

doi: 10.12029/gc20220213

李鹏,刘波,叶茂,刘剑剑,郝朋,熊攀,张鹏飞. 2022. 巴音戈壁盆地中南部中生代构造-沉积演化对铀成矿的制约及找矿预测[J]. 中国地质, 49(2): 542-557.

Li Peng, Liu Bo, Ye Mao, Liu Jianjian, Hao Peng, Xiong Pan, Zhang Pengfei. 2022. Constraints of Mesozoic-Cenozoic tectonic-sedimentary evolution on uranium mineralization and prospecting prediction in the Central and Southern Bayin Gobi Basin[J]. *Geology in China*, 49(2): 542-557 (in Chinese with English abstract).

巴音戈壁盆地中南部中生代构造-沉积演化对铀成矿的制约及找矿预测

李鹏¹, 刘波^{1,2}, 叶茂¹, 刘剑剑¹, 郝朋¹, 熊攀¹, 张鹏飞^{1,2}

(1. 核工业二〇八大队, 内蒙古包头 014010; 2. 成都理工大学沉积地质研究院, 四川成都 610059)

摘要:【研究目的】巴音戈壁盆地中生代主要经历了早白垩世断陷、断拗转折以及晚白垩世拗陷发育阶段, 多期构造改造对铀成矿的制约尚不清晰, 影响下一步的找矿预测工作。【研究方法】本文选择盆地中南部凹陷带为研究区, 综合以往成果认识与地质剖面对比研究, 系统研究了凹陷构造样式、构造演化对沉积充填的影响。【研究结果】在早白垩世中晚期、晚白垩世晚期-古近纪以及新近纪, 盆地内构造-沉积演化一方面利于形成剥蚀天窗, 进而发育大规模层间氧化以及多期次的后生叠加作用, 控制着成矿流体以及层间氧化带由凹陷边缘向凹陷中心发育, 在氧化还原障附近形成铀矿化; 另一方面致使盆地南部地下水由径流-弱径流转为滞水, 利于水岩作用下成矿流体中铀元素分解、析出、富集成矿。【结论】巴音戈壁盆地中南部铀成矿在有利的构造背景下, 主要受沉积相控制与层间氧化带制约。

关键词: 巴音戈壁盆地; 构造-沉积演化; 剥蚀天窗; 成矿模式; 矿产勘查工程

创新点: 在定性开展扇三角洲预测的基础上, 构建了断陷湖盆背景下的扇三角洲成矿模式, 建立了砂岩型与泥岩型矿体成因模型, 预测了周边铀成矿有利地段。

中图分类号: P619.14 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2022)02-0542-16

Constraints of Mesozoic-Cenozoic tectonic-sedimentary evolution on uranium mineralization and prospecting prediction in the central and southern Bayin Gobi Basin

LI Peng¹, LIU Bo^{1,2}, YE Mao¹, LIU Jianjian¹, HAO Peng¹, XIONG Pan¹, ZHANG Pengfei^{1,2}

(1. No. 208 Geological Party, CNNC, Baotou of Inner Mongolia, 014010, China; 2. Institute of sedimentary geology Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: This paper is the result of mineral exploration engineering.

[Objective] The Mesozoic and Cenozoic Bayin Gobi basin mainly experienced Early Cretaceous fault depression, fault depression

收稿日期: 2019-07-21; 改回日期: 2022-03-09

基金项目: 中国核工业地质局项目“内蒙古巴音戈壁盆地及周缘铀矿资源调查评价与勘查”(202203)资助。

作者简介: 李鹏, 男, 1986年生, 硕士, 高级工程师, 从事铀矿勘查与调查评价工作; E-mail: 723467337@qq.com。

通讯作者: 刘波, 男, 1984年生, 博士, 高级工程师, 主要从事铀矿勘查及铀矿床学研究; E-mail: 304110991@qq.com。

transition and Late Cretaceous depression development stages. The restriction of multi-stage structural transformation on uranium mineralization is not clear, which affects the next prospecting and prediction work. **[Methods]** In this paper, the depression in the central and southern part of the basin is selected as the research area. Based on the previous achievements and the comparative study of geological sections, the influence of depression structural style and structural evolution on sedimentary filling is systematically studied. **[Results]** During the Early Cretaceous, Middle and Late (109.7 ± 1.5) Ma - (115.5 ± 1.5) Ma, Late Cretaceous Paleogene (45.4 ± 0.6) Ma - (70.9 ± 1.0) Ma and Neogene (12.3 ± 0.2) Ma - (2.5 ± 0.0) Ma, on the one hand, the tectonic sedimentary evolution in the basin is conducive to the formation of denudation window, and then the development of large-scale interlayer oxidation and multi-stage epigenetic superposition which controls the development of ore-forming fluid and interlayer oxidation zone from the edge of the depression to the center of the depression, and forms uranium mineralization near the redox barrier; On the other hand, the groundwater in the south of the basin changes from runoff weak runoff to stagnant water, which is conducive to the decomposition, precipitation and enrichment of uranium in the ore-forming fluid under water-rock process. **[Conclusions]** Under the favorable tectonic background, uranium mineralization in the central and southern Bayingobi basin is mainly controlled by sedimentary facies and interlayer oxidation zone.

Key word: Bayin Gobi Basin; tectonic-sedimentary evolution; denudation windows; metallogenic model; mineral exploration engineering

Highlights: Based on the qualitative prediction of fan delta, the metallogenic model of fan delta under the background of faulted lake basin is constructed, the genetic models of sandstone type and mudstone type ore bodies are established, and the favorable area for uranium mineralization in the surrounding area is predicted.

About the first author: LI Peng, male, born in 1986, master, senior engineer, engaged in uranium exploration, investigation and evaluation; E-mail: 723467337@qq.com.

About the corresponding author: LIU Bo, male, born in 1984, doctor, senior engineer, mainly engaged in uranium exploration and uranium deposit study; E-mail: 304110991@qq.com.

Fund support: Supported by the project of China Nuclear Industry Geological Bureau (No.202203).

1 引言

巴音戈壁盆地为叠置在克拉通基底与晚古生代褶皱基底接合部位上的伸展断拗复合型盆地(罗毅等, 2009; 张成勇等, 2015), 盆地中南部是古生代滨浅海相基础上发育的盆地建造带, 其拗陷的基底为多期富铀花岗岩活化的古克拉通基底, 是成熟度高的富铀基底, 是铀成矿的有利区。近年来, 核工业二〇八大队在盆地中南部开展了一系列的铀矿调查评价与勘查工作, 取得突出的找矿成果(申科峰等, 2014; 李鹏等, 2017; 彭云彪等, 2018b)。

根据水成铀矿理论, 砂岩型铀矿是一种产在近地表砂体中的外生铀矿床, 是活化的六价铀元素沿含矿含水层运移, 遇有机碳、黄铁矿或油气等还原剂, 在过渡带被还原成四价铀元素富集沉淀成矿(陈路路等, 2014)。盆地(拗陷)内能否铀成矿, 取决于其所在地区的大地构造背景及构造-沉积演化特征, 并通过影响区域构造、沉积演化、铀(物)源、水动力、氧化还原蚀变等成矿地质条件来控制砂岩型铀矿床的形成。因此, 通过研究巴音戈壁盆地中

南部构造-沉积演化及其对铀成矿的关系, 对盆地内继续寻找铀矿床具有一定的积极作用。

2 地质背景

2.1 大地构造背景

巴音戈壁盆地位于塔里木板块、哈萨克斯坦板块、西伯利亚板块和华北板块的结合部位, 是巴尔喀什-天山-兴安岭晚古生代增生碰撞带。以恩格尔乌苏-巴音查干NEE向晚古生代陆-陆碰撞板块缝合线为界, 巴音戈壁盆地中南部处于华北板块北缘阴山隆起带与宝音图-锡林浩特火山型被动陆缘的结合带。其北界为宗乃山-沙拉扎山隆起带, 南界为巴丹吉林断裂(图1), 属弧间盆地。

根据前人的划分方案, 盆地中南部属于中构造域, 为西部挤压与东部拉张环境的结合部, 构造应力比较复杂(Darby et al., 2005; 陈戴生等, 2011; Shi et al., 2015; 苗培森等, 2017; 刘波等, 2020; Jin et al., 2020; Yu et al., 2021)。区域上自中生代以来先后经历了印支期、燕山期、喜山期共7次构造运动, 导致其上覆盖层中形成隆起和拗陷(凹陷)相间出现的局面(表1)。

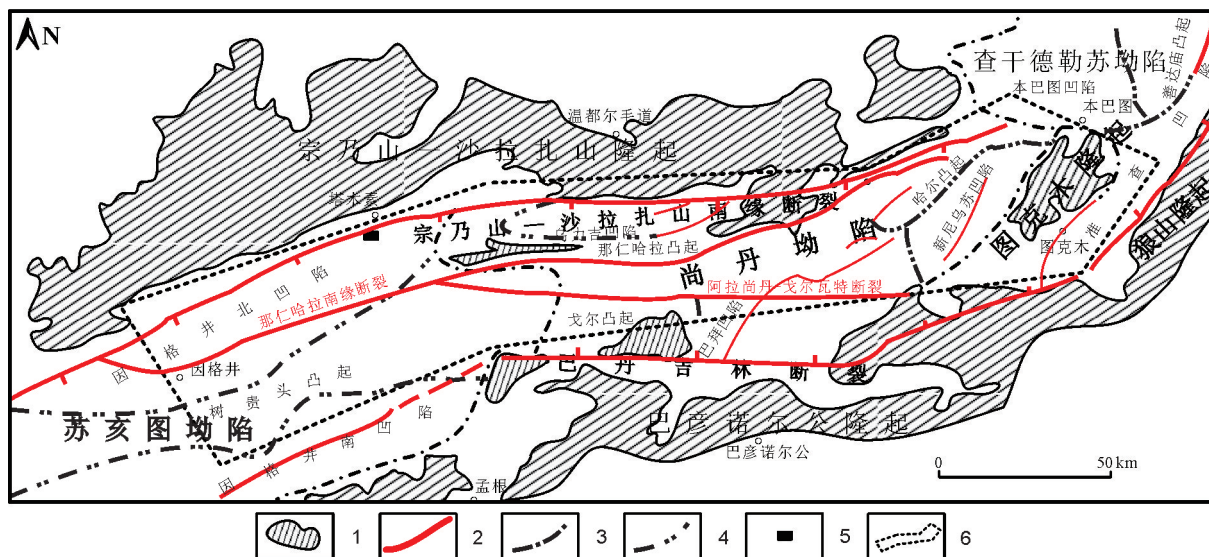


图1 巴音戈壁盆地中南部构造分区示意图

1—蚀源区;2—断裂;3—一级构造单元界线;4—二级构造单元界线;5—矿床;6—研究区范围

Fig.1 Sketch map of tectonic zoning in the south-central part of the Bayin Gobi Basin

