

doi: 10.12029/gc20180114

赵岳, 徐强, 梁叶萍, 赵红松, 唐朝苗, 郑 翠. 2018. 内蒙古二连盆地呼仁布其凹陷白垩系铀矿化特征与找矿远景[J]. 中国地质, 45(1): 168–177.  
Zhao yue, Xu Qiang, Liang Yeping, Zhao Hongsong, Tang Chaomiao, Zheng Cui. 2018. Uranium mineralization characteristics of Cretaceous period and prospecting direction of the Hurenbuqi depression in Erlian basin, Inner Mongolia[J]. Geology in China, 45(1): 168–177(in Chinese with English abstract).

## 内蒙古二连盆地呼仁布其凹陷白垩系铀矿化特征与找矿远景

赵 岳<sup>1,2</sup> 徐强<sup>2,3</sup> 梁叶萍<sup>2</sup> 赵红松<sup>2</sup> 唐朝苗<sup>2</sup> 郑翠<sup>2</sup>

(1. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083; 2. 中国煤炭地质总局勘查研究总院, 北京 100039;  
3. 中国矿业大学(徐州), 江苏 徐州 221116)

**摘要:**二连盆地是我国煤炭、油气、铀矿等资源的重要勘查基地, 其中砂岩型铀矿的找矿方向和找矿突破一直是盆地铀资源勘查的重点。呼仁布其凹陷为二连盆地北部巴音宝力格隆起上的一个次级凹陷, 为一相对独立的地质构造单元, 在古生代基底之上沉积了厚层的中新生代地层, 其中下白垩统赛汉组沉积了一套扇三角洲-湖泊相的含煤碎屑岩建造, 地层埋深浅、厚度稳定, 发育泥-砂-泥结构, 砂体较发育, 岩石具有黑色和灰色原生地球化学特征, 具备铀矿成矿基本条件。本文以煤田钻孔资料“二次开发”作为铀矿勘查新思路, 对凹陷中部地区收集的煤田钻孔测井成果开展了综合研究, 在下白垩统赛汉组中圈定出规模较大且连续的放射性异常, 显示出较好的找矿前景。通过对呼仁布其凹陷大地构造条件、铀源、地层-岩相、岩性、古气候与地貌、古水文地质特征等的系统分析, 择优重点选择煤田铀异常孔进行钻孔验证, 发现了具有工业意义的铀矿孔, 在赛汉组中发现了两个稳定的铀矿化层, 第一层铀矿化受到潜水氧化带的控制, 位于潜水氧化带界面底部的泥岩中, 为垂向氧化型成矿类型; 第二层铀矿化受到层间氧化作用的控制, 为典型的侧向氧化层间氧化型成矿类型。指出煤田钻孔伽马异常高值区可作为下一步铀矿勘查工作的方向。

**关 键 词:**呼仁布其凹陷; 白垩系; 砂岩型铀矿化; 成矿条件; 找矿方向

中图分类号: P619.14 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2018)01-0168-10

### Uranium mineralization characteristics of Cretaceous period and prospecting direction of the Hurenbuqi depression in Erlian basin, Inner Mongolia

ZHAO yue<sup>1,2</sup>, XU Qiang<sup>2,3</sup>, LIANG Yeping<sup>2</sup>, ZHAO Hongsong<sup>2</sup>, TANG Chaomiao<sup>2</sup>, ZHENG Cui<sup>2</sup>

(1. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China;  
2. General Prospecting Institute, China National Administration of Coal Geology, Beijing 100039, China; 3. School of Resources and Geoscience, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China )

**Abstract:** Erlian basin has rich coal, oil, natural gas and uranium resources, but the targeting and breakthrough of the prospecting for

收稿日期: 2016-11-24; 改回日期: 2017-02-04

基金项目: 国家 973 项目(2015CB453000)和中国地质调查局地质调查项目(12120115009801)联合资助。

作者简介: 赵岳, 女, 1987 年生, 博士生, 研究方向为地质学专业; E-mail: 303444675@qq.com。

sandstone-type and sedimentary uranium deposits remain a focus in uranium resources exploration of this basin. Hurenbuqi depression is a subordinate depression on the Bayinbaolige uplift in the northern part of Erlian basin, which is a relatively independent geological tectonic unit. It deposited thick Mesozoic-Cenozoic strata above the Paleozoic basement. The Lower Cretaceous Saihan Formation deposited a set of fan delta-lacustrine coal-bearing clastic rocks. The burial depth of the strata is fairly shallow, the thickness is stable, the mud-sand-mud structure is developed, the sand body is especially well developed, and the rock has black and gray primary geochemical characteristics. Using the new idea of employing the data of coalfield drilling for second-round development of uranium resources, the authors conducted comprehensive research on the coalfield logging data collected from a certain area on the northwest margin of the basin and, as a result, delineated large-scale and continuous radioactive anomalies in the Lower Cretaceous Saihan Formation, showing a good prospecting prospect. Through a systematic study of tectonic conditions, stratigraphic facies, lithology, palaeoclimate, geomorphology, and palaeohydrology, the authors chose uranium anomaly holes in the coalfield to make drilling verification and found a uranium ore hole with the industrial significance. Two stable uranium mineralization layers were found in the Saihan Formation. The first layer is controlled by the phreatic oxidation zone, is located in the mudstone at the bottom of the interface of the phreatic oxidation zone, and belongs to the vertical oxidation type mineralization type. The second layer of uranium mineralization is a mudstone formation, and belongs to the typical interlayer oxidation type. The authors finally point out the direction of the next exploration work.

**Key words:** Hurenbuqi depression; Cretaceous; sandstone-type (mudstone-type) uranium deposit; metallogenic conditions; prospecting direction

**About the first author:** ZHAO Yue, born in 1987, doctor candidate, majors in the study of geology; E-mail: 303444675@qq.com.

**Fund support:** Supported by Major State Basic Research Development Program of China (973Program) (No. 2015CB453000) and China Geological Survey Program (No. 12120115009801).

