前或成矿期,沉积盆地可以有多个次、小幅度的整体抬升和沉降,但幅度不能太大,一般幅度500~1500 m,属次造山带范畴。

(2) 盆地的结构:最好的组合是有双层结构,即盆地基底为富铀地质体,盖层具多个泥-砂-泥地层结构。对于盆地盖层而言,既要有良好的赋矿岩层——可渗透的多孔介质(砂、砾岩),同时也要有良好的顶底板隔水层,这样可以形成相对独立的成矿环境,有利于层间氧化带的形成(图1)。

(3) 铀源条件:铀存在两种来源,一种为蚀源区风化母岩中的铀,另一种为含水层中的铀。对于局部性层间氧化带型砂岩铀矿的形成来说,蚀源区富铀岩石(主要是花岗岩和火山灰等火山岩类)的

存在是必要的和主要的;而区域性层间氧化带型铀矿的形成,含矿目的层铀的活化迁移则是主要的、足够的。

(4) 古气候条件:储矿载体沉积期古气候条件为潮湿、半潮湿气候,已知铀矿床几乎全部产于温湿期盆地沉积的暗色含煤建造和半干旱早期盆地沉积的杂色碎屑岩建造中;成矿期的古气候条件为干旱-半干旱气候。而现代和古代干旱、半干旱气候环境是造就层间氧化带的必要条件。地表景观为沙漠或半沙漠,最好不出现腐植层,避免耗氧。

(5) 岩性、岩相条件:砂体要有足够的规模,陆相的河道砂体、海相的滨-浅海砂体对于砂岩型铀矿的富集最为有利,在沉积相变处往往可以形成富矿带(图2),但当砂体中泥质含量较高时不利于成矿。

(6) 水文地质条件:盆-山之间具有较畅通的地下水渗流动力学系统,使铀元素能在地下水作用下活化、迁移和富集。要求隔水层具有稳定性和一定的厚度,含矿层为承压含水层。一般情况下含水层埋深不超过800 m,埋深过大时含氧水难以渗入,或在渗入过程中氧消耗殆尽。

(7) 岩石地球化学条件:岩石原生地球化学类型主要根据颜色、有机碳、 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 划分出黑色岩石、灰色岩石、绿色岩石、白色岩石和红色岩石等5种类型。

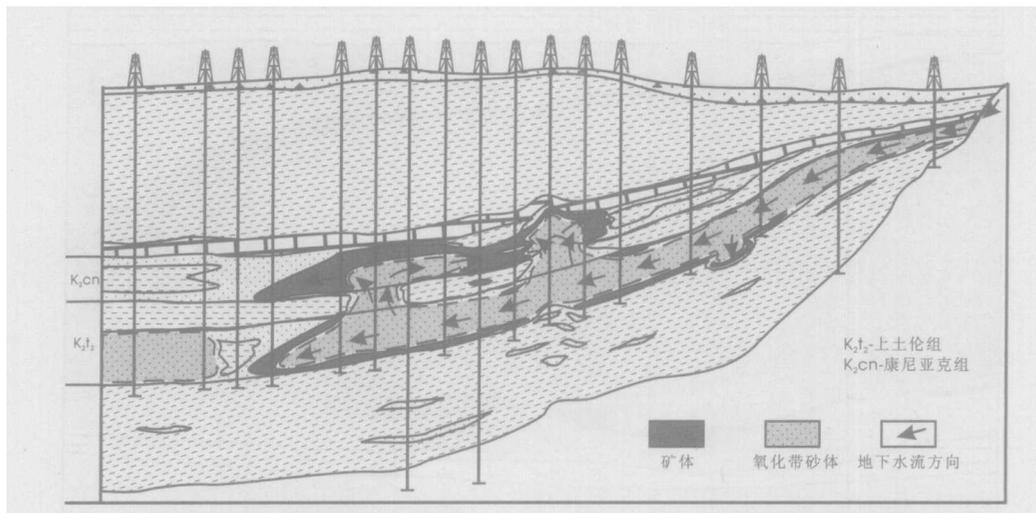


图2 肯太克久别砂岩型铀矿床与沉积相(砂-泥岩相变处对成矿最为有利)的关系
(资料来源于红色丘陵地质企业)

Fig. 2 The relation between sandstone-type uranium deposits and sedimentary facies (transitional positions of sandstone and mudstone facies; the most favorable area to uranium mineralization)

统计发现，黑色和灰色岩石原生地球化学类型有利于层间氧化带型铀矿的形成。主要原因是其中具有足够的还原剂，在层间氧化带形成过程中还原剂导致了岩石地球化学障——氧化-还原界面的形成并吸附了铀。岩石中的还原剂有多种类型，如碳屑、分散有机质、碳氢化合物（石油和烃类天然气）、硫化物（ H_2S 、黄铁矿）等。

(8) 岩石的蚀变条件：蚀变作用主要表现为后生氧化作用和后生还原作用。后生氧化作用主要表现为层间氧化作用。后生还原作用是指盆地深部的还原剂，如石油、烃类气等，沿一定的通道向盆地边缘运移过程中，对原生杂色岩石或层间氧化带的再次还原。

