

·矿产资源·

中国北方中生代盆地深部砂岩铀矿成矿条件与找矿方向

苗培森^{1,2}, 李建国^{1,2}, 汤超¹, 金若时^{1,2}, 程银行^{1,2}, 赵龙^{1,3}, 肖鹏¹, 魏佳林¹
MIAO Peisen^{1,2}, LI Jianguo^{1,2}, TANG Chao¹, JIN Ruoshi^{1,2}, CHENG Yinhang^{1,2}, ZHAO Long^{1,3},
XIAO Peng¹, WEI Jialin¹

1. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170;
2. 中国地质调查局天津地质调查中心非化石能源矿产实验室, 天津 300170;
3. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

1. *Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin 300170, China;*
2. *Laboratory of Non-fossil Energy Minerals, Tianjin Center of China Geological Survey, Tianjin 300170, China;*
3. *Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*

摘要:受开采技术、成本和成矿理论制约, 现有的砂岩型铀矿勘查主要选择在盆地边缘700m以浅的地区, 对盆地深部的铀矿找矿潜力研究较少。总结中国北方重要中生代盆地的含铀岩系、构造特征, 结合近年开展的北方砂岩型铀矿深部找矿, 分析了盆地深部成矿有利的沉积建造、构造与流体改造、还原条件等, 指明了盆地的深部找矿潜力。同时指出, 作为战略储备, 当前盆地深部寻找砂岩型铀矿要优先重视2个方向: ①在盆地边缘斜坡区, 重点以发育红-黑岩系结构的含铀地层为目标, 寻找与浅部成矿条件相似的深部矿床; ②在盆地中心区, 以含铀的红色岩系为重点, 优先寻找延伸至盆地深部的正向构造区和砂体发育区。这些认识在松辽盆地的铀矿调查中得到验证。

关键词:砂岩型铀矿; 深部找矿; 成矿条件; 找矿方向; 中生代; 陆相盆地

中图分类号: P534.5; P534.6; P619.14 文献标志码: A 文章编号: 1671-2552(2017)10-1830-11

Miao P S, Li J G, Tang C, Jin R S, Cheng Y H, Zhao L, Xiao P, Wei J L. Metallogenic condition and prospecting orientation for deep sandstone-hosted uranium deposits in Mesozoic-Cenozoic basins of North China. *Geological Bulletin of China*, 2017, 36(10):1830-1840

Abstract: The exploration of sandstone-hosted uranium deposits has only been focused on the basin margins with the depth less than 700m because of restrictions of mining technology, cost and metallogenic theory. The prospecting potentiality of deep uranium deposits in basins has always been ignored. In this study, favorable sedimentary structure, tectonic movement, geological fluid and reduction condition of deep sandstone-hosted uranium deposits were discussed based on the summary of tectonic settings and uranium-bearing strata of known shallow sandstone-hosted uranium deposits in Mesozoic-Cenozoic basins in North China and new findings from the exploration of deep sandstone-hosted uranium deposits in recent years. Meanwhile, prospecting potentiality of deep sandstone-hosted uranium deposits was assessed and two directions were preferentially pointed out: (1) at the margin slope of the basin, the "red and black" strata series should be preferentially targeted in search for the potential deep deposits whose formation conditions are similar to the conditions of the shallow deposits; (2) at the center of the basin, emphasis should be put on the red layer with

收稿日期: 2016-12-09; 修订日期: 2017-07-01

资助项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)《中国北方巨型砂岩成矿带陆相盆地沉积环境与大规模成矿作用》(编号: 2015CB453000)和中国地质调查局项目《油气田勘查区砂岩型铀矿调查与勘查示范》(编号: DD20160128)

作者简介: 苗培森(1958-), 男, 博士, 教授级高级工程师, 从事铀矿调查与研究。E-mail: tjmpeisen@sina.com

通讯作者: 李建国(1980-), 男, 博士, 高级工程师, 从事铀矿调查与研究。E-mail: jianguo_lee@126.com

positive structure and sand body developed areas in the deep buried basin. These suggestions have been proved to be effective in the uranium investigation in Songliao basin.

Key words: sandstone-hosted uranium deposit; deep prospecting; metallogenic condition; prospecting direction; Mesozoic-Cenozoic basin; terrestrial basin

过去的 20 多年,中国的砂岩型铀矿勘查与成矿理论研究取得了显著的成果,核地质队伍先后在伊犁盆地、鄂尔多斯盆地、二连盆地取得了一系列重要的找矿发现^[1]。受开采的经济、技术条件制约和层间氧化带型砂岩型铀矿理论主导,前期的工作主要部署在盆地的边部斜坡带上,勘查的深度早期多控制在 500m 以浅,近年提高到 600~700m,但总体还是比较浅。相关的理论研究成果主要集中在盆地边缘的斜坡带^[2-7],更多关注了表生渗入流体作用(包括层间水作用和潜水作用),对深部(>700m)的铀资源条件和找矿方向研究比较少。随着浅部资源勘查程度和开采技术条件的提高,开展深地资源勘查、开辟第二找矿空间、建立资源储备成为研究的热点问题,并成为国家的重要科技战略布局。

近年来,中国地质调查局先后组织开展了中国北方中生代盆地煤田区、油气田区的砂岩型铀矿调查,通过对煤田、油气田勘查资料的筛查和二次开发,在盆地的边部和深部砂岩中均发现了大量的放射性异常,一些异常的深度已超 3000m,为盆地深部铀矿勘查和理论研究提供了很好的找矿线索和资料基础。本文总结浅部砂岩型铀矿的含铀岩系特征和构造背景,结合盆地演化与深部流体作用,探讨当前盆地深部寻找砂岩型铀矿的主要思路和方向。

1 中国北方主要盆地含铀岩系总体特征

从现有的浅部勘查成果看,中国大型的北方砂岩型铀矿集中分布在北纬 35°~45°的中纬度带(图 1)。各盆地尽管在多个层位均发现有矿化线索,但真正成为有规模工业矿体的层位均相对固定(表 1),具有明显的层控特点,多为 1~2 个层位。整体呈现以下特征。

(1) 含铀岩系时代特征

从西到东,含铀岩系具有明显的层位上移,年代逐步变新。西部伊犁、吐哈盆地含铀岩系主要为下、中侏罗统,鄂尔多斯盆地主要为中侏罗统,二连盆地为下白垩统,松辽盆地南部为上白垩统中部的

姚家组,北部为上白垩统上部的四方台组,时代越来越新。这种变化可能主要与古气候分带有关^[29]。

(2) 沉积建造组合特征

绝大多数铀矿产在红-黑岩系接触带的灰色砂体层内。其中,“红色岩系”指一套黄色-褐色-红色陆相碎屑岩层组合,黑色岩系指绿色-灰色-黑色陆相碎屑岩层及含煤、含油系岩系组合,“红-黑岩系”指沉积时代相近的,红层沉积于黑色层之上的陆相碎屑岩层组合^[30]。从红层发育期次和“红-黑岩系”横向对比图可以看出(图 2),西部准噶尔盆地主要含铀岩系为头屯河组下段,其下部为中侏罗统西山窑组含煤黑色沉积建造,上部为上侏罗统齐古组红层。中部鄂尔多斯盆地主要含铀岩系为中侏罗统直罗组下段,其下部为中侏罗统延安组含煤黑色沉积建造,共发育煤层 5~6 层,上部为直罗组上段红层。东部松辽盆地北部主要含铀岩系为四方台组下段,其下部为上白垩统嫩江组黑色沉积建造,是区域的主要生烃层,上部为四方台组的顶部红层。在空间上,砂岩型铀矿产于红层与黑色岩层之间的砂体内,三者密切共生,呈双色夹心结构。铀矿既受泥-砂-泥的岩层控制,也受红黑建造组合控制。共轭产出的黑色岩系和红色岩系是古沉积环境由还原向氧化转变形成的垂向分带,前者为铀矿物质沉淀提供了“障”,后者为表生流体溶解铀矿提供了“场”^[30]。