## 1 引言

二连盆地是中国北方大型陆相沉积盆地之一。前人从盆地所处大地构造位置、盆地类型、主要盖层沉积相及区域铀矿化等条件分析(卫三元等, 2006; 张金带等, 2010; 聂逢君, 2010; 鲁超等, 2013; 旷文战等, 2014; 聂逢君等, 2015; 焦养泉等, 2015), 认为二连盆地具备砂岩型成矿的一些基本条件, 已发现赛罕高毕、努和廷、苏崩、道尔苏、巴彦乌拉等多个大、中型铀矿床, 是北方中生代沉积盆地中最具潜力的铀矿成矿区之一。

近年来, 以可地浸砂岩型铀矿成矿理论为指导, 以成矿地质背景和成矿地质条件为基础, 寻找地浸砂岩型铀矿找矿靶区为目的, 对煤田钻孔资料进行“二次开发”, 开展勘查选区研究, 在煤田勘查区筛选具有自然伽玛异常的钻孔, 以此为依据圈定异常钻孔, 优选找矿靶区, 进行钻探验证的铀矿资源勘查理念已在北方重要沉积盆地取得重大的突破(金若时等, 2013、2014; 吴兆剑等, 2016), 发现了众多很有前景的工业矿体。

受沉积演化控制的铀矿找矿目的层在二连盆地有下白垩统赛汉组、上白垩统二连组和古近系脑

木根组、伊尔丁曼哈组(李洪军等, 2012)。在呼仁布其凹陷, 以白垩系赛汉组为研究对象, 重点分析了赛汉组的沉积环境及砂岩型铀矿成矿条件, 指出区内下一步铀矿找矿方向, 这为后期在二连盆地开展铀矿找矿工作及扩大中国铀矿资源储备提供了良好的基础。

## 2 区域地质背景

呼仁布其凹陷位于二连盆地北部的巴音宝力格隆起的中部, 为一NE向展布的中生代复式断陷, 工作区位于凹陷南部(图1)。中生代以来, 二连盆地进入沉积盖层演化阶段, 经历了早白垩世阿尔善—腾格尔期断陷期、早白垩世赛汉期断坳期、晚白垩世—古新世隆升剥蚀期、始新世坳陷盆地发育期、渐新世—今隆升剥蚀期五个构造演化阶段(于海飞, 2010)。赛汉组沉积期, 凹陷西南缘继承了基底构造斜坡带特征, 发育稳定相带和规模较大的砂体, 为铀成矿奠定了基础。晚白垩世—古新世, 凹陷处于隆升剥蚀阶段, 目的层长期暴露剥蚀, 直至新近系沉积了红色碎屑岩建造。区内主要出露早古生代及中生代—新生代地层。上古生界为泥盆系和石炭系, 中生界包括白垩系及古近系, 第四

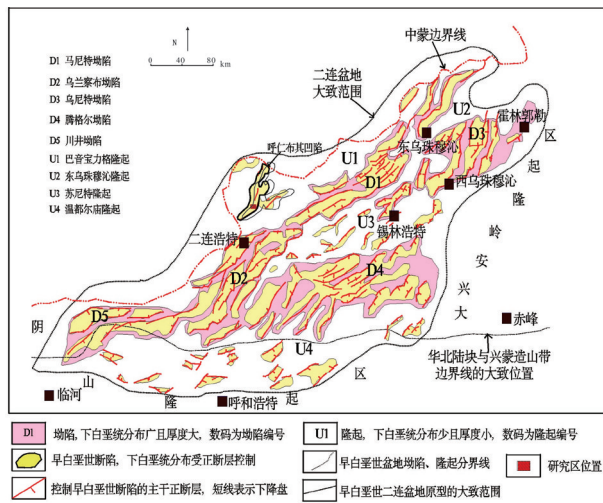


图1 二连盆地构造单元划分及研究区位置(据参考文献[15]修改)

Fig.1 Division of structural elements of Erlian basin and location of the study area (modified after reference [15])

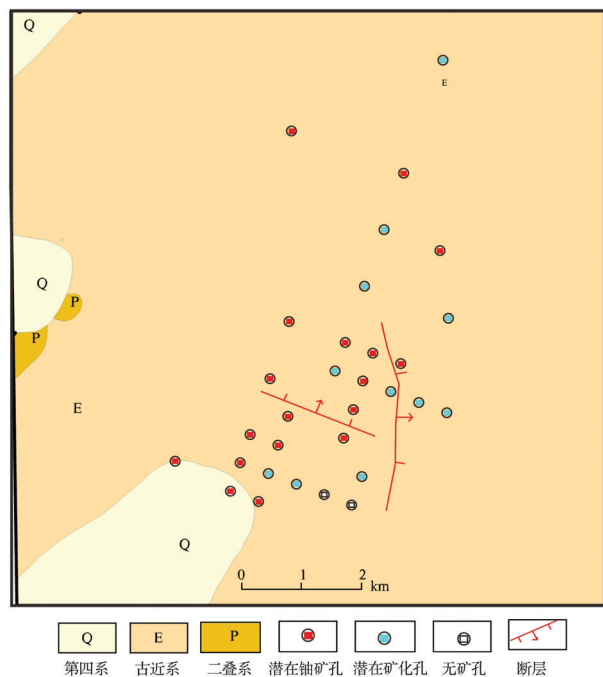


图2 研究区异常分布及地质简图

Fig.2 Project layout and geological map of the study area

系(图2)。二连盆地早白垩世断陷基底为兴蒙造山带海西期褶皱,基底结构以紧闭线状褶皱为主(崔永谦等,2011,李先平等,2015;赵贤正等,2015)。盆地盖层为一套杂色碎屑岩建造、灰色含煤碎屑岩建造和新近系砖红色泥质岩建造。蚀源区(巴音宝力

格隆起)发育华力西晚期黑云母花岗岩及石炭纪和侏罗纪的中酸性火山岩,断裂构造发育,有大量的晚石炭世中粒花岗闪长岩和中粒黑云母二长花岗岩侵入。

### 3 研究区地质特征

#### 3.1 地层特征

研究区基底主要由晚古生代褶皱岩系组成,主要沉积石炭系黑色火山熔岩和火山碎屑岩,岩性主要为安山岩和英安岩。侵入岩岩石类型丰富,主要为花岗闪长岩、石英闪长岩及黑云母花岗岩。华力西期花岗岩及闪长岩(铀含量为 $2.5 \times 10^{-6} \sim 4.6 \times 10^{-6}$ ,钍含量为 $16.8 \times 10^{-6} \sim 25.0 \times 10^{-6}$ )铀丰度高(李国新等,2003)。其上沉积了厚层中生代沉积岩,断裂不太发育,白垩系为含煤建造,包括阿尔善组( $K_1ba$ )、腾格尔组( $K_1bt$ )、赛汉组( $K_1bs$ );其上为古近系伊尔丁曼哈组( $E_2y$ )冲积相陆源碎屑岩建造及第四系冲洪积相沉积层(图3)。