1-Provenance area;2-Fault;3-Boundary of primary structural unit;4-Boundary of secondary structural unit;5-Deposit;6-Study area

2.2 地质概况

巴音戈壁盆地中南部基底地层主要为太古界乌拉山群深变质岩,古元古界阿拉善群中深变质岩、寒武系—泥盆系碎屑岩、碳酸盐岩及浅变质岩,石炭系中酸性火山岩、碎屑岩,二叠系碎屑岩、火山岩、碳酸盐岩等组成(张成勇等,2015;刘波等,2020)。盖层主要为中生界,主要为侏罗系、下白垩统巴音戈壁组、上白垩统乌兰苏海组,局部见下白垩统苏红图组,其中巴音戈壁组上段为盆地内主要的找矿目的层(何中波等,2010;丁叶等,2012;肖国贤等,2017;李鹏等,2017;彭云彪等,2018b;刘波等,2020;Liu et al.,2021a)。盆地内岩浆岩主要发育于元古宙、古生代和显生宙,主要分布于宗乃山—沙拉扎山、狼山—巴彦诺尔公地区,主要为花岗岩、花岗闪长岩、花岗闪长玢岩、黑云闪长岩、石英闪长

玢岩等(史兴俊等,2015),以花岗岩类最为发育。断裂主要有宗乃山—沙拉扎山南缘断裂和巴丹吉林断裂,基本控制了盆地中南部拗陷带的发育。

3 构造活动对目的层的制约

3.1 构造样式

巴音戈壁盆地中南部拗陷的构造样式主要为双断型、单断型与复合型(刘波等,2020)。从拗陷形态及其演化继承性分析,具有两种类型,表现为叠合型和迁移型(陈启林等,2005;彭云彪等,2018a,2018b)。不同的拗陷形态具有不同的构造样式(卫三元等,2006),不同构造样式控制了不同的沉积充填类型(图2),同时控制了拗陷后期构造反转、流体运移和铀矿化的分布等(刘波等,2016,2017a,2017b,2018,2020)。

表1 巴音戈壁盆地中南部主要拗陷特征一览

Table 1 Characteristic list of main depressions in the central and southern Bayin Gobi Basin

构造单元名称	面积/km ²	深度/m	铀矿化层位	成矿类型	备注	
苏亥图拗陷	因格井北凹陷	7100	3000	K ₁ b ²	层间氧化型-泥岩型	塔木素矿床
	因格井南凹陷	3000	3000	/	/	红色岩系,目的层埋深大
尚丹拗陷	新尼乌苏凹陷	1600	4000	K ₁ b ²	层间氧化型-泥岩型	本巴图铀矿产地
	巴拜凹陷	2100	3000	/	/	/
	乌力吉凹陷	1000	4000	K ₁ b ²	层间氧化型	地表异常
查干德勒苏拗陷	准查凹陷	3300	2500	/	/	/

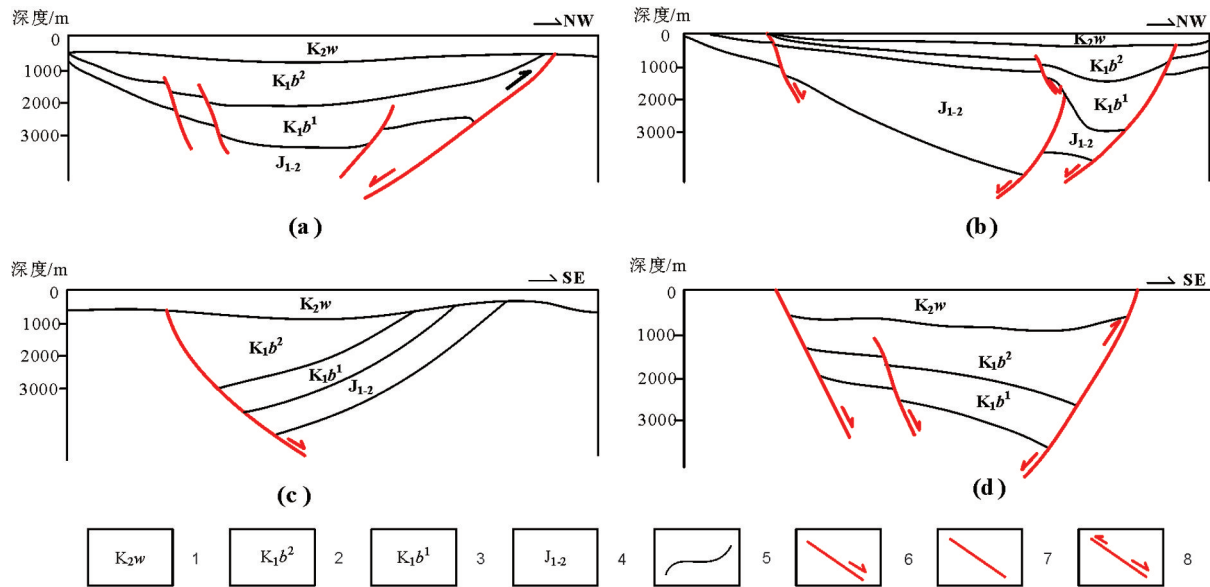


图2 因格井—尚丹拗陷各凹陷构造样式

a—单断断槽式;b—单断迁移型;c—单断叠置型;d—双断地堑式;1—上白垩统乌兰苏海组;2—下白垩统巴音戈壁组上段;3—下白垩统巴音戈壁组下段;4—中下侏罗统;5—地层界线;6—正断层;7—性质不明断层;8—反转断层

Fig.2 Structural styles of sags in Inger-Shangdan Depression

a—Single and slot;b—Single fault migration;c—Single fault superimposed;d—Double break graben;1—Ulansuhai Formation of Upper Cretaceous;2—Upper Member of Bayin Gobi Formation of Lower Cretaceous;3— Lower Part of Bayin Gobi Formation of Lower Cretaceous;4—Middle-Lower Jurassic;5—Stratigraphic boundary;6—Normal fault; 7—Unidentified fault; 8—Inversion fault

单断箕状凹陷在盆地中南部发育规模最广,如因格井凹陷、乌力吉凹陷等。这种凹陷易于在断陷端发育冲积扇—扇三角洲沉积,远离断陷端多为湖泊沉积,扇三角洲平原分流河道和扇三角洲前缘多发育有利砂体,利于成矿流体运移及铀成矿,如塔木素铀矿床砂岩型铀矿体即赋存于因格井凹陷北部扇三角洲砂体中(李鹏等,2017;彭云彪等,2018b;刘波等,2020)。复合型凹陷在盆地中南部局部发育,如本巴图矿产地,赋存于单断箕状凹陷的复合部位。该部位因差异性抬升易于遭受剥蚀,继而形成大型剥蚀窗口,而剥蚀窗口有利于后生氧化发育,进而形成铀矿化。

3.2 构造演化

3.1.1 侏罗纪构造演化

早中侏罗世,受燕山运动影响,盆地中南部开始局部裂陷,裂陷主要受北东向断裂控制,主要呈箕状和不对称地堑。在晚侏罗世,盆地整体抬升剥蚀,地层剥蚀殆尽,大部分残存于盆地中南部的沉降中心,少量在拗陷边缘局部呈残留体形式存在(罗毅等,2009)。

3.1.2 白垩纪构造演化

早白垩世巴音戈壁期为强烈断陷期,主要发育了白垩统巴音戈壁组,在拗陷带内具有广泛连通的特征,古构造地貌表现为北高南低,东高西低。在断陷发育扩张的早期,首先沉积了巴音戈壁组下段冲积扇砂砾岩层。巴音戈壁组上段早期湖泊相细粒沉积物不断向盆地外侧超覆沉积,反映出断陷不断扩张。随着断陷继续发育,巴音戈壁组上段沉积物供给 < 拗陷的可容纳空间,发育扇三角洲—湖沼沉积。这一时期在三角洲平原分流河道和三角洲前缘,既发育了有利的铀储层砂体,又在河道分流间湾沉积了暗色泥岩、粉砂质泥岩,构成了有利于地浸砂岩型铀矿形成的“泥—砂—泥”储层结构,成为本区砂岩型铀矿的主要找矿目的层。此后,盆地中南部差异性隆升,大部分地区沉积滨浅湖与半深湖亚相细碎屑物,表现为退积型沉积特点。

在苏红图期,延续早白垩世巴音戈壁期北高南低和东高西低的基础上,银根地区发育为沉降沉积中心,发育了一定厚度的苏红图组,而其他大部分地区诸如塔木素、乌力吉地区依旧缓慢隆升,遭受剥蚀。

在早白垩世苏红图沉积后,银根地区抬升遭受剥蚀,在原有古构造地貌基础上,表现为中央局部隆升,局部遭受剥蚀(He et al.,2015)。

早白垩世晚期银根期,盆地中南部受滨西太平

洋俯冲远程影响(Shi et al.,2014; Zhang et al.,2014; Liu et al., 2019),整体抬升强烈,普遍缺失银根组(图3)。古构造地貌特征为北东高南西低的特点。