(3) 沉积相特征

矿体多发育于辫状河流、曲流河三角洲、扇三角洲等沉积体系。这主要是由于砂岩型铀矿的赋矿砂体必须具备良好的渗透性、连通性和成层性决定的。前陆盆地、近缘内克拉通盆地和板块间活动带内的断陷、裂陷盆地都是有利的盆地类型^[4]。无论是鄂尔多斯盆地、吐哈盆地,还是乌兹别克斯坦的产铀盆地,均具有一个普遍性的地质现象,即砂岩型铀成矿受控于铀储层的非均质性。从沉积体系尺度级别上讲,最佳的成矿区往往位于河道砂体的频繁分岔处或相变处;从河道尺度级别上讲,铀成矿往往偏向于从无隔挡层到隔挡层突发区的河道储层砂体^[33]。

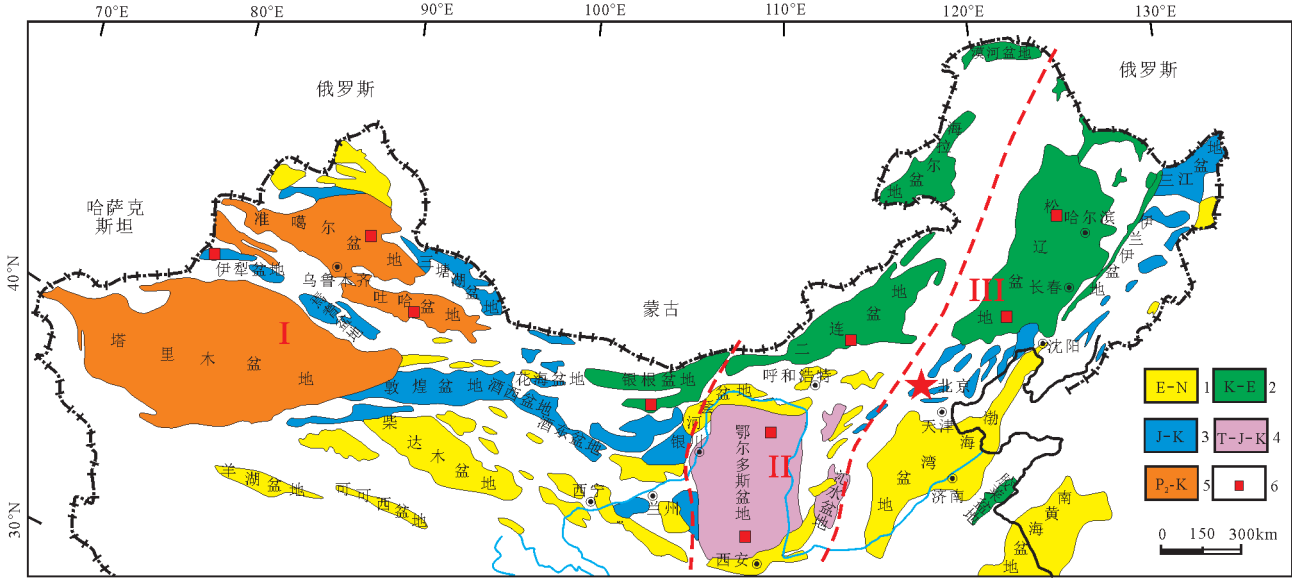


图1 中国北方产铀盆地构造分区及典型砂岩型铀矿分布

Fig. 1 Tectonic divisions and distribution of sandstone-hosted uranium deposit basins in North China

I—西构造域；II—中构造域；III—东构造域；1—古近纪-新近纪盆地；
 2—白垩纪-古近纪盆地；3—侏罗纪-白垩纪盆地；4—三叠纪-白垩纪盆地；5—晚二叠世-白垩纪盆地；6—铀矿床

(4) 沉积期古气候响应

铀矿多产在气候转换阶段。伊犁盆地与吐哈盆地三工河组、西山窑组沉积期主要为潮湿气候^[8]；准噶尔盆地头屯河组沉积期主要位于潮湿的西山窑组向干旱的齐古组转换阶段^[7,30]；鄂尔多斯盆地直罗组下段沉积期为半潮湿向半干旱气候转换阶段^[8]；松辽盆地姚家组下段、四方台组下段沉积期古气候分别为半湿润和半干旱^[19,34-35]。铀矿多产出于(半)潮湿向(半)干旱的转换阶段,与红-黑岩系相对应。

(5) 地层含铀性特征

普遍存在原始的预富集。前人工作显示,吐哈盆地十红滩矿床原生灰色还原砂体的铀背景值含量大部分都高于 5.0×10^{-6} ^[10],钱家店铀矿田^①、鄂尔多斯北部东胜铀矿田^[8]、伊犁盆地铀矿田^[36]铀储层中灰色砂岩的微量铀多在 $5.75 \times 10^{-6} \sim 7.74 \times 10^{-6}$ 之间,与地壳长石砂岩中铀含量的平均值 1.5×10^{-6} 相比,要高出2~3倍。焦养泉等^[8]在研究大营铀矿时,直接在铀储层中发现了具有搬运磨圆特征的含铀碎屑颗粒。夏毓亮等^[9]通过对蚀源区岩石和盆地含矿地层不同部位砂体岩石样品的U-Pb同

位素体系演化特征研究,同样提出可地浸砂岩型铀矿的铀源主要来自蚀源区活性铀含量高的中酸性火成岩类和发生铀预富集的沉积砂体,并认为沉积环境所决定的沉积砂体铀的预富集是铀成矿的重要因素^[3]。铀储层中预富集的铀使含铀岩系充当了“二次母源层”,对后期成矿起到了十分重要的作用,王志龙^[37]曾粗略估算,在一层厚50m的红层中(平均相对密度按2.5计算),如能释放出的微量铀为 2.5×10^{-6} ,则其在长4000m、宽2000m的范围内,可向相邻的还原层提供2500t金属铀。这说明,在流体运移距离足够长的情况下,即便没有后期盆缘的蚀源区供给,也可以形成较大的砂岩型铀矿床^[17]。这也从侧面很好地解释了为什么在同样的盆缘铀源供给、有利的构造宽缓斜坡带和砂体条件下,大规模成矿作用仅发生在某些特定的层位。

(6) 离蚀源区/盆缘距离特征

产在原生潮湿气候下的黑色岩系铀矿床距离蚀源区或盆缘较近,而产在干旱气候下的红色岩系的铀矿床离蚀源区或盆缘可以很远。如产在伊犁盆地西山窑组中的捷尔尔泰矿床距现今盆缘7km

表 1 中国北方典型砂岩型铀矿构造背景、含铀岩系特征
(据参考文献[6-28]和项目调查成果)

Table 1 Tectonic setting and uranium-bearing strata of typical sandstone-hosted uranium deposits in North China