下白垩统赛汉组( $K_1bs$ )为本区主要的含铀矿目

年代地层	岩石地层单位名称	代号	厚度/m	岩性柱状图	岩性、化石特征	沉积相与沉积建造	盆地演化阶段	
新生代	第四系全新统	湖积物	Q	>5	松散砂砾岩、黏土	冲洪积相	陆相湖盆消失,转准平原化阶段	
	古近系	伊尔丁曼哈组	$E_2y$	30	弱固结红色泥岩、黄色砂砾岩、早生植物孢粉	冲积相陆源碎屑岩建造	陆相湖盆消失,转准平原化阶段	
中生代	白垩系	下统	赛汉组	$K_1s$	160~600	上部为黄色粗砂、中细砂岩,灰色泥岩、页岩夹煤层,下部为砾岩、砂砾岩;含狼鳍鱼、叶肢介等动物化石	湖泊-三角洲相陆源碎屑岩建造	整体抬升,山间盆地发展阶段
		腾格尔组	上段 $K_1t^1$ 下段 $K_1t^2$	300~1200 100~1200	灰色砂砾岩、含砾泥岩、灰黑色泥岩、页岩 杂色砂砾岩、砂岩与灰色泥岩	湖相陆源碎屑岩建造		
		阿尔善组	$K_1b$	400~1000	杂色砂砾岩夹泥岩、含砾泥岩、底部夹火山角砾岩薄层。	滨浅湖-冲积扇陆源碎屑岩建造		
古生代	石炭系	上统	宝力高庙组	上段 $C_2b^2$ 下段 $C_2b^1$	814~1198 >492	流纹岩,安山岩、英安岩等火山熔岩等火山碎屑,含海绵骨针 灰白凝灰质长石砂岩、岩屑长石砂岩、岩屑角闪岩	陆源火山岩建造 三角洲相陆源碎屑岩建造	
		中下统	泥碱河组	$D_{1-2}n$	>517	灰色板岩、岩屑长石砂岩、砂质砾岩,见三叶虫、珊瑚等动物化石	滨浅海-半深海相沉积建造	洋壳俯冲,局限海盆发展-萎缩阶段

图3 研究区综合柱状图(据①修改)

Fig.3 Stratigraphic columnar section of the study area (modified after reference ①)



图4 研究区岩性特征图

a—赛汉组上部煤层及泥岩;b—赛汉组顶部土黄色中粗砂岩,见高岭土及褐铁矿化(古风化壳);c—黑色炭质泥岩(工业孔铀矿样品);d—灰色细砂岩(矿化孔铀矿样品);e—赛汉组黄色粗砂岩及灰黑色炭泥、泥岩(黄色框区域为层间氧化带,红色框为矿体);f—物源区二叠纪花岗岩;g—赛汉组砂岩中炭化植物碎屑;h—灰色中细粒长石砂岩(工业孔);i—灰白色含砾砂岩(工业孔)

Fig.4 Lithologic characteristics of the study area

a—Coal and mudstone of the upper Saihan Formation; b—Yellow medium coarse sandstone of the upper Saihan Formation;  
c—Black carbonaceous mudstone of uranium industrial drill hole; d—Gray fine-grained sandstone of Uranium industrial drill hole;  
e—Yellow coarse-grained sandstone and black Carbonaceous mudstone(yellow frame is interlayer oxidation zone, red frame is uranium deposit);  
f— Permian granite of uplift area; g—Carbonized plant debris from sandstone of the upper Saihan Formation; h—Gray fine-grained feldspar sandstone;  
i—Gray and gravel conglomerate sandstone

的层,岩性主要由灰色砂砾岩、含砾泥岩、细砂岩及煤层组成(图4a、b)。铀矿化主要分布在灰黑色泥岩、炭质泥岩及细砂岩中(图4c、d),该组顶部存在一套稳定的古风化壳,岩性以黄色、灰白色含砾粗砂岩、中细砂岩、泥岩为主,见高岭土化、褐铁矿化蚀变(图4b),部分钻孔发育层间氧化带,岩性主要为黄色含砾中粗砂岩(图4e)。

### 3.2 含矿层分布特征

研究区含矿地层主要为下白垩统赛汉组,该组

分布广泛,厚度稳定,具有良好的泥-砂-泥结构,埋藏较浅(小于300 m),在研究区的西南部埋藏相对浅,为80~200 m;在东部埋藏相对深,为200~300 m。总体而言,西南部砂体厚度较大,最厚砂体达到100 m,东部、东南部整体较小(图5)。构造简单,产状稳定,总体为向SE缓倾地层,倾角小于5°,延伸稳定,含矿地层内断裂构造不发育。砂体较发育,富含有机质、炭化植物碎屑及黄铁矿等还原组分,岩性以中粗砂岩、粗砂岩及砂质砾岩为主。砂体厚度

20~100 m(图6),延伸稳定,结构疏松,渗透性良好。

赛汉组顶部发育厚20~60 m的潜水氧化带(图5)。岩性主要为黄色、灰白色含砾粗砂岩、中砂岩、砂质泥岩,砂岩中多见花岗岩碎屑,碎屑颗粒磨圆度差,呈次棱角状,体现了近源沉积的特点(图4h、i),并普见高岭土化、褐铁矿化后生蚀变。在潜水氧化带底部的泥岩中赋存本区第一层铀矿化。

赛汉组中部发育层间氧化带(图4c,图5,图6),岩性主要为黄色含砾粗砂岩、中砂岩,岩性较疏松,渗透性好。第二层铀矿化赋存在赛汉组中段的砂体及紧邻氧化砂体底部的泥岩、炭质泥岩中(图6,图7),顶板为灰绿色、灰色泥岩、含砂泥岩,底板为灰色泥岩、泥炭或煤层。在含矿层中,氧化作用从WS向NE方向逐渐减弱,直至进入还原带。铀矿化作用与侧向的层间氧化作用密切相关(图5),属于典型的层间氧化铀成矿类型。

### 3.3 隔水层特征

研究区泥岩隔水层分布十分有利于砂岩型铀成矿,含矿地层赛汉组中段的底部分布一层稳定厚度的泥岩、炭质泥岩及煤层,上部分布稳定的古近系泥岩盖层(图5)。

产铀的沉积盆地应是大型的自流水盆地,有丰

富的水源补给区,有岩层产状平缓的长距离径流区及明显的排泄区(金若时等,2014)。二连盆地受周边及中央隆起控制,具备渗入型自流盆地的特点。宏观上盆地内地下水接受隆起区基岩裂隙水的侧向补给和大气降水的垂直渗入补给,从盆源向盆内径流、排泄。呼仁布其凹陷被分割为相对独立的次级水文地质单元,形成独立完整的补径排系统,为形成砂岩型铀矿提供了良好的水文动力条件(图8)。研究区内地层倾向SE、倾角4°~5°,含矿砂体由NW向SE埋深逐渐加大,更有利于成矿物质由NW向SE运移,同时地层倾角较小,有利于潜水氧化作用的发生。