后生氧化作用可以成矿显而易见。需要强调的是，后生还原作用不但可以成矿，还可以保护在此

之前形成的矿床，如鄂尔多斯盆地东北部的东胜铀矿床。在自然界，由氧化→再还原→再氧化的过程可能是多次重复和交替的。

1.1.2 层间氧化带特征及铀成矿机理

层间氧化带的发育主要取决于岩相、水文地质条件、地球化学条件、围岩物质成分等。其中砂体规模和分布方向是制约层间氧化带发育的最关键因素之一。在条带状砂体中可以发育窄的、呈舌状凸出的层间氧化带；席状砂体中的层间氧化带一般较宽。多旋回的泥-砂-泥结构有利于形成多个层间氧化带。在一个层间氧化带中，如果存在更小级别的沉积旋回，那么层间氧化带的前锋线将变得复杂化，可能出现多个次要卷头。根据地层中铁矿物类型、岩石颜色及氧化程度，将层间氧化带分为氧化带、铀矿化带和未氧化灰色岩石带—还原带（图 3）。

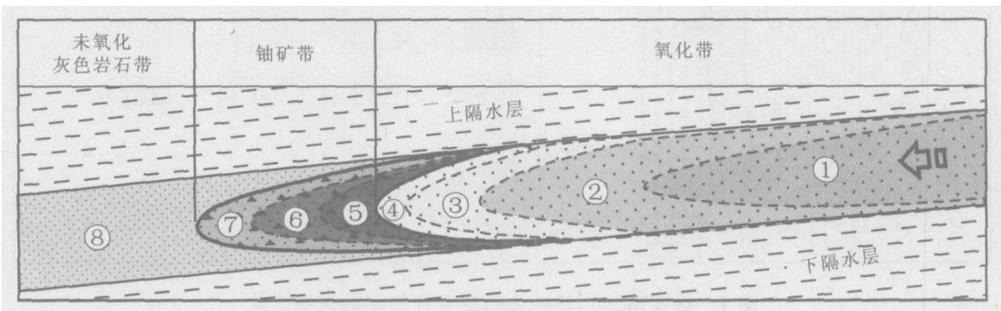


图 3 层间氧化带的基本特征

Fig. 3 The basic characters of interlayer oxidation zone

- ①. 完全氧化亚带；②. 不完全氧化亚带；③. 部分氧化亚带；④. 褪色亚带；⑤. 古铀矿化亚带；
⑥. 贫铀亚带；⑦. 铀的扩散亚带；⑧. 未氧化灰色岩石带

砂岩型铀矿的成矿过程，实质上是成矿流体（包括有机和无机流体）对铀源区岩石铀的活化萃取并在流体中迁移，在适合的地球化学环境中沉淀成矿的过程；对于无机流体来讲，实际上是一种复杂的水-岩作用过程。在这种后生地球化学作用过程中，岩石中留下了非常明显的流体作用的痕迹，及各种后生蚀变地质现象，并反映出明显的阶段性（焦养泉等，2004）。含氧含铀水体进入砂体后， Fe^{2+} 和有机质开始被氧化，随着水体运移距离的增加，或者氧化程度的提高，水中的溶解氧（自由 O_2 ）将逐渐消耗，至氧化带前锋线附近氧消耗殆尽，未氧化灰色岩石带中的厌氧细菌产生 H_2 和 H_2S ，这些还原剂使地层水 pH 降低，有利于 U^{6+} 转换为 U^{4+} ， U^{4+} 沉淀下来形成铀

矿。所以，氧化带前锋是主要的控矿和找矿标志。在空间上，铀矿床严格受层间氧化带控制。在剖面上，矿体定位在层间氧化带前锋线尖灭部位，形态为卷状。矿体两翼厚度通常不等，下翼厚，而上翼薄，原因在于铀的比重较大；在平面上，矿体展布形态与层间氧化带前锋线形态相似。

Re、Se、Mo、V 和 Sc 等是砂岩铀矿床的主要伴生元素，它们常常与铀一起富集于层间氧化带前锋线附近，并呈一定的规律性分布。

1.2 古河道型砂岩铀矿

古河道型砂岩铀矿可分为两大类：一为基底型，指切割盆地基底的古河道沉积物中的铀矿化。主要分布于西西伯利亚南缘的周遍地区，其典型代表是俄罗斯达尔马托夫和马林诺夫等矿床（图 4）；二为

建造间型,指存在于切入下部沉积旋回的河床相沉积物中的铀矿化,主要位于外贝加尔地区的微季姆高原,其代表性矿床有希阿格达等。

基底古河道型砂岩铀矿床的形成条件有:①古老基地上有封闭的古河床沉积。②古河床沉积物具有渗透性。③干旱的古气候条件。④对于古河道型砂岩铀矿,富铀蚀源区,基风化壳的发育是成矿的

必不可少的铀源条件。⑤盆地基底铀背景值高。⑥成矿岩层中长期含水。⑦有长期含氧地下水进入。

铀矿化主要产在河床底部或河道边部,且受砂体的某一韵律层控制,含矿砂岩的岩石地球化学类型为原生灰色,且有后期还原介质的加入,铀矿化具有两种成因:一种为原生铀矿化;另一种为后生成因,即含氧水由河道两侧渗入成矿。