盆地名称	伊犁盆地	吐哈盆地	准噶尔盆地	柴达木盆地	鄂尔多斯盆地	二连盆地	松辽盆地
大地构造背景	西构造域	西构造域	西构造域	西构造域	中构造域	中构造域	东构造域
典型矿床(产地)	洪海沟、库捷尔泰、蒙古其古尔	十红滩	卡姆斯特	冷湖	大营、纳岭沟、皂火壕	恩格日音、巴彦乌拉	钱家店、大兴
成矿位置	盆地南部斜坡带	盆地西南缘艾丁湖斜坡带	盆地东部斜坡带	盆地北缘西部	盆地东北部伊陕单斜区	马尼特坳陷古河道	钱家店:南部白兴吐隆起周缘大兴;北部长垣隆起南端
矿床类型	层间氧化带型	层间+潜水氧化带型	潜水氧化带型?	潜水氧化带型?	层间、潜水氧化带型?	潜水氧化带型	潜水、层间氧化带型?
主要工业矿层	下侏罗统三工河组和中侏罗统西山窑组下段	中侏罗统西山窑组下段	中侏罗统晚期头屯河组下段	中侏罗统大煤沟组五段	中侏罗统直罗组下段、延安组上部(局部)	下白垩统赛汉组三段	钱家店:上白垩统姚家组下段;大兴:上白垩统四方台组下段
含铀岩系背景值	9.6×10^{-6}	$>5.0 \times 10^{-6}$		3.56×10^{-6}	$(2.4-8.6) \times 10^{-6}$	30.70×10^{-6}	$(2.36-5.5) \times 10^{-6}$
沉积相特征	扇三角洲沉积	辫状河沉积	辫状河沉积	辫状河、曲流河三角洲	辫状河沉积	辫状河(河道)沉积	辫状河、曲流河三角洲
沉积期古气候	温暖潮湿	潮湿	潮湿向干旱的变化	温暖潮湿	温暖潮湿	温暖潮湿向半干旱半潮湿转化	姚家组下段:红层,半湿润四方台组下段:红层,半干旱
距蚀源区/盆缘距离	库捷尔泰矿床距现今盆缘约 7km	十红滩矿床距现今盆缘 3-8km	距现今盆缘约 15km	距现今盆缘约 30km	东胜铀矿距北部现今盆源约 50km	巴彦乌拉铀矿床距北部蚀源区约 18km	钱家店铀矿距西南部蚀源区约 250km
与煤层、油气关系	西山窑组是区域主要含煤岩系,矿床位于煤层之上	西山窑组是区域主要含煤岩系,矿床位于煤层之上	目的层下部为含煤岩系西山窑组	大煤沟组是区域主要含煤岩系,矿床位于煤层之上。上部为古近系乐河组	紧邻下部为含煤岩系延安组;油气层为延安组下部的富县组、延长组	赛汉组二段发育有稳定的褐煤层,赛汉组下部腾格尔组为产油页岩层	煤层不发育,矿层下部或紧邻区有油气田

左右,吐哈盆地十红滩矿床距现今盆缘 3~8km^[38]。而产在松辽盆地姚家组中的钱家店铀矿床,距西南部蚀源区超过 200km。似乎存在一种规律,即西构造域产铀盆地矿床离蚀源区或盆缘总是较东构造域近得多。除西构造域受到更强的新生代构造影响改变原型盆地因素外,焦养泉等^[9]认为,这主要与同沉积期、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差别对层间氧化带发育的规模具有重要控制作用有关,由潮湿向干旱演变,层间氧化带规模可由千米级别到百千米级别乃至数百千米级别。这意味着在盆地中心深部找矿,红色岩系可能优于灰色岩系。

(7)与煤、油的空间关系特征

西构造域盆地铀矿在空间上浅部主要与煤有密切关系;中构造域鄂尔多斯、二连盆地主要与煤、油气有关,东部松辽盆地主要与油气有关^[30]。

2 盆地构造背景及其演化对深部成矿的制约

盆地的构造背景及其演化对于大规模的成矿作用具有重要控制作用^[4,28],无论是浅部矿床还是深部矿床,其“源-运-储-变-保”的过程始终受到盆地作用的制约。同沉积阶段,构造通过“构造控盆、盆控相、相控砂体”体系对砂岩型铀矿成矿有利的盆地和相带进行控制;沉积后-成矿阶段,构造直接影响着成矿流体的补-径-排体系,制约着铀矿的产出;成矿期后的构造运动直接影响了矿体变化和保存。中国北方砂岩型铀矿容矿层位、矿化类型(成矿作用)和矿化年龄上的差异都源自每个构造域各自中新生代的构造演化及其特征^[29]。

2.1 构造格局与战略选区

中国北方主要产铀盆地位于欧亚成矿带的东段,总体隶属于古欧亚大陆构造体系。在该构造体

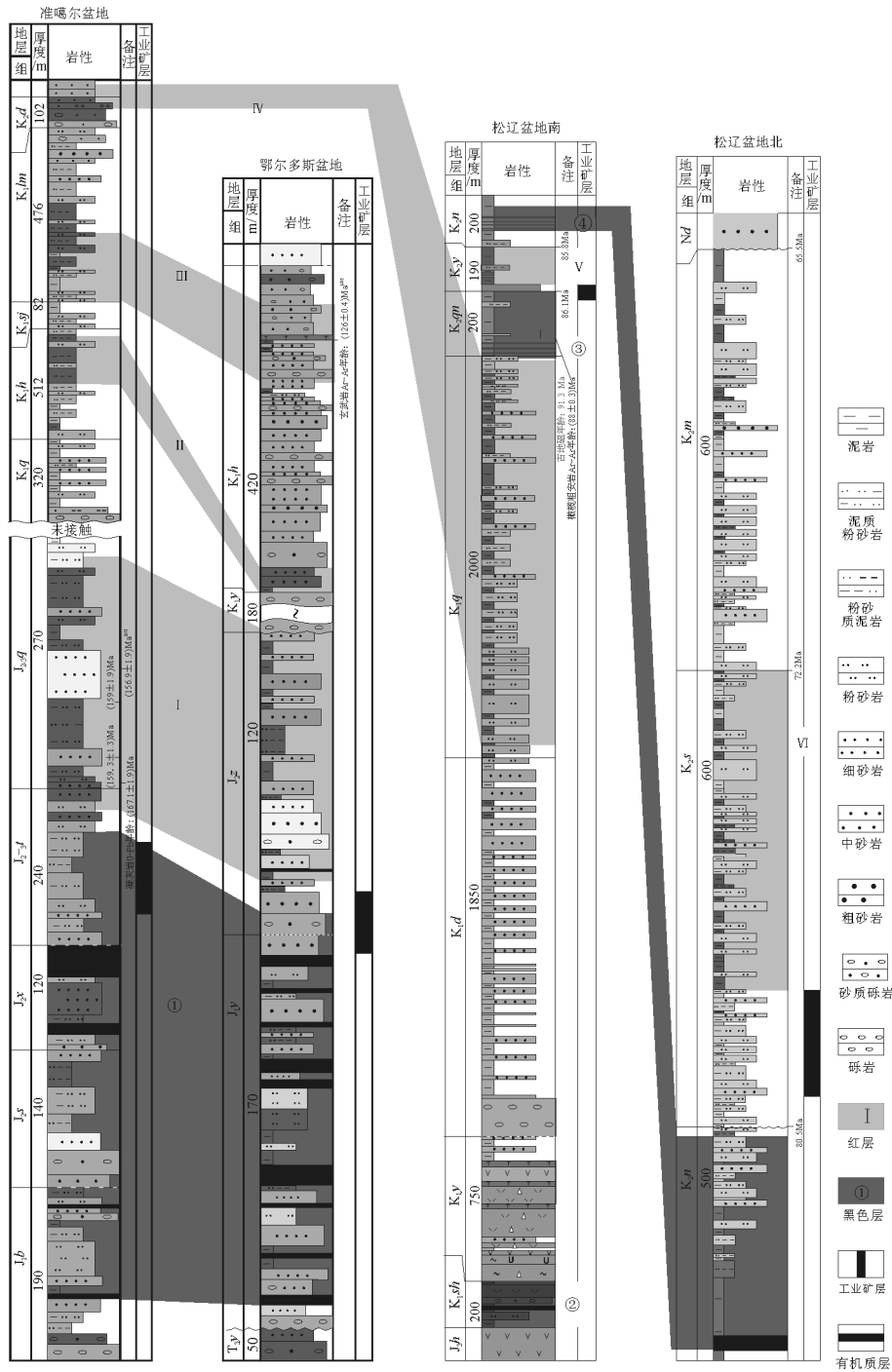


图2 北方侏罗纪—白垩纪典型陆相产铀盆地红层发育期次和砂岩型铀矿“红—黑岩系”横向对比
 (准噶尔盆地数据据参考文献[23], 鄂尔多斯盆地据[24]和本次工程钻孔ZKC2016-1, 松辽盆地据[25]和本次ZKD1-01、野外实测PM14)