## 4 含矿岩石特征

下白垩统赛汉组(K<sub>1s</sub>)自下而上划分为K<sub>1bs</sub><sup>1</sup>和K<sub>1bs</sub><sup>2</sup>两段,是研究区的含铀矿目的层,具有非常高的自然伽马异常值。赛汉组下段(K<sub>1bs</sub><sup>1</sup>)下部为灰色、灰绿色砾岩夹含砾泥岩薄层,上部为灰色、黑色含砾泥岩、炭质泥岩夹砂岩、砾岩及褐煤薄层;赛汉组上段(K<sub>1bs</sub><sup>2</sup>)主要为灰绿色泥岩、粉砂岩及中粗砂岩等,其中含矿层顶部粗砂岩碎屑成分以石英为主,长石和暗色矿物次之。碎屑次棱角状、分选一

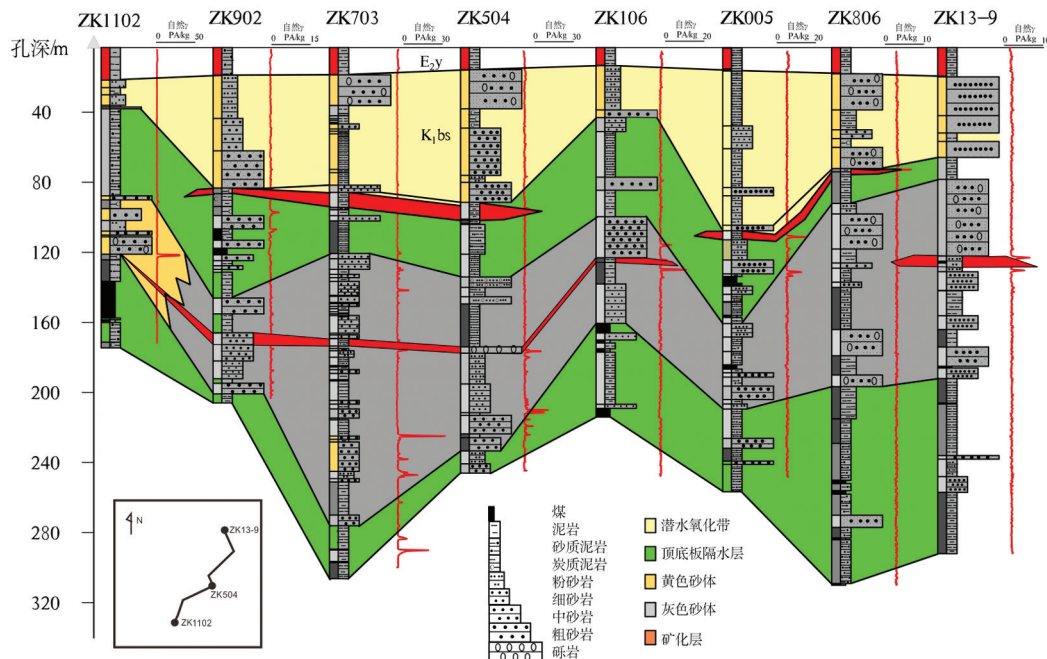


图5 研究区含矿地层对比剖面  
Fig.5 Correlation of ore-bearing strata in the study area

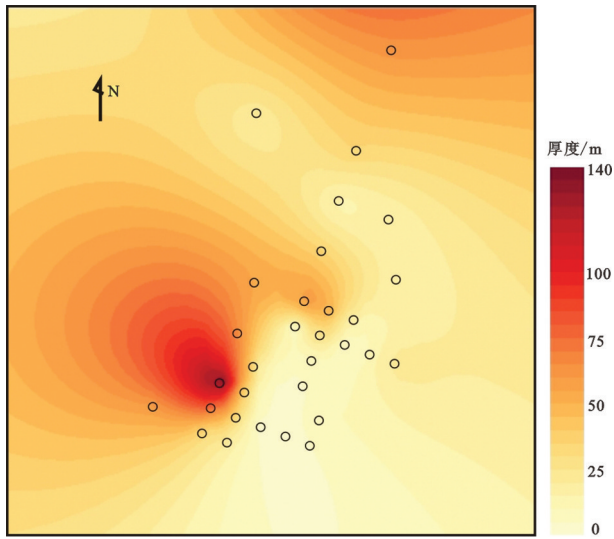


图6 研究区含矿含水层厚度等值线图  
Fig.6 Thickness contour map of uranium ore-bearing sandstone bodies in the study area

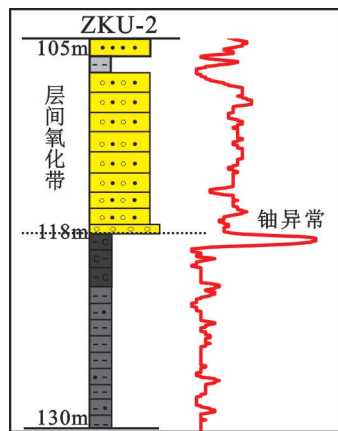


图7 层间氧化带与第二层铀矿化的关系  
Fig.7 Relationship between interlayer oxidation zone and uranium mineralization in the second layer

般、泥质胶结,褐铁矿化、高岭土化后生蚀变明显,为沉积间断的标志。

通过钻探施工4个钻孔,发现1个工业孔和2个矿化孔,初步显示了该区较大的铀成矿潜力。表1数据展示了各钻孔中钍的含量变化不大,而铀含量分布不均,工业孔平米铀含量为1.30 kg/m<sup>2</sup>,见矿深度为117.85 m,品位0.059%,厚度1.1 m,主体含矿岩性炭质泥岩。

研究区共发现矿化以1~2层为主,解释品位变化范围0.0120%~0.0592%,厚度0.20~1.70 m,米百分数0.02~0.06 kg/m<sup>2</sup>,为低品级矿化,矿化顶板埋深