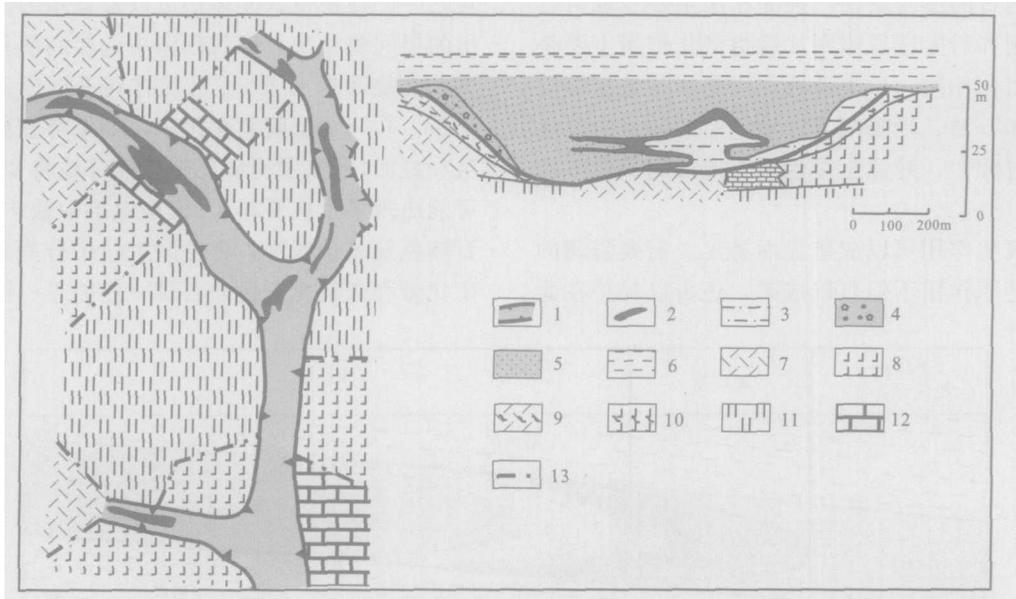


图4 俄罗斯达尔马托夫基底古河道型砂岩铀矿床

(据 C. H. 马尔可夫, A. B. 哈列佐夫)

Fig. 4 The paleo-channel type sandstone uranium deposits in Russia

1. 晚侏罗世达尔马托夫河谷体系的轮廓; 2. 矿体和矿点; 3. 灰色的砂-砾-泥岩; 4. 红色的洪积物和坡积物; 5. 层间(潜水-层间), 氧化岩石遭受古还原改造的带, 岩石表现为褐色变白; 6. 覆盖古河谷的红色湖相粉砂-泥岩; 7. 流纹岩 (T_1); 8. 玄武岩 (T_1);
9. 沿流纹岩发育的风化壳; 10. 沿玄武岩发育的风化壳; 11. 云片岩和黑色片岩; 12. 大理石化灰岩; 13. 推测的基底断裂

1.3 潜水氧化带型砂岩铀矿

潜水氧化带型砂岩铀矿亦称面状氧化矿床,铀矿化主要受现代或古潜水氧化-还原界面控制。其形成条件有:①干旱炎热的气候条件,年降水量40~200 mm。②低矮山脉与盆地交替出现。③山间的间歇河流发育,通常为干河床。④河床切入古生代基底。⑤河床被粗碎屑物充填。⑥河道中有 $CaCO_3$ 胶结物; ⑦地下水矿化度高。⑧在潜水位附近有高放射性。

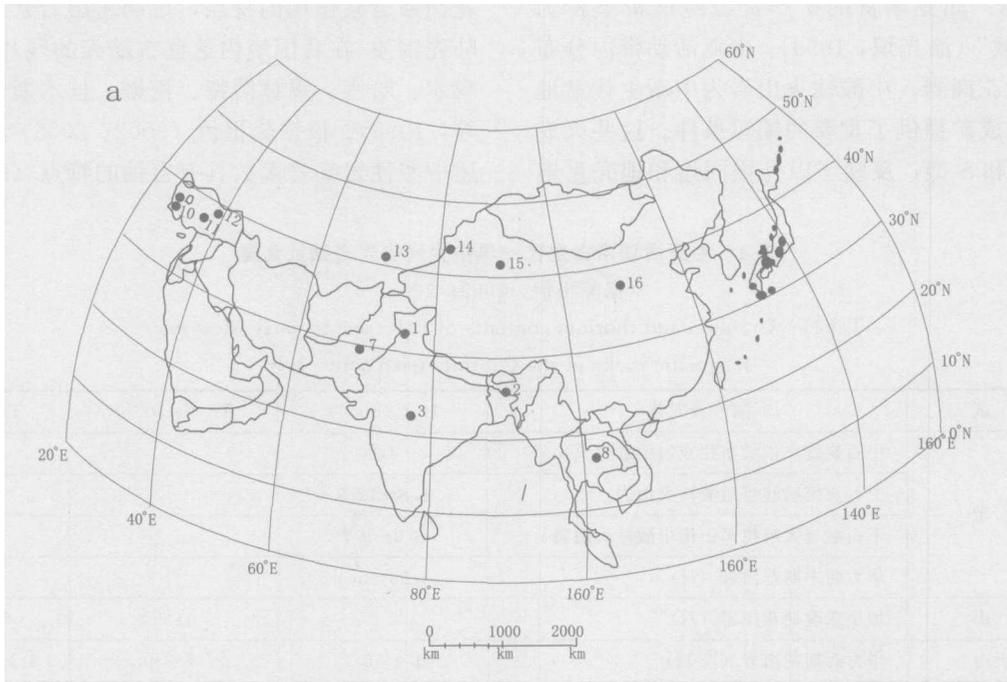
该类矿床形成时间较新,缺少镭,所以很难发现放射性异常。

2 西北地区砂岩型铀矿成矿与找矿

2.1 西北地区砂岩型铀矿有利的成矿地质背景

我国西北地区主要产砂岩型铀矿的盆地处于欧亚铀矿带的东南部,是其中的中亚活动带的一部分,分布于塔里木-华北地块北部及其以北地区(图5)。

欧亚铀成矿带总体上沿劳亚古陆南部边缘展布,以早古生代的内生成矿作用和中新生代的外生成矿作用为主。除了丰富的铀矿资源外,中亚活动带还产出类型众多的有色金属、贵金属、稀有、稀