Fig. 2 Red layers and “red and black” strata correlation of typical Jurassic–Cretaceous terrestrial uranium-bearing basins in North China

下侏罗统: J_1b —八道湾组; J_1s —三工河组; J_1y —延安组; 中侏罗统: J_2x —西山窑组; J_2t —三工河组; J_2z —直罗组; 中上侏罗统: J_2-3q —齐古组; 上侏罗统: J_3h —火石岭组; 下白垩统: K_1q —清水河组; K_1h —呼图壁河组; K_1sj —胜金口组; K_1l —连木沁组; K_1y —宜君组; K_1h —环河组; K_1sh —沙河子组; K_1y —营城组; K_1d —登楼库组; 上白垩统: K_2d —东沟组; K_2q —泉头组; K_2qn —青山口组; K_2y —姚家组; K_2n —嫩江组; K_2s —四方台组; K_3m —明水组; 新近系: Nd —大安组

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^[8]。一些学者根据重力场和成矿地质背景特征将该构造体系做了进一步划分,总体分为东构造域、中构造域和西构造域^[29,38]。其中,西构造域主要为贺兰山—龙门山(重力梯度带)以西地区,包括伊犁、吐哈、准噶尔、柴达木等盆地。该构造域主要受印度板块向北推挤的影响,属古老(古生代)褶皱带的复活造山和复活山系与沉积盆地的耦合,形成“后地台、小幅度的造山运动”(即次造山运动)的构造背景^[29]。东构造域指大兴安岭—太行山(重力梯度带)以东地区,主要包括松辽盆地,由于太平洋板块向西俯冲,地幔上拱,张性构造发育,基性岩浆活动频繁,形成一系列北北东向或北东向扩张隆起带和沉降带。之后侧向挤压形成大幅度的拗陷和构造反转。中构造域位于大兴安岭—太行山与贺兰山、龙门山之间,主要包括鄂尔多斯盆地、二连盆地等。该构造域同时受到印度板块和太平洋板块的影响。

判断一个盆地是否能成为产铀盆地,主要取决于该盆地所在地区的大地构造背景及构造演化特征,并通过影响区域构造、沉积演化、水动力、铀源等成矿地质条件来控制砂岩型铀矿床的形成^[4]。中国北方由于中亚造山带、中央造山带广泛发育富铀的古生代—中生代的A型花岗岩,多数盆地具有良

好的铀源基础。制约铀成矿更重要的条件是有利的构造斜坡、沉积相带及与其密切相关的补—径—排体系。构造格局对划定深部成矿有利区带与目标类型十分重要,不同构造背景的产铀盆地,深部找矿类型及其优先开展工作的地区是有差异的。有观点^[29]认为,西构造域的次造山运动背景与哈萨克斯坦·萨雷苏铀矿省相似,由于易形成宽缓斜坡,辫状河和扇三角洲发育、有稳定的补—径—排体系,因此十分有利于盆缘层间氧化型砂岩型铀矿的形成。目前在伊犁盆地南部、吐哈盆地南部和准噶尔盆地东部发现的铀矿床多属于这个类型。东构造域由于长期连续的深拗陷使盖层沉积不断被深埋,其中潜在的容矿主岩往往难以得到像西构造域那样有利的掀斜改造和层间水的渗入,盆缘形成层间氧化型铀矿的条件较差^[29]。但从近几年中国北方的砂岩型铀矿调查和现存各主要盆地的深部地震剖面看(图3、图4、图5),各主要盆地的斜坡带普遍发育,在松辽盆地北部的西部超覆区(西斜坡)和长春岭背斜以东均存在宽缓的单斜构造,这些构造形态主体于四方台组沉积前形成雏形,定型于古近系沉积前^[42-43]。构造背景差异直接决定了斜坡带及盆地正向构造的发育及其演化。以准噶尔盆地为例,盆地南部由于受到新生代强烈的逆冲推覆^[44],形成一系列高角度的整体单斜和局部的褶皱构造,与稳定