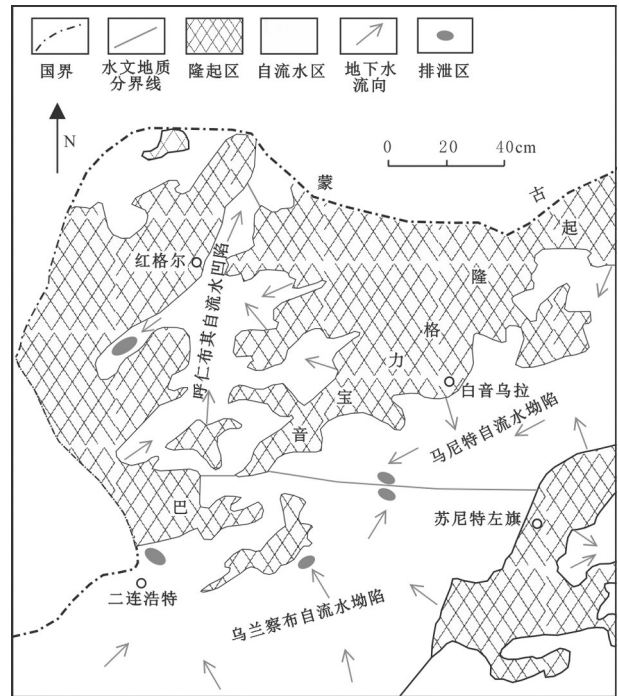


图8 二连盆地中东部水文地质略图(据②修改)  
Fig.8 Hydrogeological map of Erlian basin (modified after reference ②)

81.95~126.80 m,含矿岩性以灰色、灰黑色泥岩、炭质泥岩为主,少量为灰色细砂岩,多含炭屑等还原介质,具有较强的还原能力。铀矿化主要产于下白垩统赛汉组上段灰黑色泥岩、炭质泥岩中。

第一层铀矿化受到区内发育的潜水氧化带的控制。垂向上,铀矿化位于潜水氧化带界面之下的灰黑色泥岩、炭质泥岩中(图5),铀矿化的形态与岩层一致,呈板状。赛汉组地层沉积后,长期出露地表,从蚀源区带来的含铀含氧水(大气降水和地表水)通过赛汉组顶部砂岩层下渗,遇到下部富含有机质的暗色泥岩,发生铀的富集。第二层铀矿化受到区内发育的侧向层间氧化带的控制。铀矿化赋存在层间氧化砂体顶底板泥岩中(如ZK703)(图5)。已有的研究表明,放射性曲线的形态与氧化带的位置存在一定的对应关系,薄层双峰式曲线异常形态指示钻孔位于铀矿体卷头更靠近氧化带的位置(吴兆建等,2016)。

## 5 成矿条件分析

### 5.1 构造条件

二连盆地是在古生代褶皱系的基础上,经燕山

期拉张翘断构造应力场作用而发育起来的以裂陷为主的中新生代沉积盆地。沉积盖层经历了早白垩世断陷湖盆沉积的成盆构造和新近系以后的新构造运动。盆地基底经历了复杂的构造-岩浆演化作用,形成一系列海西期( $\gamma_4^3$ )、燕山早期花岗岩类( $\gamma_5^2$ )及晚侏罗世中酸性火山岩,广泛分布在巴音宝力格、温都尔庙及苏尼特隆起带上(郭宏伟等, 2014),自晚白垩世以来,盆地北部隆起区发生了多期次的相对快速隆升与剥蚀夷平,带动了盆内地层的适度抬升及掀斜。盆地内各次级凹陷受先存基底断裂走向和差异性区域应力场方向控制,随着古太平洋板块向NNW俯冲诱导弧后扩张(Ren et al., 2002; Meng et al., 2003),区内广泛发生了断陷作用,经历了阿尔善期强裂陷阶段及赛汉期断拗转换阶段,各凹陷内部形成反转构造,成为铀矿主要成矿期。各次级凹陷均具有渗入型自流盆地的特点,沿着次级凹陷分布有斜坡带,是砂岩型铀矿形成的有利构造环境。

凹陷内部断裂构造较发育,含铀矿目的层下部腾格尔组有良好的烃源岩,当断裂构造沟通深部油气储层时,强还原气体(如 $\text{CH}_4$ 、 $\text{H}_2\text{S}$ 等)可沿断裂向上迁移,遇到含铀含氧地下水时,形成地球化学还原障,促

使铀还原富集(权建平等, 2007; 金若时等, 2014)。

## 5.2 铀源

铀源主要包括蚀源区原生铀源和目的层及上覆地层的衍生铀源。研究区赛汉期物源主要来自巴音宝力格隆起海西期花岗岩,其铀含量为 $4.13 \times 10^{-6}$ ,钍含量为 $18.0 \times 10^{-6}$ ,铀丢失率为80%~93%(金若时等, 2014)。表明本区花岗岩在后生改造中发生了大量的铀丢失,为研究区后期改造及铀矿化提供了大量的铀源。通过镜下观察发现含矿目的层赛汉组砂岩中花岗岩碎屑含量高(图4h, i)。

研究区含矿主岩主要为赛汉组泥岩、炭质泥岩及细砂岩,根据研究区含矿目的层岩石铀含量的统计分析,灰色砂岩、灰黑色泥岩铀含量 $30 \times 10^{-6}$ ~ $70 \times 10^{-6}$ ,均明显高于同类沉积岩的平均铀含量 $0.45 \times 10^{-6}$ ~ $13.00 \times 10^{-6}$ (Dahlkamp, 1993)。表明研究区赛汉组沉积层自身也是铀次生富集成矿的铀源之一。

## 5.3 岩性-岩相条件

研究区砂岩分选性、渗透性较好,岩层稳定延伸可达几十米。含矿目的层下白垩统赛汉组发育一套扇三角洲-湖泊沉积体系。在扇三角洲前缘部位存在多套连续稳定的砂体,厚5~15 m,岩性以中粗砂岩为主,原生灰色砂体中富含有机质、炭屑、黄铁矿等还原

表1 二连盆地北部某铀矿床赛汉组上段含铀矿地层岩石U和Th含量

Table 1 U content and Th content of uranium-bearing rocks from the upper Saihan Formation in northern Erlian Basin