1、2、3. 印度；4、5、6. 日本；7. 巴基斯坦；8. 泰国；9、10、11、12. 土耳其；13. 前苏联；14、15、16. 中国

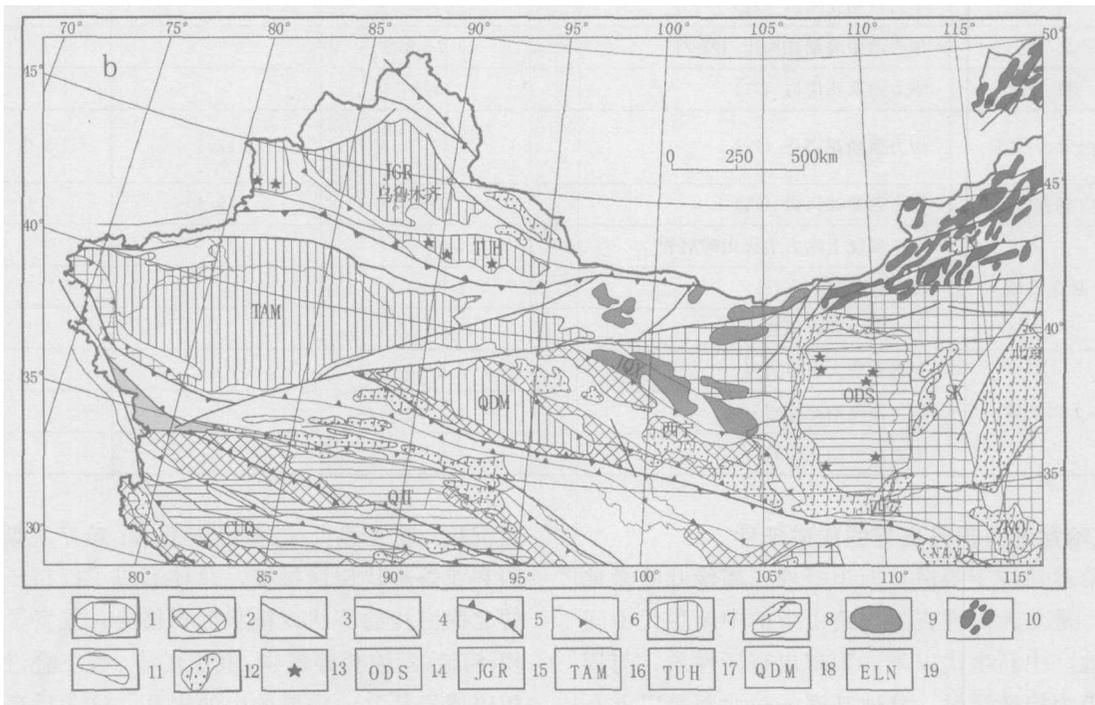


图 5 亚洲砂岩型铀矿分布图 (a) 及中国西北砂岩型铀矿和大地构造背景图 (b)

Fig. 5 The distribution of sandstone-type uranium deposits in Asia (a) and sandstone-type uranium deposits and geotectonic setting in northwestern China (b)

1. 陆块；2. 微地块、地体；3. 主要断层；4. 逆冲断裂带；5. 对接带；6. 叠接带；7. 西部大型叠合盆地；8. 叠合盆地（中生代为具前洲大地陷盆地）；9. 侏罗纪-白垩纪盆地（未分型）；10. 白垩纪断陷盆地群；11. 中生代盆地（近海、内陆）；12. 新生代伸展类盆地；13. 主要砂岩型铀矿；14. 鄂尔多斯盆地；15. 准噶尔盆地；16. 塔里木盆地；17. 吐哈盆地；18. 柴达木盆地；19. 二连盆地

土矿产资源。如此丰富的矿产资源使该带被称为“中亚成矿域”(涂光炽, 1999)。中亚活动带内分布广泛的富铀花岗岩、中酸性火山岩为中生代盆地砂岩型铀成矿提供了重要的铀源条件。这些火成岩多为I型和S型,反映了以壳幔同熔和地壳重熔

花岗岩浆作用的特点,说明重熔岩浆来自成熟的陆壳物质。在我国境内这些古陆壳的残片有伊犁、准噶尔、哈密、锡林浩特、松嫩、佳木斯等(李述靖等, 1998)。根据陈祖伊(2002; 2005)的资料,上述中酸性岩浆岩多数具有富铀的特点(表1)。

表1 中亚活动带古生代—早中生代岩浆岩铀钍含量

(据陈祖伊, 2002; 2005)

Tab.1 Uranium and thorium contents of Paleozoic to early Mesozoic magmatic rocks in the Central Asian active belt