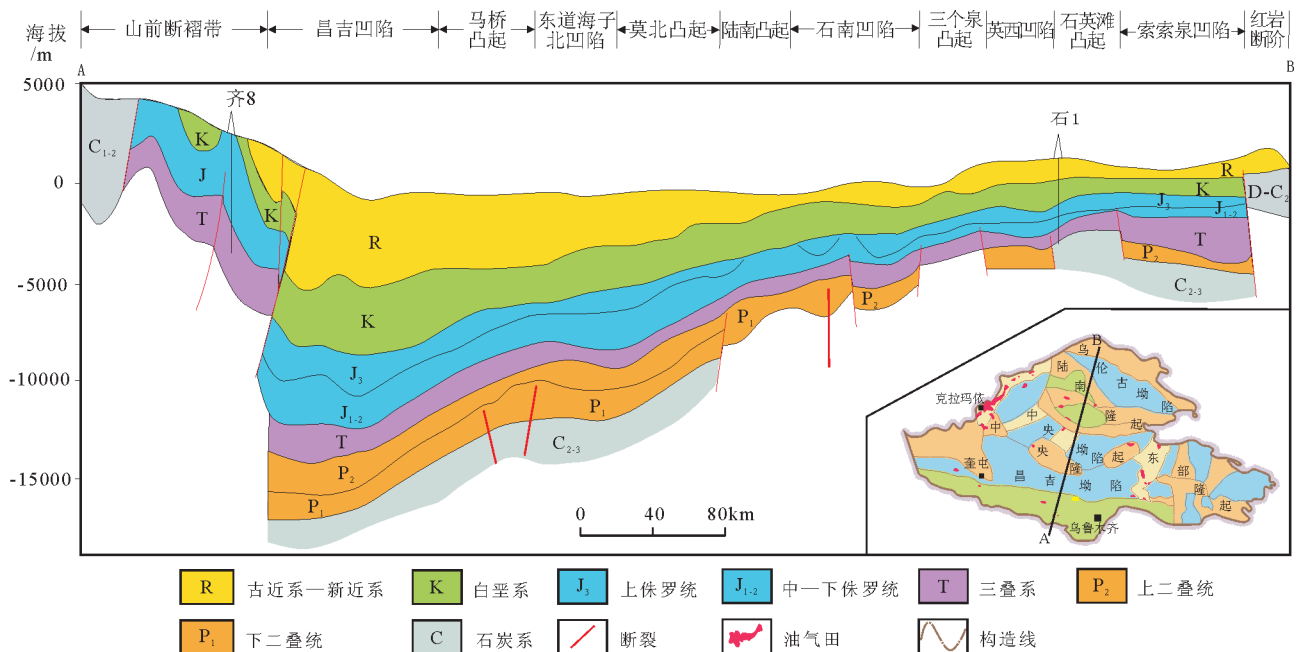


图3 准噶尔盆地近南北向剖面^[39]
Fig. 3 Nearly NS-trending section of the Junggar basin

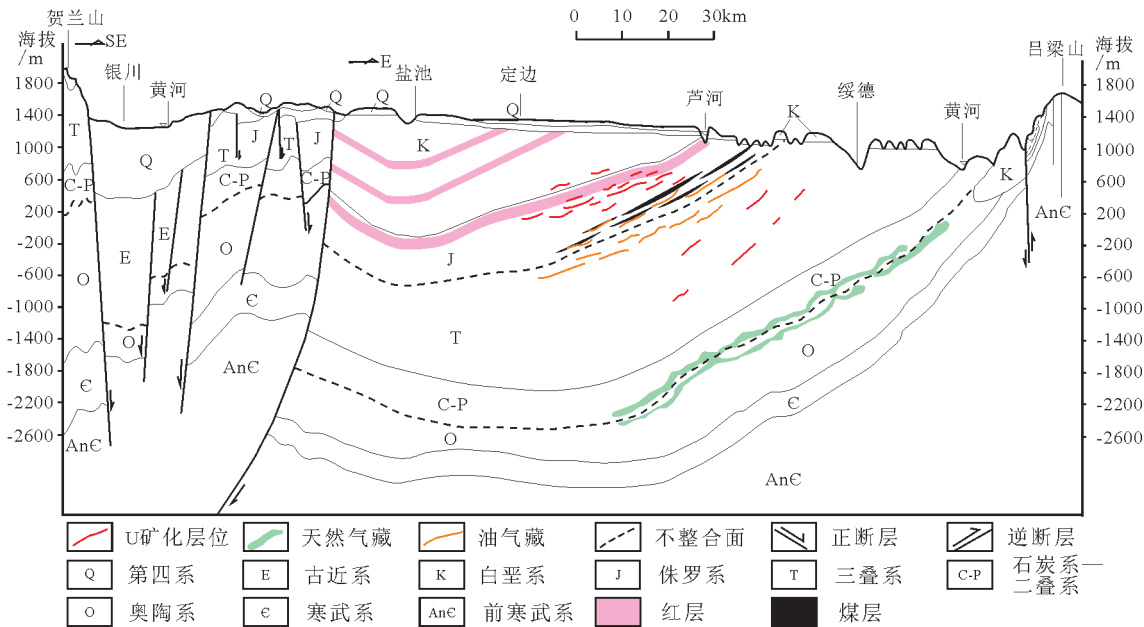


图4 鄂尔多斯盆地近东西向剖面(据参考文献[40]修改)

Fig. 4 Nearly EW-trending section of the Ordos basin

的宽缓斜坡带相比总体不利于成矿；中部陆南凸起、三个泉凸起等地，正向构造发育^[45]，下部是重要油气田区，其上部构造天窗地区可整体与钱家店矿床类比，是盆地内部寻找侏罗纪—白垩纪地层砂岩型铀矿的有利区；盆地北部索索泉凹陷区存在浅部寻找断隆作用相关的砂岩型铀矿床的可能。当然，除形态特征外，构造背景对盆地充填和含铀建造形成，特别是对沉积相与砂体特征有明显的控制作

用，它们共同制约着成矿有利区带和矿种类型的空间分布。需要强调的是，斜坡带、正向构造必须与断裂系统相联系才能构成一个较完整的补-径-排体系，从而制约铀矿的产出。

2.2 构造样式与找矿方向

笔者曾参与总结了中亚东部到中国北方的系列砂岩型铀矿的含铀岩系的构造样式，将铀矿产出的构造样式归纳为3种基本类型，即河谷式、盆缘式

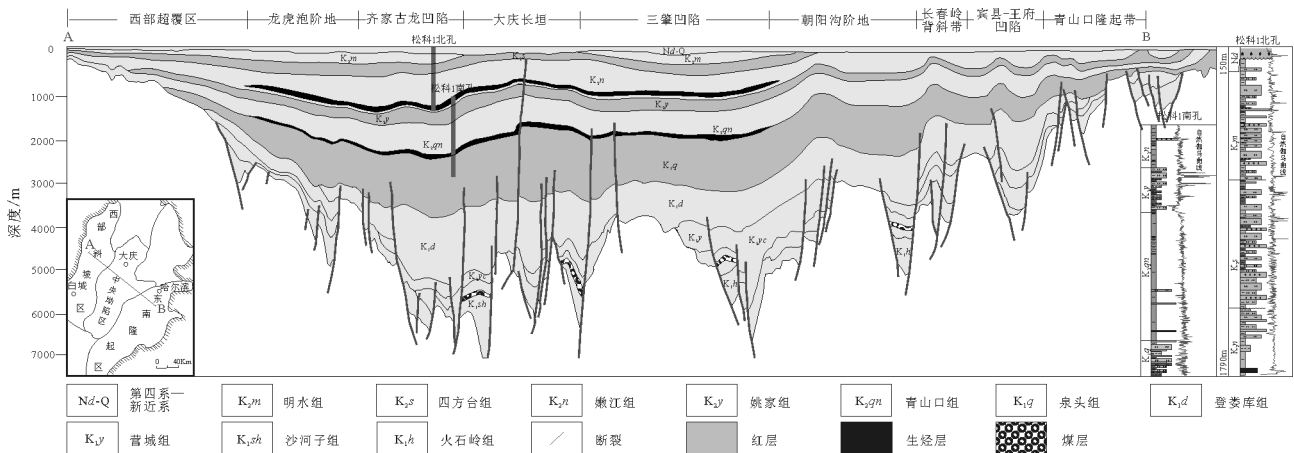


图5 松辽盆地北部东西向剖面与松科1井资料

(地层结构底图据参考文献[41]修改)

Fig. 5 EW-trending section of the north Songliao basin and stratigraphic column of CCSD Well 1

和盆内隆缘式^[46],并认为它们是矿床的现存构造特征,是矿床历经成矿作用与改造作用的最终产物。对于盆缘式而言,它强调的是成矿期原型盆地的边缘,它往往是一个单斜构造,与宽缓斜坡带相对应;而盆内隆缘式则更多强调了背斜或穹隆构造的两翼及倾伏端。在中国北方中生代盆地中,河谷式和盆缘式构造样式的砂岩型铀矿普遍发育,研究程度较高^[6,47-50],而对盆内隆缘式的关注明显不够。构造样式特征对开展盆地整体找矿具有重要意义,使找矿部署由传统的盆地边缘向盆地内部推进,这也为盆地深部找矿方向提供了理论依据。

2.3 构造演化与深部成矿

地震剖面反映的斜坡带和盆内隆起都是现存的深部地层结构特征,对于盆内隆缘控矿,更多地强调现存的构造天窗和后期沿构造天窗进入的含氧含铀水作用^[45,51],那么向斜区、隆缘区目的层以下是否还有潜在的产铀层位呢?这需要从构造演化的角度讨论。对于砂岩型铀矿成矿,构造斜坡带、隆缘的作用必须与成矿期和铀源供给相联系,斜坡带强调的是成矿期的构造斜坡,铀源与斜坡带可较长时间直接联系,当沉积期、成矿期、改造期斜坡带方向一致时,往往因为铀源的稳定供应而更加有利成矿。现今的盆缘冲断形成的向斜构造很多都是地质历史上的斜坡带,是当时成矿的有利地区,完全有成矿的地质条件。而对于隆缘区下部潜在的铀矿层,要综合考虑隆起的时间和盆缘地层出露情况,就松辽盆地北部而言,目前较明确的工业铀矿层主要为上白垩统四方台组,其下部的姚家组、青山口组、泉头组成矿潜力不明。但从盆地整体情况看,南部姚家组已发现了钱家店大型铀矿床,青山口组、泉头组也具有相似的沉积建造组合,是重要的潜在铀储层^[52]。在泉头组以上地层内,主要形成了3个不整合面,即上白垩统嫩江组顶、上白垩统明水组底和渐新统依安组顶。与此同时,在挤压应力体制下形成一种特殊类型的叠加构造样式——反转构造。盆地抬升背景下形成的盆缘斜坡带和反转构造形成的盆内背斜构造或隆起带,为砂岩型铀矿的形成提供了有利的补-径-排条件^[42]。盆缘含氧含铀流体在深部油气氧化还原界面完全有可能形成大规模铀矿化。目前,北方砂岩型铀矿调查与松科1井科研工作已经取得了很好的发现,在盆地中部的大庆长垣隆起区南倾伏端,不仅在四方