晚白垩世乌兰苏海期,受古亚洲板块俯冲影

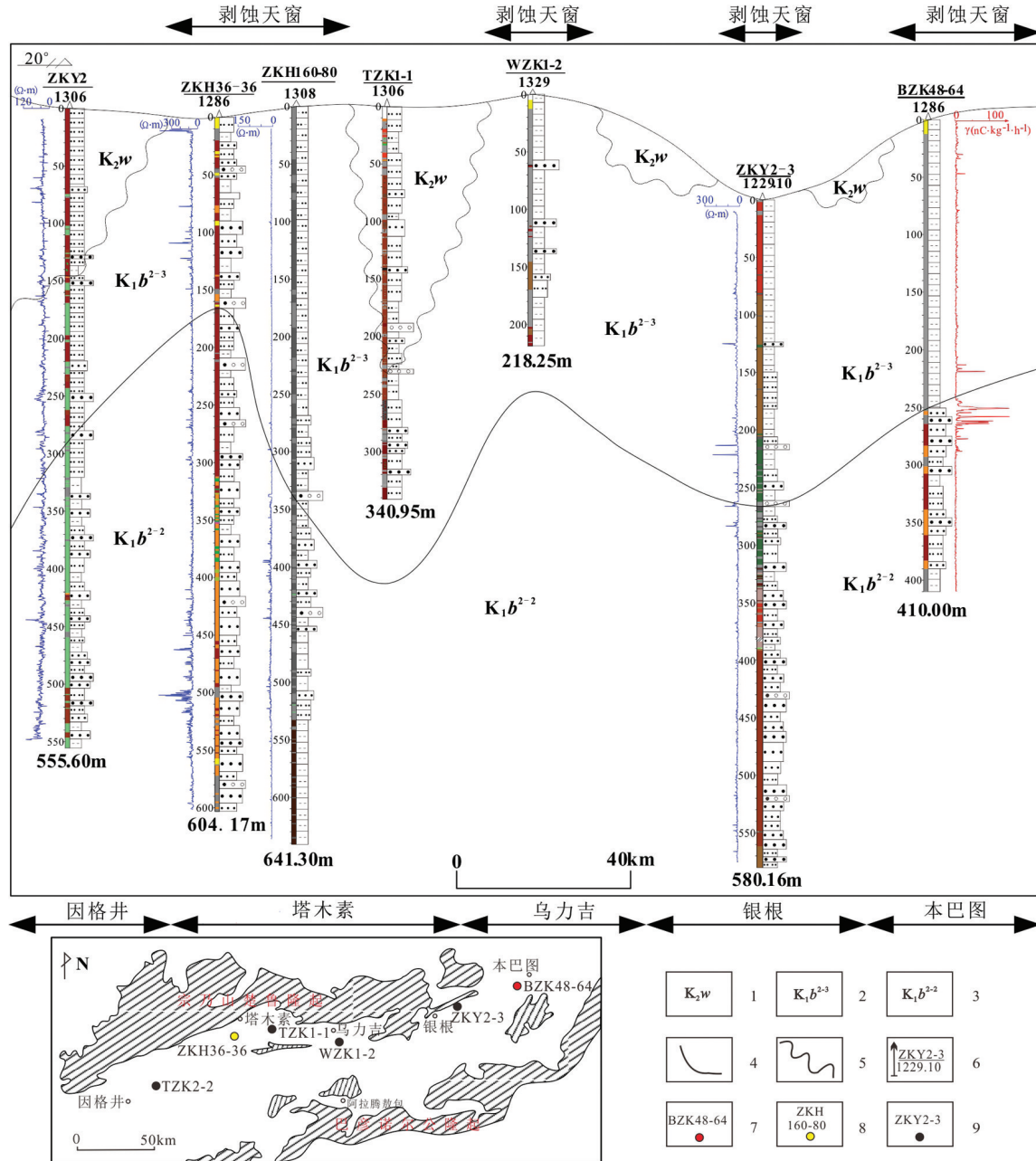


图3 巴音戈壁盆地中南部白垩纪地层沉积与剥蚀天窗示意图

1—乌兰苏海组;2—巴音戈壁组上段三岩段;3—巴音戈壁组上段二岩段;4—地质界线;5—角度不整合界线;6—钻孔孔号及标高(m);7—工业矿孔;8—矿化孔;9—无矿孔

Fig.3 Schematic diagram of Cretaceous sedimentation and denudation windows in the central and southern Bayin Gobi Basin

1—Ulansuhai Formation; 2—Third rock section in the Upper Member of Bayin Gobi Formation; 3—Second rock section in the Upper Member of Bayin Gobi Formation; 4—Geological boundary; 5—Angular unconformity boundary; 6—Borehole number and elevation (m); 7—Industrial ore hole; 8—Mineralization hole; 9—Non ore Hole

响,盆地中南部受北西-南东应力作用,整体从北西向南东阶梯式抬升(刘春燕等,2006;Feng et al.,2017;张建新等,2018),在局部表现为伸展作用,在因格井坳陷、尚丹坳陷的南部,乌兰苏海组坳陷内沉积厚度较大;在宗乃山-沙拉扎山隆起带边缘表现为缺失乌兰苏海组或厚度较小(图3),此时古构造地貌表现为北西高-南东低。

3.1.3 古近纪以来构造演化

古近纪以来,受印度板块俯冲影响,盆地中南部受南西-北东应力作用影响,使得老构造重新活动和北东向断裂的新生(Tapponnier et al.,2001;施炜等,2013;Cui et al.,2018;赵衡等,2019a,2019b);由南向北发育阶梯式抬升,导致在相邻的雅不赖盆地缺失白垩系,盆地内整体缺失古近系,近于直接出露厚层的乌兰苏海组(图3)。而盆地中南部乌兰苏海组同样遭受抬升剥蚀,表现为厚度较薄或缺失。该时期地貌表现为南高北低,西高东低的特点,垂直高差300~500 m。

3.3 构造对沉积充填的影响

巴音戈壁组在上、下段沉积过程中,其沉积相、沉积体系出现了明显的变化,下段沉积期间,显示相对单一的以重力流沉积为主体的冲积扇沉积和扇三角洲沉积,上段沉积时则演变为相对复杂的以重力流和牵引流沉积并重的多种沉积体系所构成的沉积格局,特别是扇三角洲沉积体系的广泛发育,为巴音戈壁盆地中南部砂岩铀矿的形成提供了最基本的砂体条件。这种沉积体系的演变虽然直接与沉积环境的变化有关,但空间上有规律分布则明显与构造活动有关(丁叶等,2012;陈路路等,2014;彭云彪等,2018a,2018b)。

在巴音戈壁组沉积时,各凹陷虽构造样式不同(因格井凹陷为双断型、新尼乌苏凹陷为单断箕状),但在北东向控盆及控坳断裂控制下,在陡坡快速接受碎屑物沉积。结合气候干旱,流水作用不发育,决定了巴音戈壁组下段在盆地(坳陷)的南北两侧发育冲积扇沉积体系,以及局部地段的扇三角洲沉积体系。至巴音戈壁组上段沉积时,构造沉降作用进一步加剧,同时,气候环境明显改变,流水作用显著增强,湖盆发生快速扩张,除某些地段沉积仍显示陡坡特点形成冲积扇沉积体系与扇三角洲沉积体系外,在其他地段特别是北东向构造的闭合

端,由于河流的发育,成为碎屑补给的主要地段,并使沉积坡降进一步降低,在构造交汇处形成由平原亚相逐步入湖的扇三角洲沉积体系(刘波等,2020;Liu et al.,2021b)。

后期的构造反转,差异的块断升降导致原来形成的沉积格局发生改变。反转断裂以逆冲压性为主要构造性质,构造方向呈北东向,由若干条相互平行的断裂带组成。由于断裂构造的反转,使原有沉积相带在空间上的有序规律发生了变化,即由冲积扇-扇三角洲-湖相组合递变的沉积相带或由冲积扇-辫状河-辫状三角洲-湖相组合递变的沉积相带在空间上出现了错位或缺失,同时也使巴音戈壁组上、下段沉积地层在空间叠置关系上出现了错断和突变(何中波等,2010;张成勇等,2015;刘波等,2020)(图4)。

4 构造-沉积演化对铀成矿的制约

4.1 构造-沉积演化对成矿流体的影响

巴音戈壁盆地中南部地下水的水动力方向和状态的改变,主要受构造隆升或掀斜构造的影响,而地下水的水动力条件改变,会使铀成矿作用产生变化。巴音戈壁盆地中南部在早白垩世巴音戈壁组上段沉积期,地势比较开阔,巴音戈壁组上段地层呈水平沉积;巴音戈壁组沉积后,巴音戈壁盆地中南部受古亚洲造山带和滨西太平洋的双向挤压,北部宗乃山-沙拉扎山隆起抬升明显,使得下白垩统巴音戈壁组上段抬升剥蚀,形成早白垩世巴音戈壁组一晚白垩世长期的沉积间断,形成大型的剥蚀窗口。巴音戈壁盆地中南部内的含铀含氧水顺剥蚀窗口向盆地内运移,在巴音戈壁组上段的“泥-砂-泥”储层结构的约束下,与砂体内本身的有机质、还原(流)性介质发生作用,形成铀矿体(图5)。在晚白垩世乌兰苏海期,巴音戈壁盆地中南部进入坳陷期,在坳陷(凹陷)内沉积了乌兰苏海组,形成了区域盖层。在古近纪,受喜山运动的影响,巴音戈壁盆地中南部由南西向北东发生掀斜式抬升,巴音戈壁盆地中南部地层整个抬升翘起,巴音戈壁组形成微向斜,含铀含氧水继续呈“C”型或者“U”型沿着剥蚀窗口向盆地内运移。在新近纪,受喜山运动影响,巴音戈壁盆地中南部受到由南西向北东掀斜的整体剧烈抬升,使得古近系、上白垩统在南部遭

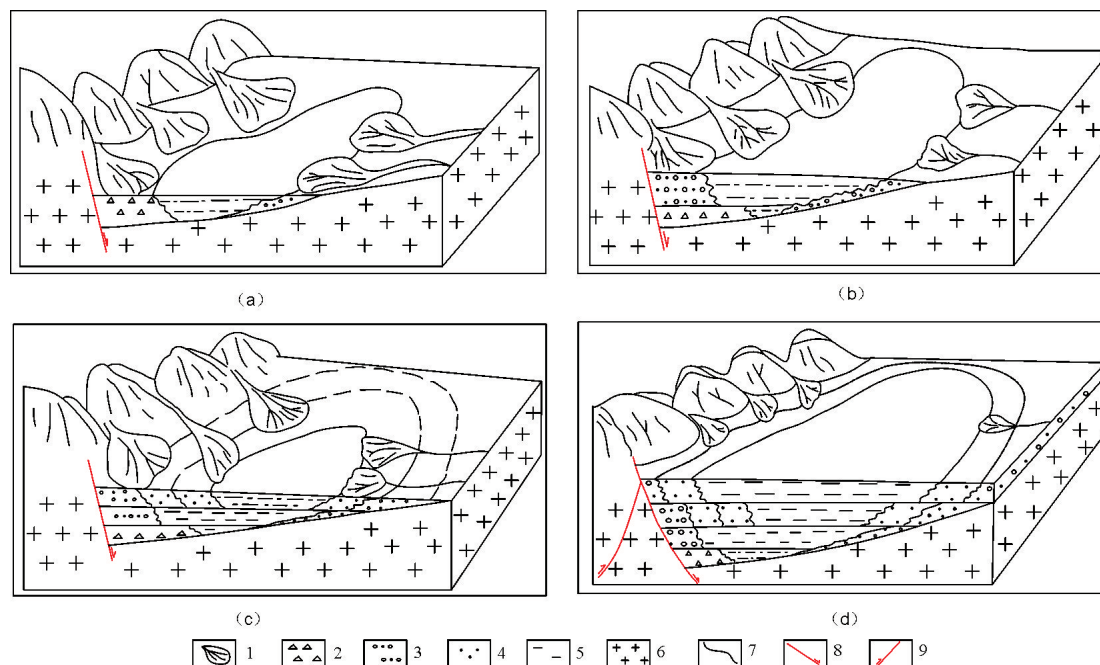


图4 巴音戈壁盆地中南部白垩纪构造-沉积演化模式图

a—早白垩世巴音戈壁组下段;b—早白垩世巴音戈壁组上段早期;c—早白垩世巴音戈壁组上段晚期;d—早白垩世末期;1—扇三角洲;2—冲积扇;3—扇三角洲平原;4—扇三角洲前缘;5—湖泊相;6—基底;7—亚相界线;8—正断层;9—逆断层