样号	HU-01	HU-02	HU-03	HU-04	HU-05	HU-06	HU-07	HU-08	HU-09	HU-10	HU-11
岩性	中粗砂岩	炭质泥岩	炭质泥岩	炭质泥岩	炭质泥岩	炭质泥岩	泥岩	泥岩	泥岩	泥岩	炭质泥岩
U/ $10^{-6}$	31	284	454	196	422	1203	223	176	506	461	256
Th/ $10^{-6}$	15.09	21.15	15.4	15.23	11.05	19.92	25.77	25.54	17.59	20.23	16.96
样号	HU-12	HU-13	HU-14	HU-15	HU-16	HU-17	HU-18	HU-19	HU-20	HU-21	HU-22
岩性	泥岩	砂质泥岩	泥岩	泥岩	含砂泥岩	泥岩	粉砂岩	粉砂岩	含砂泥岩	含砂泥岩	含砂泥岩
U/ $10^{-6}$	369	388	424	219	173	1054	344	186	553	443	538
Th/ $10^{-6}$	16.96	21.96	15.49	23.11	21.38	16.9	18.45	17.91	12.3	12.8	13.55
样号	HU-23	HU-24	HU-25	HU-26	HU-27	HU-28	HU-29	HU-30	HU-31	HU-32	HU-33
岩性	含砂泥岩	含砂泥岩	细砂岩	细砂岩	细砂岩	砂质泥岩	砂质泥岩	砂质泥岩	炭质泥岩	泥岩	泥岩
U/ $10^{-6}$	94	267	528	612	232	338	374	104	1	76	101
Th/ $10^{-6}$	17.96	22.3	23.6	16.59	15.05	15.56	13.28	15.53	16.8	22.6	27.34
样号	HU-34	HU-35	HU-36	HU-37	HU-38	HU-39	HU-40	HU-41			
岩性	泥岩	泥岩	泥岩	泥岩	含砂泥岩	砂质泥岩	砂质泥岩	砂质泥岩			
U/ $10^{-6}$	28	57	72	183	117	72	77	51			
Th/ $10^{-6}$	17.8	21.94	23.87	19.56	21.2	18.48	15.34	15.77			

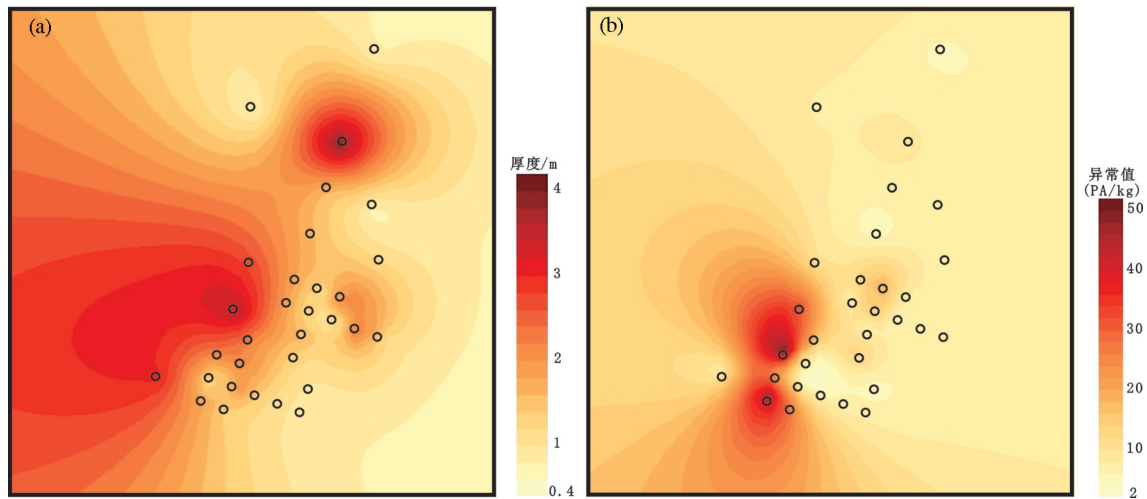


图9 研究区自然伽马异常层特征等值线

a—厚度等值线;b—自然伽马等值线

Fig.9 Contour map of the gamma extremum of the study area

a—Contour map of the gamma extremum thickness; b—Contour map of the gamma extremum

介质,有利于铀的还原富集。砂体下部主要为湖沼沉积体系,岩性为炭质泥岩、褐煤等;砂体上部为水下平原沉积的灰色砂质泥岩;垂向上构成“泥-砂-泥”互层结构,是寻找砂岩型铀矿的有利层位。

在目的层上部有一套古近系厚度不等的红色泥岩覆盖。沉积物颜色依相带分带具有红-黄-灰色变化规律,证实了白垩系下统沉积具有良好的原生地球化学条件。

#### 5.4 气候与地貌条件

研究区的气候、地貌条件有利于砂岩型铀矿的形成。下白垩统赛汉组沉积时古气候温暖湿润,岩石中富含植物碎屑等还原介质(图4g),是砂岩型铀成矿有利的母岩。形成一套陆相红色碎屑岩建造,地貌主要为阶地平原、低山丘陵区,有利于含铀含氧水向盆内运移、富集。

#### 5.5 水文地质条件

研究区晚白垩世—古新世时期,赛汉组含水岩组大面积暴露,地下水渗入作用较为强烈,有利于潜水氧化和层间氧化型铀成矿作用。赛汉组被渐新统泥岩层覆盖后,层间水主要来源于基岩隆起区裂隙水补给,渗入作用大为减弱。所以,晚白垩世—古新世时期是本区砂岩型铀成矿最有利时期。

## 6 找矿方向

在研究区内收集了30个煤田钻孔,发现26个

钻孔存在自然伽马异常显示,构成成片的放射性异常区,自然伽马异常主要分布在下白垩统赛汉组上部的细砂岩、泥岩中,异常值大多为背景值的4倍,异常孔占收集钻孔的86%,有很好的找矿线索。

研究区内自然伽马异常强度范围为4.00~26.00 PA/kg,异常层厚度大部分在2.00~6.00 m(图9a);大于等于7 PA/kg的自然伽马异常层基本在研究区全区都有分布(图9b),经部分施工钻孔样品测试显示,U含量为 $12.3 \times 10^{-6}$ ~ $1203.0 \times 10^{-6}$ ,部分样品含量达到工业品位要求。因此,自然伽马异常高值区可以作为指导研究区下一步找矿的方向。

综上所述,呼仁布其凹陷下白垩统赛汉组的构造、铀源、岩性-岩相、气候与地貌、水文地质条件等均对砂岩型铀矿的成矿十分有利,且已发现一定规模的自然伽马异常,经初步钻探验证,部分见矿孔已经达到工业要求。根据成矿地质背景和成矿有利条件分析,研究区有较好的铀异常层分布,展现了较大的找矿潜力和良好前景。这为二连盆地西北缘隆起区铀矿找矿提供了重要的找矿方向。