地区	岩性及时代	U ($\times 10^{-6}$)	Th ($\times 10^{-6}$)	Th/U
伊犁	中石炭统奥依曼布拉克组中酸性火山岩	4.6		
	中石炭统脑吐盖组酸性火山岩	5.8~12.9		
	下石炭统大哈拉军山组中酸性火山岩	3.0~9.7		
	华力西中期花岗岩 (γ_3)	3.93~5.4		
天山	加里东晚期花岗岩 (γ_3)	2.9	11.9	5.3
西天山	华力西期花岗岩 (γ_1 - γ_3)	4.6~6.7	27.7~30.8	4.1~6.3
北天山	华力西期花岗岩 (γ_1 - γ_3)	1.9~3.9	14.7~17.8	4.1~7.7
南天山	华力西期花岗岩 (γ_4)	7.2		
北山	华力西中晚期花岗岩 (γ_3 - γ_4)	3.7~3.9		
狼山	华力西期花岗岩 (γ_4)	7.8		
内蒙古西部	华力西期花岗岩 (γ_4)	3.5~7.8	17.5	6.0
		2.9		
内蒙古中部	华力西期花岗岩 (γ_4)	3.9	25.4	6.5
额尔古纳	上侏罗统上库力组火山碎屑岩	4.4~8		
	燕山期花岗岩 (γ_3)	2.8~5.4		
	华力西中期花岗岩 (γ_3)	2.7~22.3		
大兴安岭	上侏罗统火山碎屑岩	5.6~8.1		
	华力西晚期花岗岩 (γ_3)	4.2~8.8		
	华力西中期花岗岩 (γ_3)	3.2~4.8		

2.2 吐哈盆地南部具有良好的成矿条件

吐哈盆地位于哈萨克斯坦板块东南缘吐哈微地块之上,是北天山晚古生代造山带的中新生代山间断陷盆地。中生代以来,表现出挤压性质,与周围造山带为构造接触。盆地基底——北部是以上石炭统为主的博格达裂陷沉降带火山岩、火山碎屑岩;南部东段为晚古生代火山岛弧,南部西段以觉罗塔格弧前冲断带(强变形的变质岩、火山岩、花岗岩)为基底。石炭系建造中的火山岩、火山碎屑岩具有较高的铀丰度值,是中新生代铀成矿的重要铀源提供者。盆地盖层——晚二叠世末期以来形成盖

层沉积,晚二叠世-三叠纪塔里木、哈萨克斯坦、西伯利亚等板块碰撞拼接,总体形成了以挤压为特征的北深南浅的箕状或楔状沉积格局,发育了一套冲积-河流-湖泊相碎屑岩,其中的中、晚三叠世的湖泊相碎屑岩是盆地重要的生油岩系。这为后来中生代北部构造单元为地下水渗出型,而南部为地下水渗入型盆地格局奠定了基础,直接影响到中生代砂岩型铀矿的形成分布(吴伯林等, 2004)。早、中侏罗世温湿气候下的贫氧、淡水介质环境沉积了河流-湖沼相含煤岩系(水西沟群),砂泥互层结构合理,在灰色砂岩中充满各种有机质和无机(黄铁矿

等)还原剂,是区内铀成矿的目标层位(焦养泉等,2004)。含矿沉积岩系成岩期有机质参与的中低温、超盐度成岩环境为氧化带铀矿的形成可能提供了有利的成矿环境。

就构造而言,盆地北缘地壳向造山带根部俯冲,使造山带强烈抬升造山,扇形撒开状向盆地方向逆冲推覆,盆缘山前地带形成构造挤压挠曲沉陷,断裂褶皱发育,地层倾角较陡,对铀成矿不利;在盆地南缘以相对稳定的翘倾抬升为主,伴随弱的逆冲断裂,总体形成向盆地缓倾的单斜构造(艾丁湖斜坡带),则有利于砂岩型铀矿成矿。这是因为,一方面间歇性抬升形成缓倾斜的斜坡带构造环境;另一方面新构造运动造成基底断裂适度复活形成“断裂挠曲”及一些宽缓新构造褶皱和沉积盖层中分布的新构造小型新断裂而构成局部排泄区。

夏毓亮等(2001)通过对吐哈盆地南侧觉罗塔格山华力西期斑状花岗岩、加里东期片麻状花岗岩和盆地南缘含矿砂体碎屑锆石测年对比研究,认为觉罗塔格山华力西期的花岗岩和火山碎屑岩为盆地南缘砂岩型铀矿含矿目的层提供了铀来源。

岩相古地理研究表明,吐哈盆地自白垩纪开始已转入干旱气候期,新生代以来基本处于干旱-半干旱的气候环境;现今其南部地区以中低山系-台地丘陵-冲洪积平原、沙漠戈壁-盐碱洼地地貌为主。这些都为层间氧化带型铀矿床的形成提供了有利的气候、地貌条件(周巧生等,2003)。

吐哈盆地是一个大型新生代自流水盆地,周缘的中低山区的大气降水、冰雪融水和基岩裂隙水构成盆地地下水的补给区,而排泄区位于南部的低洼沼泽、盐碱区和沙漠区,其间的冲洪积扇区为径流区。盆地南部的次级洼陷和构造斜坡(如了南洼陷、南湖洼陷、艾丁湖斜坡带等)含水层厚度大、承压水头高(周巧生等,2003),以水静压力为主,地下水向北流动,在艾丁湖及其周围的盐碱区透水性隐伏断裂等形成排泄,为层间氧化带型铀矿的形成提供了有利的地下水动力条件(周巧生等,2003)。

盆地南部有利的构造、物源条件、盆地西南缘地下水交换等提供了良好的层间氧化带砂岩型铀矿成矿条件。另外据柳益群等(2001)研究认为,吐哈盆地从三叠纪末开始及侏罗纪,油气由北(台北洼陷)向南运移,这就在盆地南部形成了一个良好的还原环境,对形成层间氧化带及其铀成矿提供了