Fig.4 Cretaceous tectonic-sedimentary evolution model diagram in the central and southern Bayin Gobi Basin

a-The lower part of Bayin Gobi Formation in Early Cretaceous;b-Early upper member of Bayin Gobi Formation in Early Cretaceous;c-Late upper member of Bayin Gobi Formation in Early Cretaceous;d-Late Early Cretaceous;1-Fan delta;2-Alluvial fan;3-Fan delta plain;4-Fan delta front;5-Lake facies;6-Basement;7-Subfacies boundary;8-Normal fault;9-Reverse fault

受剥蚀,宗乃山隆起被大量剥蚀改造,造山带和盆地的高差减小。由于剥蚀抬升,使得含铀含氧水向盆地内继续运移。由于受巴彦诺尔公隆起的影响,巴音戈壁盆地中南部内地下水由径流—弱径流,转为滞水。该时期由于气候持续干旱炎热,水岩作用强烈,NaCl型高矿化度地下水中的 Na^+ 替换了斜长石中的 Ca^{2+} ,后者与地下水中的 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 和 Mg^{2+} 形成白云石等碳酸盐矿物,促使地下水中以 $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3]^{4-}$ 、 $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3]^{2-}$ 等碳酸铀酰络合离子及 $\text{MgCO}_3 \cdot \text{NaUO}_2(\text{CO}_3)_2$ 复盐发生分离而形成了铀的沉淀(王凤岗等,2018;刘波等,2020)。

总体来看,巴音戈壁盆地中南部在白垩纪—古近纪以来,北部地下水一直保持由北向南的径流趋势,南部地下水总体流向一直保持由南向北的径流趋势,在不同的次级凹陷中略呈分散状。地下水流向与当时的沉积物迁移和地层相带展布方向长期保持一致,这对铀的稳定迁移、层间氧化带的稳定发育及铀在氧化带前锋线一带沉积成矿是非常有利的。

4.2 构造-沉积演化对氧化还原蚀变的影响

巴音戈壁盆地中南部主要经历了3次大规模的铀成矿作用,主要为第一期早白垩世中晚期(109.7 ± 1.5)Ma ~ (115.5 ± 1.5)Ma, 第二期为晚白垩世晚期—古近纪(45.4 ± 0.6)Ma ~ (70.9 ± 1.0)Ma和第三期为新近纪(12.3 ± 0.2)Ma ~ (2.5 ± 0.0)Ma(刘波等,2020)。在早白垩世中晚期,伴随着恩格尔乌苏断裂的活动,宗乃山隆起发生抬升,使得含铀含氧水向盆地内运移,发育层间氧化作用。从塔木素铀矿床的赤铁矿化发育情况看,该期氧化作用强烈,可能为主要成矿期。在晚白垩世晚期65~80 Ma(韩进等,2015;刘溪等,2017),盆地经历了由北向南的强烈的推覆作用,这与巴音戈壁盆地中南部内典型矿床的第二期成矿年龄相对应。伴随着盆地晚白垩世晚期—古近纪盆地由北向南的推覆抬升,盆地内在原有基础上发育有叠加的黄色褐铁矿化层间氧化作用,该期盆地抬升较第一期弱,故层间氧化带的规模较上期小,表现为盆地内褐铁矿化分布较赤铁矿化分布范围小。但是该时期盆地古气候炎热干

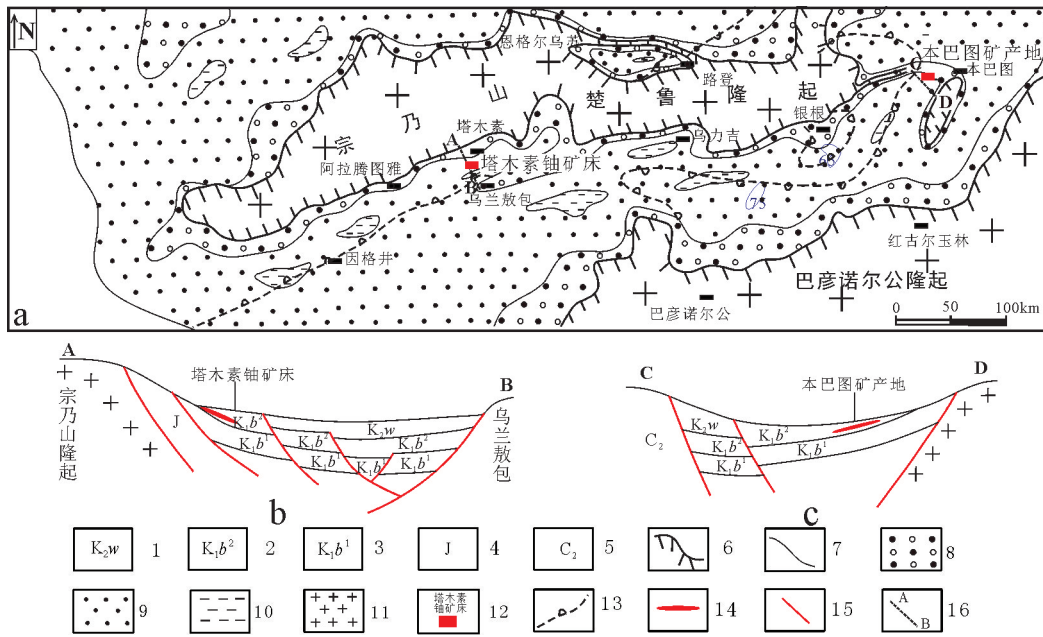


图5 巴音戈壁盆地中南部下白垩统巴音戈壁组上段岩性-岩相示意图

1—上白垩统乌兰苏海组;2—下白垩统巴音戈壁组上段;3—下白垩统巴音戈壁组下段;4—侏罗系;5—上石炭统;6—盆地边界;7—岩相界线;8—扇三角洲平原;9—扇三角洲前缘;10—滨浅湖;11—花岗岩;12—矿床/矿产地;13—乌兰苏海组剥蚀界线;14—铀矿体;15—断裂;16—示意剖面

Fig.5 Lithology-lithofacies sketch map of upper member of lower Cretaceous Bayin Gobi Formation in south-central Bayin Gobi Basin

1-Ulansuhai formation of upper Cretaceous ; 2-Upper member of Bayin Gobi Formation of Lower Cretaceous; 3-Lower part of Bayin Gobi Formation of Lower Cretaceous; 4-Jurassic; 5- Upper Carboniferous; 6-Basin boundary; 7-Lithofacies boundary; 8-Fan delta plain; 9-Fan delta front; 10- Shore-shallow lake; 11- Granite/Orefield; 12- Deposit; 13- Denudation boundary of Wulansuhai Formation; 14- Uranium ore body; 15-Fault; 16-Schematic section

早,盆地蒸发量增强,使得表生盐度高卤水向内入渗,在巴音戈壁组上段二岩段层间破碎、裂隙、微孔隙充填发育了大量石膏和碳酸盐(李鹏等,2017)。同时,斜长石因水岩作用(溶解、溶蚀等),在解理面及表面形成了次生的缝隙及孔洞等,为铀沉淀提供了空间。此外,含CO₃²⁻、SO₄²⁻等的酸性地表水沿层间下渗,溶解了砂岩中碳酸盐胶结物而形成了溶洞,为后期再次迁移的铀提供了沉淀空间,并形成了铀的进一步叠加、富集(王凤岗等,2018)。受盆地挤压抬升影响,后期近地表成矿流体促进了大规模潜水氧化与层间氧化的发育,深部有机流体(还原气体)上侵与SO₄²⁻发生反应生成黄铁矿。正是黄铁矿和植物炭屑的还原作用导致了渗入型含氧含铀地下水中矿质的沉淀,形成铀矿体。

4.3 构造-沉积演化与铀成矿的关系

早白垩世巴音戈壁期,巴音戈壁盆地断陷发育;早白垩世苏红图—银根期,在太平洋俯冲远程效应下,巴音戈壁盆地发生断拗转换,发育走向北

东的断裂与线性褶皱,致使地层发生差异性掀斜式抬升;晚白垩世乌兰苏海期为坳陷期,沉积物以“填平补齐”的形式覆盖在早期的地质单元上,同时受喜山运动的影响,发育走向北西的断裂;古近纪至今,受印度板块向北俯冲的影响,北东向构造活化与新生,区内差异性抬升更为明显,地层多被剥蚀(卫三元等,2006;肖国贤等,2017;彭云彪等,2018a;赵衡等,2019a,2019b;刘波等,2020)。多期次构造叠加使得因格井—尚丹坳陷的地质体形成不同的块体。受早白垩世晚期至古近纪时期断续构造运动影响,白垩纪地层受北东向与北西向构造活动影响,形成大小不一的块体,在本巴图、乌力吉和塔木素地区比较明显,在不断抬升与剥蚀过程中局部形成剥蚀天窗(图6),为后期铀成矿提供了有利条件,控制着层间氧化带由凹陷边缘向凹陷中心发育,加之(滨-浅)湖相地层中富含有机质,在氧化还原障附近形成铀矿化(表2)。简言之,巴音戈壁盆地中南部内铀成矿在有利的构造背景下,主要受沉积相