## 7 结论

(1)呼仁布其凹陷下白垩系赛汉组扇三角洲体系中砂体渗透性高,还原条件好,分布稳定,有利于砂岩型铀矿的形成。

(2)通过对构造条件、岩性-岩相条件、气候与



地貌条件、水文地质条件等综合分析后发现呼仁布其凹陷下白垩统赛汉组具有良好的砂岩型铀矿成矿条件。

(3)利用煤田钻孔资料进行二次开发找铀矿的新思路,在研究区发现了下白垩统赛汉组中连续分布的放射性异常区。经钻孔验证,证实呼仁布其凹陷铀矿化,显示该区具有良好的找矿前景。

**致谢:**本研究在野外工作、室内研究及成文过程中得到中煤地质工程总公司韩效忠博士、核工业208大队旷文战高级工程师的指导,得益于与吴兆建工程师进行的讨论,审稿专家对文章提出诸多宝贵的修改意见和建议,在此表示由衷的感谢。

## 注释

①张双增,孙挪亚,辛顺,等. 2015. 内蒙古1:5万隆达格苏木等区域地质矿产调查[R]. 北京:中国煤炭地质总局勘查研究总院。

②杨建新,梁齐端,何大兔,等. 2011. 内蒙古二连盆地中东部地区地浸砂岩型铀矿资源调查评价[R]. 内蒙古:核工业二〇八大队。

## References

- Cui Yongqian, Liu Xiheng, Sun Zhaohui, Yao Huan, Han Chunyuan. 2011. The Deep physical geographic characteristics and Neopaleozoic geological structural exploration of Erlian basin, Inner Mongolia, China[J]. Geological Bulletin of China, 30(2/3): 235–242 (in Chinese with English abstract).
- Chen Gong, Deng Jinggui, Zhang Kefang, Xu Gang. 1997. Evaluation on Uranium Mineralizing Geological Condition and Prospect in Erlian Basin and Its Adjacent Area[J]. China Nuclear Science and Technology Report, (00):970– 981 (in Chinese with English abstract).
- Dahlkamp F J. 1993 Uranium Deposits[M]. Berlin: Springer-Verlag.
- Guo Hongwei. 2014. Studies on Characteristics and Regularity of Metallogenesis of Bayanwula Uranium Deposits, Inner Mongolia[D]. China University of Geosciences.
- Jiao Yangquan, Wu Liqun, Peng Yunbiao, Rong Hui, Ji Dongmin, Miao Aisheng, Li Hongliang. 2015. Sedimentary-tectonic setting of the deposition-type uranium deposits forming in the Paleo-Asian tectonic domain, North China[J]. Earth Science Frontiers, 22 (1): 189–205 (in Chinese with English abstract).
- Jiao Guihao. 2003. Tectonic evolution of Erlian rift and Oil and gas[M]. Petroleum Industry Press.
- Jin Ruoshi, Qin Zhi'an. 2013. Study on the exploration sequence of sandstone-hosted uranium deposits in North China[J]. Geological Survey and Research, 36(2): 82– 83 (in Chinese with English abstract).
- Jin Ruoshi, Huang Pengtao, Miao Peisen, Feng Xiaoxi, Tang Chao, Li Guangyao. 2014. Metallogenic conditions and prospecting targeting of the Jurassic sand type uranium deposits on the eastern margin of Junggar basin[J]. Geological Bulletin of China, 33(2/3): 359– 369 (in Chinese with English abstract).
- Jin Ruoshi, Zhang Chengjiang, Feng Xiaoxi, Zhu Qiang, Li Guangyao. 2014b. The influence of fluid mixing on the mineralization of sandstone type uranium deposits[J]. Geological Bulletin of China, 33(2/3): 354–358 (in Chinese with English abstract).
- Kuang Wenzhan, Cai Tong, Yan Zhaobing. 2014. Characteristic in cretaceous and types of uranium mineralization in Ulancabu depression, Erlian basin, Inner Mongolia[J]. Journal of East China Institute of Technology ( Natural Science) , 37( 2) : 111– 121 (in Chinese with English abstract).
- Li Guoxin, Xun Zexuan, Yao Yifeng, Huang Dayou. 2003. Analysis on metallogenic conditions and prospect of sandstone-type uranium deposits in Meso-Cenozoic basin, Bayinbaolige uplifted zone[J]. Uranium Geology, 19(3):148– 153 (in Chinese with English abstract).
- Li Hongjun, Shen Kefeng, Nie Fengjun, Kuang Wenzhan, He Datu. 2012. Sedimentary evolution in meso-cenozoic and uranium mineralization of erlian basin[J]. Journal of East China Institute of Technology ( Natural Science), 35( 4) : 301–308 (in Chinese with English abstract).
- Li Xianping, Zhang Shaohua, Li Linbo, Yang Minghui, Lu Yonghe, Zhou Duo, Qu Xiaoyan. 2015. Coupling of faulted sags to basement in Early Cretaceous Erlian Basin[J]. Chinese Journal of Geology, 50(1):88–99 (in Chinese with English abstract).
- Lu Chao, Peng Yunbiao, Liu Xinyang, Jiao Yangquan, Yang Jianxin, Chen Fazheng, Shen Kefeng Li Ronglin. 2013. Sedimentary backgrounds of sandstone-type uranium deposits in western Manite depression of Erlian basin[J]. Uranium Geology, 29 (6): 336–343 (in Chinese with English abstract).
- Meng Qingren. What drove late Mesozoic extension of the northern China-Mongolia tract?[J]. Tectonophysics, 2003, 369(3–4):155–174.
- Nie Fengjun. 2010. Sandstone-type uranium deposits in the ancient channel of Erlian Basin[M]. Geological Publishing House.
- Nie Fengjun, Li Mangen, Yan Zhaobing, Zhang Chengyong, Jiang Meizhu, Yang Jianxin, Kuang Wenzhan, Kang Shihu, Shen Kefeng. 2015. Multiple type uranium deposit assemblage and uranium exploration in Erlian rift Basin, Inner Mongolia [J]. Mineral Deposits, 34(4):711– 729 (in Chinese with English abstract).
- Nie Fengjun, Li Mangen, Yan Zhaobing, Yang Jianxin, Kang Shihu, Shen Kefeng. 2015. Segmentation of the target layer Saihan Formation and sandstone-type uranium mineralization in Erlian Basin[J]. Geological Bulletin of China, 34(10):1952– 1963 (in Chinese with English abstract).
- Quan Jianping, Pan Tailiang, Xu Gaozhong, Li Weihong, Chen