有利条件。

2.3 伊犁盆地南部具有良好的成矿条件

伊犁盆地与吐哈盆地类似,同属天山造山带山间断陷盆地,其砂岩型铀矿特征与吐哈也比较相似。盆地位于伊犁-中天山微板块上,是一个在造山带中稳定地块上的裂陷-拗陷复合型盆地。盆地具有三层结构特点一下部为中新元古代变质岩基底;上部是石炭-二叠纪裂谷火山岩系变形基底,变形基底火山岩系具有较高的铀含量,为 $4 \times 10^{-6} \sim 14.3 \times 10^{-6}$ (李胜祥等,2001),是盆地内铀成矿的区域性铀源。最上层是二叠纪以来的陆相沉积岩系。主成盆期为中下侏罗统(水西沟群),总体为含砾砂岩、泥岩、粉砂岩互层,夹有煤线和煤层,具明显的下粗上细结构,是煤系及油气田的生、储油层,也是砂岩型铀矿的含矿层位。

上新世,盆地-山体接触地带有强烈的断陷逆冲活动,使中下侏罗统地层发生陡倾甚至倒转,对氧化带发育及铀矿化形成不利影响,此现象在盆地北部最为明显。而在南部影响较弱,南缘以相对稳定的掀斜抬升为主形成缓倾的构造斜坡带,为砂岩型铀矿的形成提供了有利的构造部位。

通过伊犁盆地南侧华力西期花岗岩、二叠系火山岩和511矿区沉积砂体中锆石测年(朱杰承,1986;夏毓亮等,2001)对比,结果表明,盆地南缘砂岩型铀矿含矿目的层沉积物源来自于蚀源区的花岗岩和火山岩。通过对花岗岩和火山凝灰岩古铀含量和现代铀含量测定,发现铀的富集系数大的负值(花岗岩 $\Delta U = -57\%$;火山凝灰岩 $\Delta U = -63\%$),说明铀被大量迁出,是盆地铀矿的重要铀源。

吐哈、伊犁这两个盆地石油、天然气、煤和砂岩铀矿四种能源矿产共存于同一个层位中;从时间上,铀的运移和富集主要是白垩纪到古近纪期间,有关资料表明油气的生成运移也多是在中生代末-古近纪初期,说明油气与铀矿的形成在时间上也有相对应的关系。

2.4 鄂尔多斯盆地周边具备良好找矿前景

鄂尔多斯盆地位于大青山、狼山以南,秦岭以北;贺兰山、六盘山以东,吕梁山以西。面积约25万 km^2 。中生代以近东西向挤压为主,形成由四周新生代断陷所围限的大型南北向展布的矩形台坳盆地。

鄂尔多斯盆地是在古生代地台基础上发展起来

的中生代盆地,其“基底”由下部的太古-元古界结晶变质岩、浅变质岩组成和上部的古生界海相碳酸盐岩及海陆交互相碳酸盐岩、含煤碎屑岩组成。其中,古生界是重要的石油天然气赋存层位。

盆地的中生界盖层由三叠系温湿气候下大型淡水湖泊相碎屑岩夹薄煤层、中下侏罗统温湿气候下河流-湖沼相含煤碎屑岩(富县组-安定组)、上侏罗统前陆盆地磨拉石沉积(芬芳河组)、下白垩统干旱-半干旱气候环境下河湖三角洲(部分沙漠相)-浅湖相碎屑岩沉积(保安群、六盘山群),古近-新近系和第四系多分布于盆地南部和西部。

盆地周缘造山带(秦岭、大青山-狼山等)前中生代及中生代花岗岩类及古老变质岩丰富,这些岩石具有偏高的铀的背景值,提供了蚀源区油源条件。盆地古生界的天然气,在后期构造作用下运移扩散,造成了广泛的还原环境。中生代内陆盆地演化阶段,其中早中侏罗世盆地沉积期具有的温暖潮湿的古气候,白垩-古近纪、第四纪以来的干旱气候为铀矿的富集提供了气候条件。侏罗系直罗组和白垩系保安群地层为砂-泥互层的河流-湖泊相沉积,岩石中有较丰富的有机还原剂,砂体的结构疏松,厚度适中(20~60 m)。这些为铀矿运移与富集提供了盆地结构、岩性岩相条件。

值得指出的是鄂尔多斯铀矿床不同于吐哈、伊犁盆地,它是一种封存的古铀矿床。近年来,夏毓亮^①的研究证实鄂尔多斯盆地东北部东胜铀矿床形成时间较早,是一个古老的铀矿床,但是它经历了后期的明显改造^①。成矿期(K-E)东胜地区直罗组骨架砂体与盆地周缘山系相接,形成了大规模的成矿流体-地下水系统。通过地下水载体,盆地周缘山地铀元素源源不断地被带入盆地并在东胜一带富集成矿。自白垩纪末以来,新构造运动使盆地周围新生代断陷盆地形成,裂隙作用导致广阔的铀源地(阴山山脉)与铀成矿富集区(东胜直罗组砂岩)隔断,成矿作用停止。但是,新构造运动使盆地东缘抬升,直罗组含矿目标层长期裸露地表接受地表氧化水的渗入,这是古老铀矿床遭受后期改造的主要原因。与此同时,盆地内部烃源岩以及延安组煤系地层的煤层气成熟、排烃、运移逸散,在盆地东北缘斜坡带形成一个极强的还原环境,这给古老铀矿床的保存