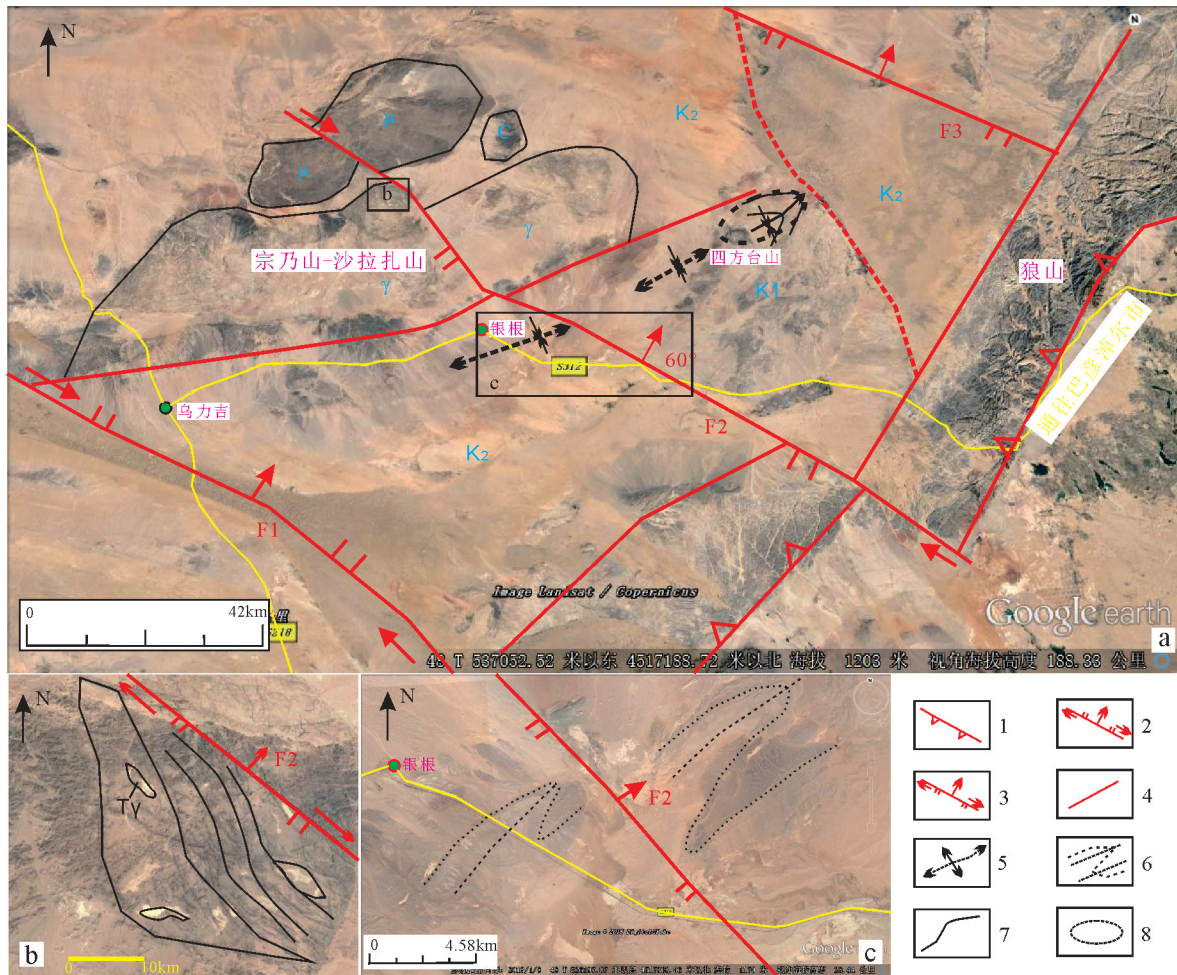


图6 尚丹拗陷银根地区构造形迹示意图

a—乌力吉—本巴图地区;b—沙拉扎山北侧;c—银根地区;1—盆地边界;2—正断层;3—逆断层;4—性质不明断层;5—向斜;6—复式褶皱;7—地质界线;8—剥蚀天窗

Fig.6 Structural trace map of Yingen area in Shangdan depression

a—Wuliji—Benbatu area;b—The north side of the Salazha Mountain;C—Yingen area;1—Basin boundary; 2—Normal fault; 3—Reverse fault; 4—Unknown fault; 5—Syncline; 6—Compound fold; 7—Geological boundary; 8—Denudation windows

控制与层间氧化带制约。

5 讨论

5.1 扇三角洲类型

因格井拗陷内扇三角洲物源主要为自北向南,自早白垩世以来继承性发育。岩心及测井资料显示砂砾岩层累计厚度大,多表现出叠加正韵律岩性序列,反映出物源补给比较充足、强烈;A/S值虽然发生变化,但总体较小(林畅松,2015)。尚丹拗陷内扇三角洲继承性发育不良,岩石颗粒较细,细砂岩含量相对要高,累计厚度较薄,三角洲前积特征不明显,反映了物源供给的阶段性和微弱性,A/S值

主体较大。

现代分析认为,层序地层学和“源—汇”体系研究具有内在紧密关联性。断陷湖盆扇三角洲的分布特征与A/S值密切相关(刘磊等,2015;吴冬等,2015;刘波等,2020)。“A”实际上对应着巴音戈壁盆地中南部的“汇”,“S”对应着巴音戈壁盆地中南部的“源”,“源—汇”体系直接控制着沉积扇体的类型和特征。“源—汇”体系主导下的断陷湖盆扇三角洲通常具备两种形态,即“锥状”扇三角洲与“片状”扇三角洲(吴冬等,2015)。所谓“锥状”扇三角洲外形呈锥形,纵向厚度较大,平面分布相对较窄,在地震剖面上,扇相多呈现杂乱、弱振幅、差连续反射特

表2 巴音戈壁盆地构造-沉积演化与铀成矿作用的关系

Table 2 Relationship between tectonic-sedimentary evolution and uranium mineralization in the Bayin Gobi Basin

时代	组、段	盆地特征	铀矿化异常	与成矿作用关系
新生代-第四纪	E-Q	垂向差异性隆升,地形南高北低,西高东低		形成盆地局部大型剥蚀窗口
中生代	K ₂	乌兰苏海组	地表航放异常	形成区域盖层,局部剥蚀形成剥蚀窗口
	K ₁	银根组	发现矿化异常	有利的铀储层砂体,砂体中炭屑发育
		苏红图组	发现矿化异常	高热流,局部玄武岩区砂岩中见铀矿化异常
		巴音戈壁组上段	发现工业铀矿化	高热流,直接还原介质,区域主要铀储层
		巴音戈壁组下段		高热流,间接还原介质
	J ₃	裂隙减弱,挤压隆升剥蚀		裂陷期,形成坳陷雏形
J _{1,2}	形成北东、北东东向断陷盆地			
晚古生代	P	褶皱造山、以北-南向挤压为主,伴随岩浆活动,形成近北东东向的显生宙线性岩浆带		基底、盆缘蚀源区提供较好铀源,高U/Th比,显生宙岩浆岩为I型
	C	南北向俯冲,稳定海相盆地		

注:虚线表示沉积不整合,波浪线表示构造不整合。

征,扇端多呈现弱振幅、中连续前积特征,横截面为丘状或透镜状;“片状”扇三角洲厚度较薄,平面分布范围较大,呈层堆积,地震反射上难以看出三角洲前积特征(李佳鸿等,2012;刘磊等,2015)。从能量守恒与转化的角度来看,在构造-沉积演化过程中,高势能的“锥状”扇三角洲向低势能的“片状”扇三角洲演化,在某一或者诸多节点处可以形成多种形态的复合扇三角洲,据此可进行扇三角洲垛体的定性预测(图7)。

此外,按相邻的相分类,巴音戈壁盆地中南部扇三角洲又可以分为靠山型与靠扇型扇三角洲。靠山型扇三角洲往往发育于盆缘断层下降盘坡度较陡的斜坡区,并且紧邻高地物源区;而靠扇型扇三角洲多形成于坡度相对平缓的盆缘斜坡区,它与相邻高地物源区之间通常存在明显可识别的冲积扇相(陈景山等,2007;刘磊等,2015)。其次,由于构造控制下的斜坡坡度不同,导致这两种扇三角洲的沉积水动力条件有所差别(表3)。换句话说,巴音戈壁盆地中南部内盆地边缘斜坡较陡和湖泛面较高,有利于靠山型扇三角洲相的发育;当盆地边缘斜坡较平缓和湖泛面相对较低时,则有利于靠扇型扇三角洲相的发育。事实上,两种扇三角洲可以交替、叠加演化,在进行扇三角洲垛体定性预测的

同时,要对已知扇三角洲铀成矿属性进行判别。

5.2 成矿模式

巴音戈壁盆地中南部在早白垩世中晚期((109.7±1.5)Ma~(115.5±1.5)Ma)、晚白垩世晚期—古近纪((45.4±0.6)Ma~(70.9±1.0)Ma)和新近纪((12.3±0.2)Ma~(2.5±0.0)Ma),经受了南东、北西与南西方向的应力改造作用(刘波等,2020;Liu et al.,2021a)。目的层巴音戈壁组上段发育的扇三角洲平原亚相及前缘亚相砂体,长时间暴露地表,使得含铀含氧水沿砂体向盆地(坳陷)内运移,形成较大规模的层间氧化带型铀矿化(李鹏等,2017;刘波等,2020):在氧化砂岩与灰色砂岩界面、氧化还原过渡带中多形成砂岩型铀矿体(图8);在扇三角洲分流河道砂岩与分流间湾泥岩结合的部位(同时作为氧化还原障),形成砂泥混合型矿体,在泥岩一侧发育微弱氧化作用;垂向河道之间的分流间湾、河道间、晚期洪泛平原泥质粉砂岩中形成后生泥岩型铀矿体,尤其是溶蚀孔洞和裂隙充填黄铁矿、褐铁矿比较发育的地段。

6 找矿预测

综合巴音戈壁盆地中南部内铀成矿要素与典型铀矿床成矿特征(李晓翠等,2014;李鹏等,2017;彭

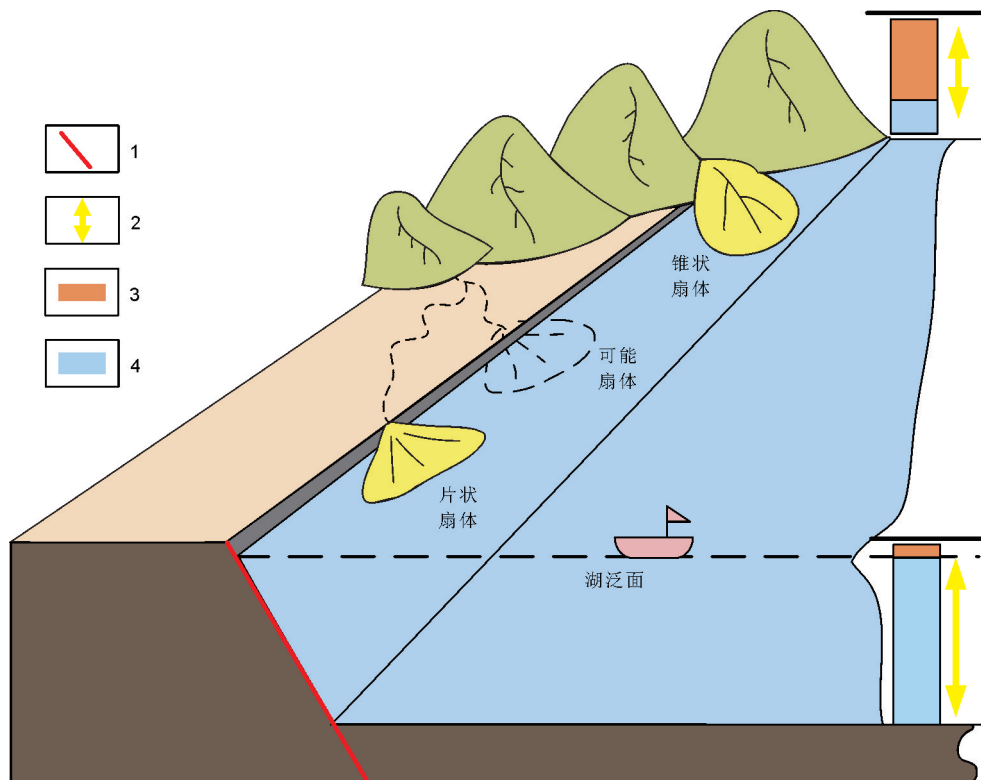


图7 断陷盆地斜坡带扇三角洲发育模式图(吴东,2015)

1—断裂;2—断距;3—剥蚀区;4—沉积区

Fig.7 Development model of fan delta in slope zone of faulted basin(Wu Dong,2015)