台组发现了工业矿体,而且在下部的姚家组也发现了很好的铀异常(图5)。

3 深部供铀与有机质的还原作用

对铀源的认识主要有3种观点:①铀来自盆地内前中生代建造及周边蚀源区;②铀由含矿层本身提供;③铀是从深源热液中带入的(深源成矿论)^[53]。与浅部相比,盆地深部形成砂岩型铀矿的另一个更为有利的条件是可能存在深部的铀源供给和更强的有机质还原作用。在以渗入型为主的砂岩型铀成矿作用中,多认为铀主要来自盆地周边隆起的蚀源区、含矿层本身及其上覆地层,其中周边蚀源区是铀的重要来源;而在以渗出作用占优势的铀成矿作用过程中,地层岩石本身、深部上升油田水^[54-55]、富铀岩石基底也可为铀成矿提供一定的内部铀源。杜乐天等^[56]利用ICP-MS对准噶尔、酒西、鄂尔多斯、辽河钱家店的石油和共生的油田水中的金属含量进行了测量,发现石油中金属含量远远大于同一油井油田水含量的几到几万倍。阿乌巴基洛夫20世纪70年代曾提出深源成矿观点^[57],并在哈萨克斯坦境内5年出现了3个铀矿床。该理论的实质内容是经向、纬向构造控制层间氧化带及铀矿化的分布,铀源和部分还原剂来自地壳深部^[53]。尽管还有较大争议,但其提出的一些层间氧化型铀矿难以解释的现象,如热液蚀变叠加现象、铀与大量不相关元素的超常富集^[53,56]等需要引起重视,它对于盆地深部找矿有重要意义。

关于油气等有机质对铀矿成矿的影响,国内学者开展过大量的研究^[58-61],并指出油气等富含有机质的还原性流体对砂岩型铀矿的形成具有重要作用。笔者在宁东、黄陵等地的铀矿调查工作中,在含矿段及其上部见到了明显的油迹,甚至可称之为油砂。一些典型铀矿床的包裹体、C-O-S同位素研究也发现了油气作用的证据^[62-64]。杜乐天等^[56]更加强调了油气的作用,指出鄂尔多斯盆地胶结物碳酸盐是氧气的氧化转生物。鄂尔多斯盆地后期的油气活动是全盆地性质的,一直到今天还在强烈向空中排气,规模和强度之大,超出一般想像。浅部的矿床尚且如此,盆地深部可能具有更强的还原作用。当然,无论是深部的铀源供给还是油气等的还原作用,都离不开切穿油气层或富铀基底的断裂系统及发散裂隙构造。

4 讨论

含铀岩系、构造背景、沉积环境、成矿流体、铀源供给、还原介质等控矿要素是盆地作用和环境演变系统的有机组成。盆地构造是砂岩型铀矿含铀建造、流体运移的发动机和控制器,作用于沉积期、成矿期和期后改造的各个阶段;而沉积期古环境是含铀建造及其上下岩系原生氧化、还原性质的主控因素。对典型矿床含铀岩系特征、构造背景规律的研究主要是为了分析盆地深部的铀矿找矿潜力和方向。中国北方中新生代盆地周缘发育大面积的富铀古生代—中生代花岗岩,铀源丰富,多期潮湿向干旱的气候转变形成多组有利于砂岩型铀矿形成的红—黑岩系建造组合,多旋回多期次的构造运动形成了有利的沉积相系和盆缘宽缓斜坡带、盆内正向隆起构造(包括背斜和隆起带),加上深部可能的铀源和油气等还原作用,都为盆地深部铀矿形成提供了良好的条件。

通过总结铀成矿规律,笔者认为,深部铀矿床形成的有利条件应重视6个方面:①富铀岩系;②具有红—黑岩系的双色结构,其过渡带是潜在的含铀岩系;③红色岩系具有更强的氧化性和运铀能力,深部大量的红色岩系具有很好的成矿条件;④构造有利区带,包括成矿期盆缘的宽缓斜坡、盆内隆起周缘、部分成矿期的古河谷地带,都为成矿流体运移提供了有利的构造条件,对于隆起区而言,其下部往往是重要的油气富集区,油水界面可能成为重要的氧化还原界

面;⑤切穿有机质层(包括煤层、油气层)或基底的断裂。它既是深部铀源和油气上升的主要通道,也常是表生流体的排泄通道,同时,由于断层错动、岩性破碎,也是重要的岩石物性变化界面;⑥沉积相带有利区,主要为扇三角洲、辫状三角洲、辫状河、曲流河沉积,砂体厚度适中地区。鄂尔多斯盆地东北部的铀矿床砂体厚度一般为25~44m^[8],在盆地中部地区寻找有利砂体相对更加重要。

根据有利区带在盆地的位置,深部找矿可以重点瞄准以下方向:①在盆地边缘斜坡区,重点以发育红—黑岩系结构的含铀地层为目标,寻找与浅部成矿条件相似的深部矿床;②在盆地中心区,以含铀的红色岩系为重点,优先寻找延伸至盆地深部的有利砂体发育的相带和正向构造区。前者重视在盆缘深部新层系找矿,后者重视在盆地中心新地区找矿。如松辽盆地北部地区的西部斜坡带、东部斜坡地带,不仅要重视浅部四方台组的铀矿找矿工作,也要重视下部地层,尤其是姚家组、泉头组下段的找矿潜力。此外,东部青山口组隆起区,还要注意在青山口组上段、离隆起区较近范围、砂体发育区寻找砂岩型铀矿的可能;对于大庆长垣隆起、朝阳阶地隆起等区域,要重视在隆起周缘深部的铀矿找矿工作。通过排查深部的油田钻孔资料往往可以快速地发现找矿线索。根据这个思路,在松辽盆地、鄂尔多斯盆地发现了较好的深部找矿线索,在松辽盆地深部四方台组底、姚家组底、青山口组顶和泉头组下部砂岩中见到了较好的放射性异常(图5、图6),异