提供了有利条件。

截至目前,在东胜、乌海-鄂托克旗(毛盖图)、平凉-陇县、黄陵-彬县、宜君-韩城(磁窑堡)等几个片区发现并勘探了一批砂岩型铀矿,其中东胜矿床为大型-超大型矿床。

根据以上几方面可以看出,鄂尔多斯盆地具有良好的砂岩型铀矿成矿的地质背景和成矿条件(焦养泉等,2005; Jiao et al., 2005),盆地周边应该具有丰富的铀矿资源,根据成矿条件分析鄂尔多斯盆地东侧大型斜坡带铀矿类型将以还原型蚀变带控矿为主,而西侧主要是以氧化型蚀变带控制的铀矿类型为主。可以相信,随着研究的深入和勘探力度的加大,在鄂尔多斯盆地周边砂岩型铀矿找矿将会有大的突破。

3 结语

(1) 我国西北地处东亚中部,为典型的内陆干旱、半干旱气候区。自中生代以来,该地区气候表现出温湿与干旱交替、以干旱为主的古气候特征,形成了大大小小的内陆盆地和地质时代众多的盆地沉积。这些中生代盆地被众多造山带高大山系环绕,构成了西北地区地质-地理面貌特色。

(2) 在这些造山带中,地质历史时期花岗岩、火山岩丰富。以往的工作表明,这些中酸性火成岩和盆地的古老稳定基底是盆地砂岩型铀成矿的物质来源。

(3) 我国西北及内蒙古地区地处中亚铀成矿域的东端南部。伊犁、吐哈两个主要产铀盆地都位于我国境内中亚活动带的西段,这一地区尚有尤鲁多斯、焉耆、库米什、三塘湖、准噶尔和北山盆地群、巴丹吉林等地质条件与其类似的众多盆地,但其中的铀矿找矿工作程度相对较低;而在我国境内中亚活动带东段的二连、鄂尔多斯、海拉尔、松辽等盆地中,已经发现很好的砂岩型铀矿床、矿化或线索。因此,加强中央亚洲活动带我国境内的中生代盆地尤其是西部盆地群的铀矿勘查工作应该会取得成效。

(4) 西北的中新生代内陆盆地类型多样,但多

^① 夏毓亮. 会议交流信息, 2002.

以不同类型复合的叠合盆地居多。具有类似于中亚地区的盆地众多，如吐哈南部、伊犁盆地南部和鄂尔多斯盆地周边那样的具有古老稳定陆块和富铀火成岩盆地基底、盖层砂-泥结构合理、弱的新构造运动所形成的构造斜坡带、地下水循环的积极交替带、具有足够的油气等有机烃类和黄铁矿等无机还原剂介质供给条件的中-新生代盆地地质环境，是寻找砂岩型铀矿的有利场所。从现已发现的铀成矿层位看，铀矿主要与中侏罗世含煤岩系相关，所以应重点关注该层位。

(5) 鄂尔多斯盆地东胜铀矿的发现从另一个角度展示了铀成矿的复杂性和多样性，它告诫人们在进行铀矿勘探和预测时，除了要密切关注现今的成矿条件分析和评价之外，还要关注古老铀矿床的成矿评价，即按照沉积盆地的演化阶段评估成矿条件，这样以来“东胜式”铀矿有可能在西部被更多地发现。

(6) 西北古老地台区的叠合盆地发育，结晶基底与上覆盖层之间不整合面也是铀矿床的有利赋存部位。随着深部找矿技术的发展，不整合面型和古河道型铀矿床及浅水氧化带型铀矿等也应成为不可忽视的重要找矿方向。

参考文献 (References):