1—Fault; 2—Fault distance; 3—Denudation area; 4—Sedimentary area

云彪等,2018b;刘波等,2020),确定主要成矿要素为:①找矿层位为下白垩统巴音戈壁组上段;②扇三角洲平原亚相的辫状分流河道与前缘亚相的水下分流河道、河口坝是砂岩型铀矿的有利成矿部位,而分流间湾是泥岩型铀矿的有利成矿部位;③目的层具有稳定的“泥-砂-泥”结构;④层间氧化还原转换带控矿—单个黄色氧化舌外侧或两个黄色氧化舌之间还原砂体内,以及氧化砂体内部灰色残留体;⑤盆缘

构造斜坡带控制成矿地质体的发育,同时控制含氧含铀水在目的层砂体中的运移;⑥多期次构造活动形成“剥蚀天窗”,影响层间氧化带发育规模。因此,定位扇三角洲体是找矿预测的基础。

巴音戈壁盆地中南部凹陷内发育走向北东的构造带与走向北西的断折带,形成一系列正断层与逆冲断层,地貌表现为断鼻、断块。目前已知的塔木素铀矿床、本巴图矿产地均是位于此类有利构造

表3 靠山型与靠扇型扇三角洲特征对比表(据陈景山,2007)

Table 3 Characteristic comparison table between hillside fan delta and fan delta(after Chen Jingshan,2007)

特征	靠山型扇三角洲	靠扇型扇三角洲
沉积动力	沉积物重力流作用为主	牵引流作用为主
沉积环境	较大	较小
	陆上 水下	辫状分流河道较发育,分流间沼泽发育稍差 水下分流河道发育差,河口坝少而差
岩性	砾岩、砂砾岩、砾状粗砂岩、不等粒砂岩	粗砂岩、砾状粗砂岩、不等粒砂岩、砾状不等粒砂岩
粒度概率图型	弧形和一段式斜线形为主	多呈两段式和多段式
分选性	较差	较好
沉积构造	块状层理与递变层理	常见各种交错层理
砂体侧向连续性	较差	较好
储集性能	较差	较好

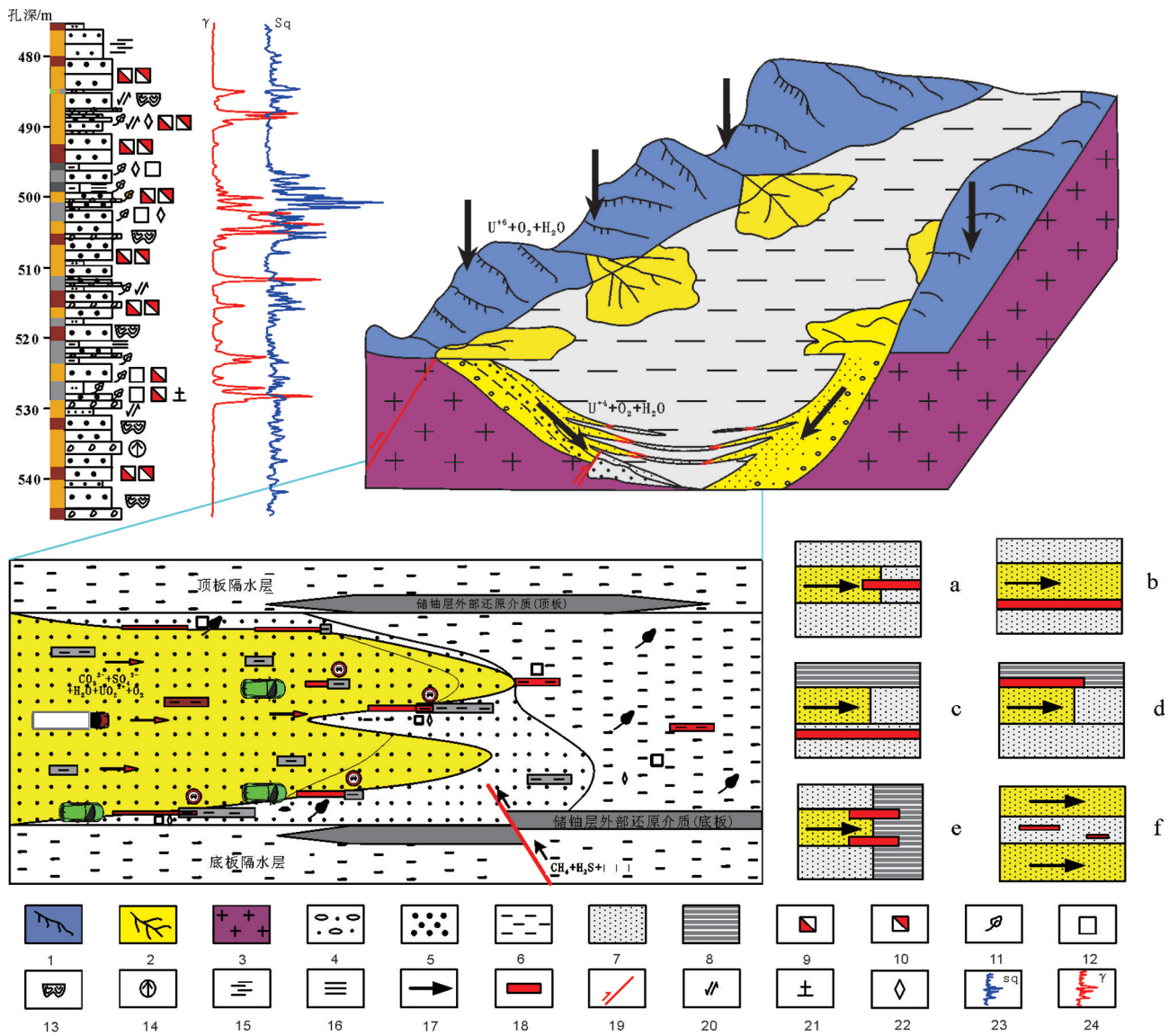


图8 断陷湖盆背景下的扇三角洲成矿模式图

a—铀矿体产于氧化砂岩中;b—铀矿体产于氧化砂岩与灰色砂岩界面上;c—铀矿体产于灰色砂岩中;d、e—铀矿体产于氧化砂岩与灰色泥岩界面上;f—铀矿体产于氧化砂岩中的泥岩;1—剥蚀区;2—扇三角洲;3—基底;4—扇三角洲平原;5—扇三角洲前缘;6—滨浅湖;7—砂岩;8—泥岩;9—褐铁矿化;10—赤铁矿化;11—炭化植物碎屑;12—黄铁矿;13—槽状交错层理;14—正粒序;15—平行层理;16—水平层理;17—流体方向;18—铀矿体;19—断裂;20—裂隙;21—高岭土化;22—碳酸盐化;23—电阻率测井曲线;24—γ测井曲线

Fig.8 Metallogenic model of fan delta under the background of faulted lacustrine basin

a—Uranium ore body occurs in oxidized sandstone; b—Uranium ore body occurs at the interface between oxidized sandstone and grey sandstone; c—Uranium ore body occurs in grey sandstone; d/e—Uranium ore bodies occur at the interface between oxidized sandstone and grey mudstone; f—Uranium ore body occurs at mudstone in oxidized sandstone; 1—Denudation area; 2—Fan delta; 3—Basement; 4—Fan delta plain; 5—Fan delta front; 6—Shore shallow lake; 7—Sandstone; 8—Mudstone; 9—Limonition; 10—Hematite mineralization; 11—Carbonized plant debris; 12—Pyrite; 13—Trough cross bedding; 14—Normal grain sequence; 15—Parallel bedding; 16—Horizontal bedding; 17—Fluid direction; 18—Uranium ore body; 19—Fracture; 20—Cranny; 21—Kaolinite; 22—Carbonation; 23—Resistivity logging curve; 24—Gamma logging curve

部位(图5,图6)。进一步对比分析巴音戈壁盆地中南部内铀矿床与铀矿化(异常点)的分布可以发现,铀矿化集中在盆缘与凹陷边缘的次级凹陷、凸起即背斜或者穹隆构造的两翼及扬起端。这些地段受不同程度的构造抬升影响,目的层巴音戈壁组上段遭受不同程度的剥蚀,如本巴图地区巴音戈壁组上段较塔木素地区剥蚀深度大于100 m,造成事实上的“剥蚀天窗”,有利于成矿流体的运移以及铀成矿。因此,在大型斜坡带上寻找构造剥蚀天窗和次级凹陷是巴音戈壁盆地中南部内铀矿重点找矿预测方向,诸如苏亥图坳陷的那仁哈拉地段、尚丹坳陷的新尼乌苏、准查以及巴润地段。

由于巴音戈壁盆地中南部内构造-沉积演化的不均一性,小型凹陷以及凸起比较发育,现有工作程度比较低,制约着我们的认识。从现有钻孔的揭露情况来看,沉积间断面附近通常发育较强的氧化还原作用,具有明显的 γ 异常与增高。因此定位构造稳定期的构造活化地段,或者低强度活动地区的稳定地段(沉积间断面)也是今后研究探索的找矿预测方向。

7 结 论

(1)巴音戈壁盆地中南部凹陷的构造样式主要为双断型和单断型;从凹陷形态及其演化继承性分析,又可以分为叠合型和迁移型。

(2)不同的凹陷构造样式控制着巴音戈壁组上段不同的沉积相组合,多期次构造叠加使得目的层逐步形成剥蚀天窗,控制着层间氧化带由凹陷边缘向凹陷中心发育,在氧化还原障附近形成铀矿化。

(3)在构造-沉积演化过程中,高势能的“锥状”扇三角洲向低势能的“片状”扇三角洲演化,据此可进行扇三角洲垛体的定性预测,同时要对已知扇三角洲铀成矿属性进行判别,进而对矿化类型进行预判与识别。

(4)巴音戈壁盆地中南部凹陷内发育走向北东的构造带与走向北西的断折带,形成一系列正断层与逆冲断层,地貌表现为断鼻、断块,铀矿化集中在盆缘与凹陷边缘的次级凹陷、凸起即背斜或者穹隆构造的两翼及扬起端。在大型斜坡带上寻找构造剥蚀天窗和次级凹陷是巴音戈壁盆地中南部铀矿重点找矿预测方向,如苏亥图坳陷的那仁哈拉地