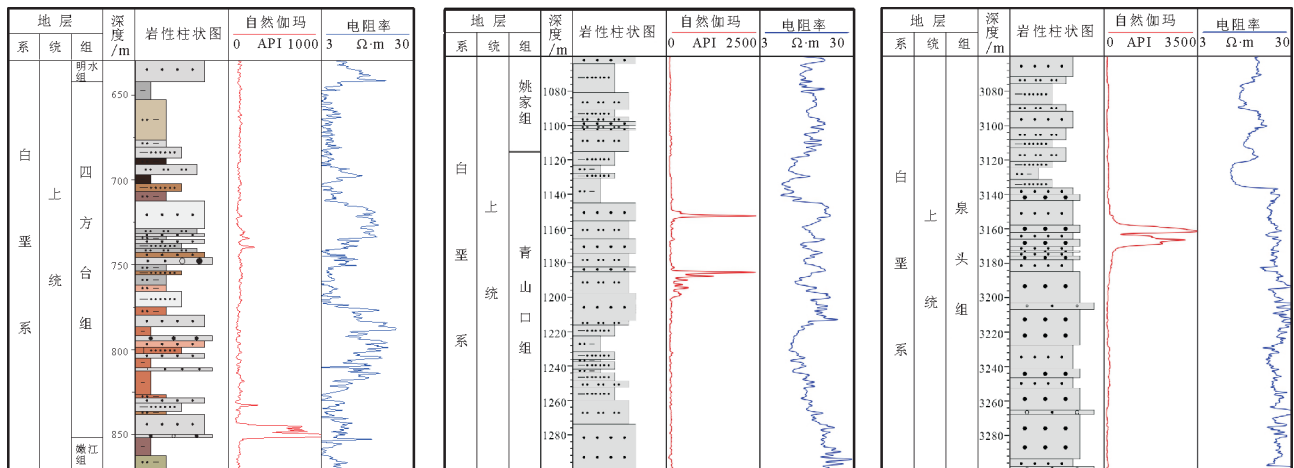


图6 松辽盆地油田钻孔反映的深部找矿信息

Fig. 6 Uranium prospecting information from oilfield drill holes in Songliao basin

a—齐家古龙凹陷鼻状构造次级隆起的四方台组异常;b—西部斜坡靠近盆地中心处见到的青山口组异常(岩心颜色资料缺失);c—盆地中部长岭凹陷中见到的泉头组异常(岩心颜色资料缺失)

常主要位于区域红层下部与黑色岩系上部的过渡带,均属红-黑岩系的转换部分,最大深度超过3000m,充分显示了盆地深部寻找砂岩型铀矿的潜力。

5 结 论

(1)中国北方主要产铀盆地铀源丰富,普遍发育明显的原始预富集作用,浅部工业矿体对沉积相、沉积建造组合具有明显的选择性,工业矿体优先发育在具有红-黑岩系结构的接触带砂岩中,砂体多受辫状河流、曲流河三角洲、扇三角洲等沉积体系控制。红-黑岩系结构特征是古气候演变的重要响应,这些特征对寻找深部潜在含铀层位具有重要意义。

(2)盆地构造背景及其演化控制了北方各主要盆地含铀岩系、容矿砂体和成矿深度等,宽缓斜坡带、盆内隆起周缘是成矿的有利构造部位,综合分析潜在含铀岩系的构造演化特征,是深部新层位、新地区找铀的重要依据。

(3)盆地深部找矿需要重视的有利条件和当前盆地边缘斜坡区、盆地中心区的深部找矿思路:在盆地边缘斜坡区,重点以发育红-黑岩系结构的含铀地层为目标,寻找与浅部相似成矿条件的深部矿床;在盆地中心区,以含铀的红色岩系为重点,优先寻找延伸至盆地深部的正向构造区和砂体发育区。根据这一思路,在中国北方砂岩型铀矿调查选区中已取得了深部新层位铀异常的重要发现,表明了中国北方中生代盆地深部具有一定的潜力。

致谢:中国地质调查局天津地质调查中心徐增连工程师、陈路路助理工程师、刘华健硕士,中国煤炭地质总局第一勘探局地质勘查院宋洪柱高级工程师、青海煤炭地质一〇五勘探队黄广楠工程师,在成文过程中给予帮助和指导,在此一并致以诚挚的谢意。

参考文献

- [1]张金带,徐高中,林锦荣,等.北方6种新的砂岩型铀矿对我国铀资源潜力的提示[J].中国地质,2010,37(5):1434-1449.
- [2]彭云彪,陈安平.内蒙古中部山间盆地地质构造和沉积环境演化及砂岩型铀矿成矿环境分析[J].铀矿地质,2000,16(6):327-333.
- [3]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研究[J].铀矿地质,2003,19(3):129-136.
- [4]陈祖伊,周维勋,管太阳,等.产铀盆地的形成演化模式及其鉴别标志[J].中国核科技报告,2004,21(3):141-151.
- [5]李子颖,方锡珩,陈安平,等.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:地球科学,2007,37(S1):139-146.
- [6]聂逢君,李满根,严兆彬,等.内蒙古二连盆地砂岩型铀矿目的层赛汉组分段与铀矿化[J].地质通报,2015,34(10):1952-1963.
- [7]王果,王国荣,鲁克改,等.准噶尔盆地铀矿地质工作回顾及今后找矿方向[J].铀矿地质,2016,32(6):340-349.
- [8]焦养泉,吴立群,彭云彪,等.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[J].地学前缘,2015,22(1):189-205.
- [9]高远.晚白垩世松辽盆地古气候演化——来自松科1井大陆科学钻探的证据[D].中国地质大学(北京)博士学位论文,2015.
- [10]吴柏林.中国西北地区中生代盆地砂岩型铀矿地质与成矿作用[D].西北大学博士学位论文,2005.
- [11]陈路路,聂逢君,严兆彬,等.北方中生代产铀盆地山演化与砂岩型铀矿成矿作用分析[J].科学技术与工程,2014,14(5):163-170.
- [12]田晓玲,汪国文,邹荷丽.钱家店凹陷胡力海洼陷成藏条件分析[J].特种油气藏,2001,8(4):13-16.
- [13]肖新建.东胜地区砂岩铀矿低温流体成矿作用地球化学研究[D].核工业北京地质研究院博士学位论文,2004.
- [14]张振强.松辽盆地南部上白垩统地浸砂岩型铀矿成矿条件研究[D].东北大学博士学位论文,2006.
- [15]李盛富,颜启明,王新宇,等.伊犁盆地水西沟群冲积扇-扇三角洲沉积体系研究[J].新疆地质,2006,24(3):297-304.
- [16]李盛富,陈洪德,周剑,等.沉积盆地源-汇过程及其演化对砂岩型铀矿成矿的制约——以新疆伊犁盆地南缘蒙古古尔铀矿床为例[J].铀矿地质,2016,32(3):137-145.
- [17]李洪军,申科峰,聂逢君,等.二连盆地中生代沉积演化与铀成矿[J].东华理工大学学报(自然科学版),2012,35(4):301-308.
- [18]金若时,黄澎涛,苗培森,等.准噶尔盆地东缘侏罗系砂岩型铀矿成矿条件与找矿方向[J].地质通报,2014,33(2/3):359-369.
- [19]权志高,宋哲,傅成铭,等.柴达木盆地北缘地区砂岩型铀矿成矿条件与成矿潜力[J].铀矿地质,2014,30(3):155-160.
- [20]游伟华,李满根,胡宝群,等.二连盆地巴彦乌拉拉铀矿床目的层黏土矿物特征及其意义[J].科学技术与工程,2015,15(36):15-20.
- [21]郝以泽,唐湘飞,邱余波.新疆准噶尔盆地库普勒地浸砂岩型铀矿成矿条件[J].现代矿业,2017,(3):51-54.
- [22]Bonnetti C, Liu X D, Yan Z B, et al. Coupled uranium mineralisation and bacterial sulphate reduction for the genesis of the Baxingtuo sandstone-hosted U deposit, SW Songliao Basin, NE China[J]. Ore Geology Reviews, 2017, 82: 108-129.
- [23]刘波,杨建新,彭云彪,等.二连盆地中东部含铀古河谷构造建造及典型矿床成矿模式研究[J].矿床地质,2017,36(1):126-142.
- [24]金若时,程银行,杨君,等.准噶尔盆地侏罗纪含铀岩系的层序划分与对比[J].地质学报,2016,90(12):3293-3309.
- [25]张天福,孙立新,张云,等.鄂尔多斯盆地北缘侏罗纪延安组、直罗组泥岩微量、稀土元素地球化学特征及其古沉积环境意义[J].地质学报,2016,90(12):3454-3472.
- [26]高有峰,王璞琨,瞿雪姣,等.松辽盆地东南隆起区白垩系嫩江组一段沉积相、旋回及其与松科1井的对比[J].岩石学报,2010,26