- Hongbin. 2007. Effects of hydrocarbon migration on sandstone-type uranium mineralization in basins of northern China[J]. *Geology in China*, 34(3): 470-477 (in Chinese with English abstract).
- Ren Jianye, Tamaki K, Li Sitian. Late Mesozoic and Cenozoic rifting and its dynamic setting in Eastern China and adjacent areas[J]. *Tectonophysics*, 2002, 344:175-205.
- Wei Sanyuan, Qing Mingkuan, Li Yuexiang, He Zhongbo, Chen Anping Shen Kefeng, Cao Jianying. 2006. Tectono-sedimentary evolution of Erlian basin since Late Mesozoic and sandstone-hosted uranium metallogenesis[J]. *Uranium Geology*, 22(2):76-82 (in Chinese with English abstract).
- Wu Zhaojian, Han Xiaozhong. 2016. A new uranium exploring technical system for secondary development of coalfield data and its prospecting significance: A case study of the ZS coalfield, Erlian basin[J]. *Geology in China*, 43(2): 617-627 (in Chinese with English abstract).
- Yu Haifei. 2010. Mesozoic and Cenozoic Sedimentary Tectonic Evolution of Erlian Basin and sandstone-type uranium mineralization prospect [J]. *Journal of henan polytechnic university (natural science)*, 2010(1):6-10(in Chinese with no English abstract).
- Zhang Jindai, Xu Gaozhong, Lin Jinrong, Peng Yunbiao, Wang Guo. 2010. The implication of six kinds of new sandstone-type uranium deposits to uranium resources potential in North China[J]. *Geology in China*, 37(5): 1434-1449 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Xianzheng, Jin Fengming, Qi Jiafu, Wang Quan, Yang Minghui, Shi Yuanpeng, Dong Xiongying. 2015. The structural types and petroleum geo- Logical meaning of Early Cretaceous complex faulted sag In Erlian Basin[J]. *The Natural Gas Geo- Science*, 26(7): 1289-1298 (in Chinese with English abstract).
- 合分析[J]. *地学前缘*, 22(1):189-205.
- 金若时, 黄澎涛, 苗培森, 冯晓曦, 汤超, 李光耀. 2014. 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*, 33(z1): 359-369.
- 金若时, 覃志安. 2013. 中国北方含煤盆地砂岩型铀矿找矿模式层序研究[J]. *地质调查与研究*, (2):81-84.
- 金若时, 张成江, 冯晓曦, 汤超, 朱强, 李光耀. 2014. 流体混合对砂岩型铀矿成矿作用的影响[J]. *地质通报*, 33(2):354-358.
- 旷文战, 蔡彤, 严兆彬. 2014. 内蒙古二连盆地乌兰察布坳陷白垩系特征及铀成矿类型[J]. *东华理工大学学报:自然科学版*, 37(2): 111-121.
- 李国新, 孙泽轩, 姚毅锋, 黄大友. 2003. 巴音宝力格隆起带中生代盆地砂岩型铀矿成矿地质条件及远景分析[J]. *铀矿地质*, 19(3): 148-153.
- 李洪军, 申科峰, 聂逢君, 旷文站, 何大兔. 2012. 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)*, 35(4): 301-308.
- 李先平, 张少华, 李林波, 杨明慧, 卢永合, 周多, 屈晓艳. 2015. 二连盆地早白垩世断陷及基底构造的耦合性[J]. *地质科学*, 50(1):88-99.
- 鲁超, 彭云彪, 刘鑫扬, 焦养泉, 杨建新 陈法正 申科峰 李荣林. 2013. 二连盆地马尼特坳陷西部砂岩型铀矿成矿的沉积学背景[J]. *铀矿地质*, 29(6):336-343.
- 聂逢君. 二连盆地古河道砂岩型铀矿[M]. 地质出版社, 2010.
- 聂逢君, 李满根, 邓居智, 严兆彬, 张成勇, 姜美珠, 杨建新, 旷文战, 康世虎, 申科峰. 2015. 内蒙古二连裂谷盆地“同盆多类型”铀矿床组合与找矿方向[J]. *矿床地质*, 34(4):711-729.
- 聂逢君, 李满根, 严兆彬, 夏菲, 张成勇, 杨建新, 康世虎, 申科峰. 2015. 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*, 34(10):1952-1963.
- 权建平, 樊太亮, 徐高中, 李卫红, 陈宏斌. 2007. 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*, 34(3): 470-477.
- 卫三元, 秦明宽, 李月湘, 何中波, 陈安平, 申科峰, 曹建英. 2006. 二连盆地晚中生代以来构造沉积演化与铀成矿作用[J]. *铀矿地质*, 22(2):76-82.
- 吴兆剑, 韩效忠. 2016. 煤田资料的铀矿二次开发技术及其找矿意义——以二连盆地ZS煤田铀矿点的发现为例[J]. *中国地质*, 43(2): 617-627.
- 于海飞. 二连盆地中生代沉积构造演化与砂岩型铀矿前景分析[J]. *河南理工大学学报自然科学版*, 2010(1):6-10.
- 赵贤正, 金凤鸣, 漆家福, 王权, 杨明慧, 史原鹏, 董雄英. 2015. 二连盆地早白垩世复式断陷构造类型及其石油地质意义[J]. *天然气地球科学*, 26(7):1289-1298.
- 张金带, 徐高中, 林锦荣, 彭云彪, 王果. 2010. 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*, 37(5):1434-1449.

## 附中文参考文献

- 陈功, 邓金贵, 张克芳, 徐刚, 罗长本, 牟长林, 徐德津. 1997. 二连盆地及邻区铀成矿地质条件及成矿远景评价[J]. *中国核科技报告*, (00):970-981.
- 崔永谦, 刘喜恒, 孙朝辉, 姚欢, 韩春元. 2011. 内蒙古二连盆地深层地球物理特征和上古生界的地质结构[J]. *地质通报*, 30(2):235-242.
- 郭宏伟. 内蒙古巴彦乌拉铀矿床成矿特征及成矿规律研究[D]. 中国地质大学(北京), 2014.
- 焦贵浩. 二连裂谷构造演化与油气[M]. 石油工业出版社, 2003.
- 焦养泉, 吴立群, 彭云彪, 荣辉, 季东民, 苗爱生, 里宏亮. 2015. 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