段、尚丹坳陷的新尼乌苏、准查以及巴润地段。

(5)由于巴音戈壁盆地中南部构造-沉积演化的不均一性,定位构造稳定期的构造活化地段,或者低强度活动地区的稳定地段(沉积间断面)也是今后研究探索的找矿预测方向。

References

- Chen Daisheng, Liu Wusheng, Jia Licheng. 2011. Paleo-climate evolution in China and its control on the metallization of sandstone type uranium deposit of Meso-Cenozoic basins [J]. *Uranium Geology*, 27(6):321-326(in Chinese with English abstract).
- Chen Jingshan, Tang Qingsong, Dai Zongyang, Tan Xiucheng, Liu Jinghuan. 2007. Recognition and correlation of two distinct types of fand elta facies[J]. *Journal of Southwest Petroleum University*, 29(4): 1-6(in Chinese with English abstract).
- Chen Qilin, Yang Zhanlong, Guan Yinlu, Wei Pingsheng. 2005. Depression structure-style types and petroleum accumulation, rift basins group of Yingen-Ejina[J]. *Natural Gas Geoscience*, 16(5): 559-563(in Chinese with English abstract).
- Chen Lulu, Nie Fengjun, Yan Zhaobin, Feng Zhibing, Liu Jie, Li Xiaodong. 2014. The analysis of basin-mountain evolution and sandstone-type uranium mineralization of Meso-Cenozoic U-productive basins in Northern China[J]. *Science Technology and Engineering*, 14(5):163-170(in Chinese with English abstract).
- Cui Xianyue, Zhao Qihua, Zhang Jin, Wang Yannan, Zhang Beihang, Nie Fengjun, Qu Junfeng, Zhao Heng. 2018. Late Cretaceous-Cenozoic multi-stage denudation at the western Ordos block: Constraints by the apatite fission track dating on the Langshan[J]. *Acta Geologica Sinica*, 92(2): 536-555.
- Darby B J, Ritts B D, Yue Yongjun, Meng Qingren. 2005. Did the Altyn tagh fault extend beyond the Tibetan plateau[J]. *EPSL*, 240: 425-435.
- Ding Ye, Hou Shuren, Wang Junlin. 2012. Characteristics and genesis of Bayingobi uranium deposit[J]. *Mineral Deposits*, 31: 193-194 (in Chinese with English abstract).
- Feng Lixia, Brown Roderick W, Han Baofu, Wang Zengzhen, Luszczak Katarzyna, Liu Bo, Zhang Zhicheng, Ji Jianqi. 2017. Thrusting and exhumation of the southern Mongolian Plateau: Joint thermochronological constraints from the Langshan Mountains, western Inner Mongolia, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 144: 287-302.
- Han Jing, Lu Jincai, Wei Jianshe, Zhang Yunpeng, Li Yuhong, Li Yan. 2015. Apatite fission track constraints on the Mesozoic tectonic activities in Shangdan Depression, Yin'e Basin, Inner Mongolia[J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(12):2277-2285(in Chinese with English abstract).
- He Zhongbo, Luo Yi, Ma Hanfeng. 2010. Sedimentary facies characteristics of ore-bearing target horizon and its relationship to

- sandstone-type uranium mineralization in Bayingebi Basin[J]. World Nuclear Geoscience, 27(1): 1–18 (in Chinese with English abstract).
- Huang He, Yang Qidi, Huang Wei, Zhao Jianxin, Ye Ke, Hou Jiyao. 2015. Tracking deep crust by zircon xenocrysts within igneous rocks from the northern Alxa, China: Constraints on the southern boundary of the Central Asian Orogenic Belt[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 10(8):150–169.
- Jin Ruoshi, Feng Xiaoxi, Teng Xueming, Nie Fengjun, Cao Haiyang, Hou Huiqun, Liu Hongxu, Miao Peisen, Zhao Hualei, Chen Lulu, Zhu Qiang, Zhou Xiaoxi, 2020. Genesis of green sandstone/mudstone from Middle Jurassic Zhiluo Formation in the Dongsheng uranium orefield, Ordos basin and its enlightenment for uranium mineralization[J]. China Geology, 3(1):52–66. doi: 10.31035/cg2020002.
- Li Jiahong, Wu Yuyu. 2012. New development of fan delta research abroad[J]. Acta Geologica Sichuan, 32(1):54–57(in Chinese with English abstract).
- Li Peng, Wang Qiang, Dai Mingjian, Hou Shuren, Zhang Chengyong, Men Hong, Cui Wei, Li Shuguang. 2017. Ore alteration characteristics of Tamusu uranium deposit in Bayingobi basin and its response to thermal fluid action[J]. Acta Mineralogica Sinica, (Supp.):479(in Chinese with English abstract).
- Li Xiaocui, Liu Wusheng, Jia Licheng, Zhang Chengwei. 2014. Prognosis and prospecting direction of sandstone-type uranium deposit in Tamusu Area, Bayingebi Basin[J]. Journal of East China Institute of Technology, 37(2): 158–163(in Chinese with English abstract).
- Lin Changsong. 2016. Principles and Application of Sedimentary Basin Analysis[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 240–244.
- Liu Bo, Peng Yunbiao, Kang Shihu, Qin Yanwei. 2018. Depositional characteristics and uranium metallogenic fluid dynamics of uranium bearing paleo-valley of the Saihan Formation in Basaiqi, Erlian Basin[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, (2): 316–325 (in Chinese with English abstract).
- Liu Bo, Shi Zhiqiang, Peng Yunbiao, Li Peng, Wang Qiang, Zhang Pengfei. 2020. Geological characteristics and uranium metallogenic model of Tamusu uranium deposit in Bayin Gobi Basin [J]. Mineral Deposits, 39(1):68–183(in Chinese with English abstract).
- Liu Bo, Shi Zhiqiang, Peng Yunbiao, Zhang Pengfei, Li Peng. 2021a. Geological characteristics, ore-forming fluids, and genetic models of uranium mineralization in superimposed basin and craton basin: A study on uranium-bearing basins in Xingmeng area, North China[J]. Arabian Journal of Geosciences, 14: 10.1007/S12517-020-06370-y.
- Liu Bo, Shi Zhiqiang, Peng Yunbiao, Zhang Pengfei, Li Peng. 2021b. Sequence stratigraphy of the Lower Cretaceous uraniumiferous measures and mineralization of the sandstone-hosted Tamusu large uranium deposit, North China[J]. Acta Geologica Sinica. <https://doi.org/10.1111/1755-6724.14792>
- Liu Bo, Yang Jianxin, Qin Yanwei, Qiao Peng, Zhang Feng. 2016. Research on the ore-controlling genetic facies of the sandstone type uranium deposits in the paleovalley of Saihan Formation of the Erlian Basin[J]. Geology and Exploration, 52 (6): 1037–1047 (in Chinese with English abstract).
- Liu Bo, Yang Jianxin, Qiao Baocheng, Tong Bolin, Zhang Feng. 2017a. Characteristics of ore-controlling genesis facies and metallogenic regularity in Bayanwula uranium ore deposit[J]. Mineral Exploration, 8(1): 17–27 (in Chinese with English abstract).
- Liu Bo, Yang Jianxin, Peng Yunbiao, Kang Shihu, Qiao Peng, Lu Chao, Zhang Feng. 2017b. Study of structure and formation in uranium-bearing paleo-valley and typical metallogenic models in eastern part of Erlian Basin[J]. Mineral Deposits, 36 (1): 126–142 (in Chinese with English abstract).
- Liu Chunyan, Lin Changsong, Wu Maobing, Zheng Menglin. 2006. Tectonic evolution and petroleum prospects of the Mesozoic Inggeng-Ejin Qibasin, Inner Mongolia[J]. Geology in China, 33(6): 1328–1335(in Chinese with English abstract).
- Liu Lei, Zhong Yihong, Chen Hongde, Wang Jun. 2015. Contrastive research of Fan Deltas and Braided River Deltas in Half-graben rift Lake Basin in East China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 33 (6):1170–1181(in Chinese with English abstract).
- Liu Xi, Han Wei, Wei Jianshe, Zhang Yunpeng. 2017. Constraints of apatite fission track on the Mesozoic tectonic activities in Xirehada Region, Yin'e Basin, Inner Mongolia[J]. Acta Geologica Sinica, 91 (10): 2185–2195(in Chinese with English abstract).
- Liu Xiaobo, Hu Jianmin, Shi Wei, Yan Jiyuan. 2019. Palaeogene-Neogene sedimentary and tectonic evolution of the Yinchuan Basin, western North China Craton[J]. International Geology Review, 1–19.
- Lu Chao, Jiao Yangquan, Peng Yunbiao, Wu Liqun, Miao Aisheng, Rong Hui, Xie Huili. 2018. Paleo-interlayer oxidation zone identification and spatial localization prediction in Daying area[J]. Acta Geologica Sinica, 45(6): 1228–1240(in Chinese with English abstract).
- Luo Yi, He Zhongbo. 2009. Analysis of Metallogenic Conditions and Evaluation of Uranium Resources Potential of Sandstone Type Uranium Deposits in Bayingobi basin, Inner Mongolia[R]. Beijing Institute of Geology of Nuclear Industry, 3–8.
- Miao Peisen, Li JianGuo, Tang Chao, Jin Roushi, Cheng Yinhang, Zhao Long, Xiao Peng, Wei Jialin. 2017. Metallogenic condition and prospecting orientation for deep sandstone-hosted uranium deposits in Mesozoic-Cenozoic basins of North China[J]. Geological Bulletin of China, 36(10):1830–1840(in Chinese with English abstract).
- Peng Yunbiao, Liu Bo, Qin Yanwei, Yan Xiaobo. 2018a. Constraints of tectonic evolution on sandstone-type uranium metallogenesis in the Chuanjing depression, Erlian Basin[J]. Geology and Exploration, 54