- (1): 99-108.
- [27]权志高, 徐高中. 中国北西部地区砂岩型铀矿含矿建造及找矿前景[J]. 地质学报, 2012, 86(2): 307-315.
- [28]Bonnetti C, Cuney M, Bourlange S, et al. Primary uranium sources for sedimentary-hosted uranium deposits in NE China: insight from basement igneous rocks of the ErlanBasin[J]. Mineralium Deposita, 2017, 52(3): 297-315.
- [29]陈祖伊, 陈戴生, 古抗衡, 等. 中国砂岩型铀矿容矿层位、矿化类型和矿化年龄的区域分布规律[J]. 铀矿地质, 2010, 26(6): 321-330.
- [30]金若时, 程银行, 李建国, 等. 中国北方晚中生代陆相盆地红-黑岩系耦合产出对砂岩型铀矿成矿环境的制约[J]. 中国地质, 2017, 44(2): 205-223.
- [31]邓胜彪, 王思恩, 杨振宇, 等. 新疆准噶尔盆地中、晚侏罗世多重地层研究[J]. 地球学报, 2015, 36(5): 559-574.
- [32]邹和平, 张珂, 李刚. 鄂尔多斯地块早白垩世构造-热事件: 杭锦旗玄武岩的 Ar-Ar 年代学证据[J]. 大地构造与成矿学, 2008, 32(3): 360-364.
- [33]焦养泉, 吴立群, 荣辉, 等. 铀储层结构与成矿流场研究: 揭示东胜砂岩型铀矿床成矿机理的一把钥匙[J]. 地质科技情报, 2012(5): 98-108.
- [34]张来明. 白垩纪—古近纪古气候演化与生物绝灭——来自中国东部若干陆相盆地的证据[D]. 中国地质大学(北京)博士学位论文, 2016.
- [35]徐增连, 魏佳林, 曾辉, 等. 开鲁盆地东北部钱家店凹陷晚白垩世姚家组孢粉组合及其古气候意义[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2017. doi:10.3799/dqkx.2017.554(待刊)
- [36]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.
- [37]王志龙. 我国西北大、中型内陆盆地中的生铀层双层结构模式及其在盆地成矿远景评价中的意义[J]. 铀矿地质, 1985,(4): 11, 41-45.
- [38]籍增贤, 韩长青. 北方中生代产铀盆地的特点与找矿方向探讨[J]. 铀矿地质, 2006, 22(4): 229-234.
- [39]陈业全, 王伟锋. 准噶尔盆地构造演化与油气成藏特征[J]. 中国石油大学学报自然科学版, 2004, 28(3): 4-8.
- [40]薛春纪, 薛伟, 康明, 等. 鄂尔多斯盆地流体动力学过程及其砂岩型铀矿化[J]. 现代地质, 2008, 22(1): 1-8.
- [41]王成善, 冯志强, 王璞珺, 等. 白垩纪松辽盆地松科 1 井大陆科学钻探工程[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 4-5.
- [42]高瑞祺, 蔡希源. 松辽盆地油气田形成条件与分布规律[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997.
- [43]杨海波, 钟延秋. 松辽盆地东北隆起区砂岩型铀矿成矿条件分析[J]. 地质与资源, 2011, 20(5): 332-338.
- [44]陈正乐, 鲁克改, 王果, 等. 准噶尔盆地南缘新生代构造特征及其与砂岩型铀矿成矿作用初析[J]. 岩石学报, 2010, 26(2): 457-470.
- [45]古抗衡, 陈祖伊. 正向构造对层间氧化带砂岩型铀矿成矿和定位的控制[J]. 铀矿地质, 2010, 26(6): 361-364.
- [46]Jin R, Miao P, Sima X, et al. Structure Styles of Mesozoic-Cenozoic U-bearing Rock Series in Northern China[J]. Acta Geologica Sinica, 2016, 90(6): 2104-2116.
- [47]罗静兰, 刘小洪, 张复新, 等. 鄂尔多斯盆地东胜地区和吐哈盆地十红滩地区含铀砂岩岩石学及成岩作用[J]. 石油学报, 2005, 26(4): 39-45.
- [48]赵凤民. 世界铀资源现状及发展趋势[J]. 中国核工业, 2006, (1): 45-48.
- [49]刘红旭, 董文明, 刘章月, 等. 塔北中生代构造演化与砂岩型铀成矿作用关系——来自磷灰石裂变径迹的证据[J]. 世界核地质科学, 2009, 26(3): 125-133.
- [50]侯惠群, 韩绍阳, 柯丹. 新疆伊犁盆地南缘砂岩型铀成矿潜力综合评价[J]. 地质通报, 2010, 29(10): 1517-1525.
- [51]夏毓亮. 钱家店铀矿床[M]. 北京: 中国原子能出版社, 2015.
- [52]于文斌, 董清水, 邹吉斌, 等. 松辽盆地东南缘地浸砂岩型铀矿成矿条件分析[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2006, 36(4): 543-548.
- [53]赵忠华, 李国宽, 田永庆, 等. 深源成矿论在松辽盆地南部可地浸砂岩型铀矿预测评价中的初步运用[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2001, 20(1): 45-48.
- [54]张振强, 桑吉盛, 金成洙. 松辽盆地东南隆起区反转构造对砂岩型铀矿成矿的作用[J]. 铀矿地质, 2006, 22(3): 151-156.
- [55]官文杰, 张振强, 于文斌, 等. 松辽盆地地浸砂岩型铀成矿铀源分析[J]. 世界核地质科学, 2010, 27(1): 25-30.
- [56]杜乐天, 欧光习. 盆地形成及成矿与地幔流体间的成因联系[J]. 地质前缘, 2007, 14(2): 217-226.
- [57]Aubakirov K B. On the deep origin of ore-forming solutions in the uranium deposits in platform sequence of depressions (with Chu-Sarysu province as an example)[J]. Geology of Kazakhstan, 1998, 354: 40-47.
- [58]刘建明, 叶杰, 刘家军, 等. 盆地流体中有机组分的成矿效应[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2000, 19(3): 141-148.
- [59]欧光习, 李林强, 孙玉梅. 沉积盆地流体包裹体研究的理论与实践[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2006, 25(1): 1-11.
- [60]张景廉, 卫平生, 张虎权, 等. 再论石油与砂岩型铀矿床的相互关系——四论油气与金属(非金属)矿床的相互关系[J]. 新疆石油地质, 2006, 27(4): 493-497.
- [61]权建平, 樊太亮, 徐高中, 等. 中国北方盆地中油气运移对砂岩型铀矿成矿作用讨论[J]. 中国地质, 2007, 34(3): 470-477.
- [62]李荣西, 赫英, 李金保, 等. 东胜铀矿流体包裹体同位素组成与成矿流体来源研究[J]. 地质学报, 2006, 80(5): 753-760.
- [63]吴柏林, 魏安军, 胡亮, 等. 内蒙古东胜铀矿区后生蚀变的稳定同位素特征及其地质意义[J]. 地质通报, 2016, 35(12): 2133-2145.
- [64]黄少华, 秦明宽, 刘章月, 等. 准噶尔盆地南缘硫磺沟地区铀矿化砂岩流体包裹体及有机地球化学特征[J]. 地质学报, 2016, 90(3): 475-488.
- ①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. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2012.