- 赵鹏大, 等. 非传统矿产资源概论 [M]. 北京: 地质出版社. 2003.
- 吴伯林, 徐高中, 李卫红, 等. 吐哈盆地地浸砂岩型铀矿成矿条件与盆地动力学演化 [J]. 中国地质, 2004, 31 (1), 102-107.
- 焦养泉, 陈安平, 杨琴, 等. 砂体非均质性是铀成矿的关键因素之一——鄂尔多斯盆地东北部铀成矿规律探讨 [J]. 铀矿地质, 2005, 21 (1): 8-16.
- 焦养泉, 吕新彪, 王正海, 等. 从沉积到成岩两种截然不同的地质环境——吐哈盆地砂岩型铀矿研究实例 [J]. 地球科学, 2004, 29 (5): 615-620.
- 焦养泉, 吕新彪, 杨生科, 等. 吐哈盆地西南缘铀成矿的层位标定 [J]. 现代地质, 2004, 18 (3).
- 李胜祥, 陈戴生, 蔡煜琦. 砂岩型铀矿床分类探讨 [J]. 铀矿地质, 2001, 17 (5).
- 郭华, 李明, 夏斌, 等. 查干诺尔盆地构造演化及铀成矿条件分析 [M]. 北京: 地质出版社. 2004.
- 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).
- 李思田, 解习农, 王华, 等. 沉积盆地分析基础与应用 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 374-389.
- 李述靖, 张维杰, 耿明山, 等. 蒙古弧地质构造特征及形成演化概念 (M). 北京: 地质出版社. 1998.
- 陈祖伊. 俄罗斯在铀矿地质勘察工作中的新动向 [J]. 铀矿地质, 2005, 21 (1).
- 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).
- 吴伯林. 中国西北地区砂岩型铀矿地质与成矿作用 [D]. 西北大学博士论文, 2005.
- 夏毓亮, 林锦荣, 侯艳先, 等. 伊犁盆地砂岩型铀矿同位素地质特征 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2001, 20 (4).
- 周巧生, 李占游. 吐哈盆地西南缘地浸砂岩型铀矿地质特征及找矿前景 [J]. 中国地质, 2003, 30 (2), 186-191.
- 柳益群, 刘斌, 等. 吐哈盆地三叠系-侏罗系流体包裹体研究 [J]. 石油勘探与开发, 2001, 28 (1).
- 朱杰承. 中天山变质岩系年代学研究 [J]. 新疆地质, 1986, 4 (4).
- Bureau of Geology, CNNC. Sandstone-type uranium deposits in China: geology and exploration techniques [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2002: 217.
- CHEN Zuyi. Some new tendencies in uranium exploration of Russia [J]. Uranium Geology, 2005, 21 (1).
- CHEN Zuyi. Regional distribution regularity of sandstone uranium deposits in Asian continent and prospecting strategy for sandstone uranium deposits in China [J]. Uranium Geology, 2002, 18 (3).
- Franz J. Dahlkamp. Uranium ore deposits [M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1993.
- IAEA. Geological environments of sandstone type uranium deposits (Report of the Working Group on Uranium Geology) [R]. IAEA-TECDOC-328, 1985.
- JIAO Yangquan, CHEN Anping, YANG Qin, et al. Sandbody heterogeneity: one of the key factors of uranium metallogenesis in Ordos Basin [J]. Uranium Geology, 2005, 21 (1): 8-16.
- JIAO Yangquan, LÜ Xinbiao, WANG Zhenghai, et al. 2004. Two distinct geological environments from sedimentary to diagenesis stages: examples from sandstone-type uranium deposits, Turpan-Hami Basin [J]. Earth Science, 29 (5): 615-620.
- JIAO Yangquan, LÜ Xinbiao, YANG Shengke, et al. The identification of uranium metallogenic strata at the southwest margin of the Turpan-Hami Basin [J].

- Geoscience, 2004, 18 (3) .
- JIAO Yangquan, WU Liqun , WANG Minfang, et al. Forecasting the occurrence of sandstone-type uranium deposits by spatial analysis; an example from the northeastern Ordos Basin, China. In: Mao and Bierlein (Eds.). Mineral Deposit Research; Meeting the Global Challenge[J]. Berlin: Springer-Verlag, 2005; 273-275.
- LIU Yiqun, et al. A study on fluid inclusion of Permian-Jurassic in Turpan-Hami Basin [J] . Petroleum Exploration and Development, 2001, 28 (1) .
- LI Shengxiang, CHEN Daisheng, CAI Yuqi. Discussion on classification of sandstone-type uranium deposits [J] . Uranium Geology, 2001, 17 (5) .
- LI Sitian, XIE Xinong, WANG Hua, et al. Sedimentary basin analysis; principle and application [M] . Beijing: Senior Education Press, 2004.
- WU Bolin, XU Gaozhong, LI Weihong, et al. Metallogenic conditions of in-situ leachable sandstone-type uranium deposits and dynamic evolution of the Turpan-Hami Basin [J] . 2004, 31 (1): 102-107.
- WANG Zhengbang. Current status and prospects of uranium geology developments of foreign in-situ leachable sandstone type uranium deposits [J] . Uranium Geology, 2002, 18 (1) .
- XIA Yuliang, LIN Jinrong, HOU Yanxian, et al. The characteristics of isotope geology of sandstone-type uranium mineralization from Yili Basin, Xinjiang [J] . Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry, 2001, 20 (4) .
- ZHOU Qiaosheng, LI Zhanyou. Geological characteristics and ore prospects of underground leaching sandstone-type uranium deposits on the southwestern margin of the Turpan-Hami Basin[J]. Chinese Geology, 2003, 30 (2): 186-191.
- ZHU Jiechen, SUN Wenpeng. Approach of deagenetic age and evolution of metamorphic rocks of middle Tianshan [J] . Xinjiang Geology, 1986, 4 (4) .

Analysis of Uranium Metallogenic Conditions and Prospecting of Sandstone-Type Uranium Deposits in Northwest China

WANG Yong-he¹, JIAO Yang-quan², WU Li-qun²

(1. *Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources, Xi'an 710054, China;*

2. *China University of Geosciences Wuhan, 430074, China)*

Abstract: As the development of in-situ leaching technique, sandstone-type uranium deposits have become the key prospecting target for uranium resources in China. In-situ leaching applicable sandstone-type uranium deposits are mainly dominated by interlayered oxidation zone. They are also intimately correlated with erosion source area of high uranium setting, weak neo-structural activities, different paleoclimates in sedimentary and mineralization period, favorable lithofacies and lithology, reducers rich in organic or inorganic matter, favorable dynamic condition of underground water runoff. Based on the macroscopical analysis for the enriched areas of typical sandstone-type uranium deposits and relevant mineralization geological conditions in northwest China, this paper points out that there has been the favorable metallogenic geological conditions and in turn prospecting potential in the Turpan-Hami basin, the southern Yili basin and the surroundings of the Ordos basin. Finally, it presents a forecast for the future prospecting on uranium in northwest China where has the similar geological background like the above basins.

Key words: sandstone-type uranium deposits; metallogenic conditions; prospecting potential; northwestern China