- (5): 917–928(in Chinese with English abstract).
- Peng Yunbiao, Wang Qiang, Dai Mingjian, Liu Lu, Peng Shuang. 2018b. Ore body spatial distribution characteristics of TMS uranium deposit and prospecting prediction in Bayingebi basin[J]. World Nuclear Geoscience, 40(9):17–21(in Chinese with English abstract).
- Shen Kefeng, Yang Jianxin, Hou Shuren, Dai Mingjian, Li Hongjun. 2014. Uranium prospecting breakthrough, achievement expanding and prospecting orientation in main Mesozoic–Cenozoic sedimentary uranium basins of Inner Mongolia[J]. Geology in China, 41(4):1304–1313(in Chinese with English abstract).
- Shi Wei, Dong Shuwen, Liu Yuan, Hu Jianmin, Chen Xingqiang, Chen Peng. 2015. Cenozoic tectonic evolution of the South Ningxia region, northeastern Tibetan Plateau inferred from new structural investigations and fault kinematic analyses[J]. Tectonophysics, 649: 139–164.
- Shi Xingjun, Zhang Lei, Wang Tao, Xiao Xuchang, Tong Ying, Zhang Jianjun, Geng Jianzhen, Ye Ke. 2014. Geochronology and geochemistry of the intermediate–acid intrusive rocks from Zongnaishan area in northern Alxa, Inner Mongolia, and their tectonic implications[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 33(6): 989–1007(in Chinese with English abstract).
- Shi Wei, Liu Yuan, Liu Yang, Chen Peng, Chen Long, Cen Ming, Huang Xingfu, Li Hengqiang. 2013. Cenozoic evolution of the Haiyuan fault zone in the northeast margin of the Tibetan Plateau[J]. Earth Science Frontiers, 20(4):1–17(in Chinese with English abstract).
- Tapponnier P, Zhiqin X, Roger F, Meyer B, Arnaud N, Wittlinger G, Jingsui Y. 2001. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau[J]. Science, 294(5547): 1671–1677.
- Wang Fenggang, Hou Shuren, Men Hong, Wang Junlin. 2018. Study on the characteristics of water–rock interaction and its relation to uranium mineralization in Tamusu uranium deposit, Southern Bayingobi Basin[J]. Geological Review, 64(3): 634–645(in Chinese with English abstract).
- Wei Sanyuan, Qin Mingkuan, Li Yuexiang, He Zhongbo. 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 Dong, Zhu Xiaomin, Liu Changni, Li Yutong. 2015. Discussion on depositional models of fan deltas in steep slope belt of the rift basin under the guidance of source–to–sink system theory: A case study from the Fula sub–basin, Muglad Basin, Sudan[J]. Geological Journal of China University, 12(21): 654–664(in Chinese with English abstract).
- Xiao Guoxian, Li Wenhui, Hou Shuren, Dai Mingjian, Zhang Gengxin. 2017. Controlling factors and genesis of Tamusu uranium deposit in Bayingebi Basin, Inner Mongolia[J]. Global Geology, 25(12): 39–41(in Chinese with English abstract).
- Yu Rengan, Wang Shanbo, Zhu Qiang, Si Qinghong, Teng Xueming, Liu Xiaoxue, Liu Houning, Tang Yongxiang. 2021. Zircon U–Pb ages and provenance characteristics of the Zhiluo Formation sandstones and the formation background of the uranium deposit in Huangling area, Ordos Basin, China[J]. China Geology, 4(4): 600–615. doi: 10.31035/cg2021006.
- Zhang Chengyong, Nie Fengjun, Hou Shuren, Wang Junlin, Zhang Liang, Deng Wei. 2015. Ore–controlling factors and metallogenic model of Tamusu sandstone type uranium deposit in Bayingobi Basin, Inner Mongolia [J]. Geological Science and Technology Information, 34(1):140–147(in Chinese with English abstract).
- Zhang Jin, Li Jinyi, Li Yanfeng, Qi Wenhua, Zhang Yiping. 2014. Mesozoic–Cenozoic multi–stage intraplate deformation events in the Langshan region and their tectonic implications[J]. Acta Geologica Sinica, 88(1): 78–102.
- Zhang Jianxin, Gong Jianghua. 2018. Revisiting the nature and affinity of the Alxa Block[J]. Acta Petrologica Sinica, 34(4): 940–962(in Chinese with English abstract).
- Zhao Heng, Zhang Jin, Li Yanfeng, Qu Junfeng, Zhang Beihang, Zhang Yiping, Yun Long, Wang Yannan. 2019a. Characteristics of Cenozoic faults in Langshan area, Inner Mongolia: Constraint on the development of normal faults[J]. Acta Geologica Sinica, 46(6): 1434–1453(in Chinese with English abstract).
- Zhao Heng, Zhang Jin, Li Yanfeng, Qu Junfeng, Zhang Beihang, Niu Pengfei, Yun Long, Zhang Yiping, Wang Yannan. 2019b. Relay structures and linkage characteristics of normal fault: An example from the Langshan piedmont normal fault zone[J]. Acta Geologica Sinica, 93(7):1601–1617(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈戴生, 刘武生, 贾立城. 2011. 我国中新生代古气候演化及其对盆地砂岩型铀矿的控制作用[J]. 铀矿地质, 27(6): 321–326.
- 陈景山, 唐青松, 代宗仰, 谭秀成, 刘景环. 2007. 特征不同的两种扇三角洲相识别与对比[J]. 西南石油大学学报, 29(4):1–6.
- 陈启林, 杨占龙, 关银录, 卫平生. 2005. 银根—额济纳裂谷盆地群凹陷结构样式及对成藏的控制[J]. 天然气地球科学, 16(5):559–563.
- 陈路路, 聂逢君, 严兆彬, 封志兵, 刘杰, 李晓东. 2014. 北方中新生代产铀盆地山演化与砂岩型铀成矿作用分析[J]. 科学技术与工程, 14(5): 163–170.
- 丁叶, 侯树仁, 王俊林. 2012. 巴音戈壁铀矿床特征及成因分析[J]. 矿床地质, 31: 193–194.
- 韩进, 卢进才, 魏建设, 张云鹏, 李玉宏, 李岩. 2015. 内蒙古银额盆地尚丹凹陷中生代构造活动的磷灰石裂变径迹约束[J]. 地质通报, 89(12): 2277–2285.
- 何中波, 罗毅, 马汉峰. 2010. 巴音戈壁盆地含矿目的层沉积相特征与砂岩型铀矿化的关系[J]. 世界核地质科学, 27(1):11–18.
- 李佳鸿, 吴煜宇. 2012. 国外扇三角洲研究新进展[J]. 四川地质学报, 32(1): 54–57.

- 李鹏, 王强, 戴明建, 侯树仁, 张成勇, 门宏, 崔伟, 李曙光. 2017. 巴音戈壁盆地塔木素铀矿床矿石蚀变特征与热流体作用的响应[J]. 矿物学报, (增刊):479.
- 李晓翠, 刘武生, 贾丽城, 张成伟. 2014. 巴音戈壁盆地塔木素地区砂岩型铀矿预测及找矿方向[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 37(2): 158-163.
- 林畅松. 2016. 沉积盆地分析原理与应用[M]. 北京:石油工业出版社, 240-244.
- 刘波, 彭云彪, 康世虎, 秦彦伟. 2018. 二连盆地巴赛齐赛汉组含铀古河谷沉积特征及铀成矿流体动力学[J]. 矿物岩石地球化学通报, (2): 316-325.
- 刘波, 时志强, 彭云彪, 李鹏, 王强, 张鹏飞, 王浩锋. 2020. 巴音戈壁盆地塔木素铀矿床地质特征及铀成矿模式研究[J]. 矿床地质, 39(1):68-183.
- 刘波, 杨建新, 秦彦伟, 张锋. 2016. 二连盆地中东部赛汉组古河谷砂岩型铀矿床控矿成因相研究[J]. 地质与勘探, 52(6):1037-1047.
- 刘波, 杨建新, 乔宝成, 童波林, 张锋. 2017a. 二连盆地巴彦乌拉组铀矿床控矿成因相特征及成矿规律研究[J]. 矿产勘查, 8(1):17-27.
- 刘波, 杨建新, 彭云彪, 康世虎, 乔鹏, 鲁超, 张锋. 2017b. 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, 36(1):126-142.
- 刘春燕, 林畅松, 吴茂炳, 郑孟林. 2006. 银根-额济纳旗中生代盆地构造演化及油气勘探前景[J]. 中国地质, 33(6):1328-1335.
- 刘磊, 钟怡红, 陈洪德, 王峻. 2015. 中国东部箕状断陷湖盆扇三角洲与辫状河三角洲对比研究[J]. 沉积学报, 33(6):1170-1181.
- 刘溪, 韩伟, 魏建设, 张云鹏. 2017. 内蒙古银额盆地希热哈达地区中生代构造活动的磷灰石裂变径迹约束[J]. 地质学报, 91(10): 2185-2195.
- 鲁超, 焦养泉, 彭云彪, 吴立群, 苗爱生, 荣辉, 谢慧丽. 2018. 大营地区古层间氧化带识别与空间定位预测[J]. 中国地质, 45(6):1228-1240.
- 罗毅, 何中波. 2009. 内蒙古巴音戈壁盆地砂岩型铀矿成矿条件分析与铀资源潜力评价[R]. 核工业北京地质研究院, 3-8.
- 苗培森, 李建国, 汤超, 金若时, 程银行, 赵龙, 肖鹏, 魏佳林. 2017. 中国北方中生代盆地深部砂岩铀矿成矿条件与找矿方向[J]. 地质通报, 36(10):1830-1840.
- 彭云彪, 刘波, 秦彦伟, 颜小波. 2018a. 二连盆地川井坳陷构造演化对砂岩型铀矿成矿作用的约束[J]. 地质与勘探, 54(5): 917-928.
- 彭云彪, 王强, 戴明建, 刘璐, 彭爽. 2018b. 巴音戈壁盆地TMS铀矿床矿体空间展布特征与找矿预测[J]. 世界核地质科学, 40(9):17-21.
- 申科峰, 杨建新, 侯树仁, 戴明建, 李洪军. 2014. 内蒙古中生代主要含铀沉积盆地找矿突破技术思路及其成果扩大方向[J]. 中国地质, 41(4): 1304-1313.
- 史兴俊, 张磊, 王涛, 肖序常, 童英, 张建军, 耿建珍, 叶珂. 2014. 内蒙古阿拉善盟北部宗乃山中酸性侵入岩年代学、地球化学及构造意义[J]. 岩石矿物学杂志, 33(6): 989-1007.
- 施炜, 刘源, 刘洋, 陈鹏, 陈龙, 岑敏, 黄兴富, 李恒强. 2013. 青藏高原东北缘海原断裂带新生代构造演化[J]. 地学前缘, 20(4):001-017.
- 王凤岗, 侯树仁, 门宏, 王俊林. 2018. 巴音戈壁盆地南部塔木素铀矿床水岩作用特征及其与铀成矿关系研究[J]. 地质论评, 64(3): 634-645.
- 卫三元, 秦明宽, 李月湘, 何中波, 陈安平, 申科峰. 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.
- 吴冬, 朱筱敏, 刘常妮, 李雨彤. 2015. “源-汇”体系主导下的断陷湖盆陡坡带扇三角洲发育模式探讨:以苏丹 Muglad 盆地 Fula 凹陷为例[J]. 高校地质学报, 12(21):654-664.
- 肖国贤, 李文辉, 侯树仁, 戴明建, 张更信. 2017. 内蒙古巴音戈壁塔木素铀矿床的控制因素及矿床成因探讨[J]. 世界地质, 25(12): 39-41.
- 张成勇, 聂逢君, 侯树仁, 王俊林, 张良, 邓薇. 2015. 内蒙古巴音戈壁盆地塔木素地区砂岩型铀矿控制因素与成矿模式[J]. 地质科技情报, 34(1):140-147.
- 张建新, 宫江华. 2018. 阿拉善地块性质和归属的再认识[J]. 岩石学报, 34(4): 940-962.
- 赵衡, 张进, 李岩峰, 曲军峰, 张北航, 张义平, 云龙, 王艳楠. 2019a. 内蒙古狼山地区新生代断层活动特征:对正断层生长的限定[J]. 中国地质, 46(6):1434-1453.
- 赵衡, 张进, 李岩峰, 曲军峰, 张北航, 牛鹏飞, 云龙, 张义平, 王艳楠. 2019b. 正断层的阶区构造及生长机制:以狼山山前断层带为例[J]. 地质学报, 93(7):1601-1617.