

巴音戈壁盆地塔木素铀矿床地质特征及 铀成矿模式研究^{*}

刘 波^{1,2}, 时志强^{1**}, 彭云彪², 李 鹏², 王 强², 张鹏飞², 王浩锋²

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

摘要 巴音戈壁盆地为中国北方重要的能源盆地。笔者通过对盆地内塔木素铀矿床地质特征研究,发现矿床产于因格井凹陷巴音戈壁期微斜坡,晚白垩世和古近纪剥蚀窗口的发育,为成矿流体向盆地内运移提供了有利条件;矿床的主要目的层为下白垩统巴音戈壁组上段二岩段,为扇三角洲-湖泊沉积,扇三角洲砂体发育。巴音戈壁组上段二岩段与巴音戈壁组上段一岩段、三岩段构成有利的“泥-砂-泥”地层结构,有利于含铀含氧水向盆地内运移和层间氧化作用的发生。矿床内氧化带可划分为完全氧化带、氧化还原过渡带和还原带,矿体主要位于氧化还原过渡带中,受氧化带前锋线和氧化还原过渡带控制。矿床内参与铀成矿作用的还原介质主要为内部还原介质和外部还原介质。内部还原介质为目的层本身的有机质、黄铁矿等;外部还原介质为巴音戈壁组上段一岩段、三岩段暗色泥岩中发育的有机质、深部油(气)等。盆地内铀矿化与盆地的构造热事件密切相关,铀成矿作用表现为3期,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)、第三期为新近纪((12.3±0.2)Ma~(2.5±0)Ma)。塔木素铀矿床矿体主要为砂岩型、砂泥混合型、后生泥岩型和同沉积泥岩型,矿体受层间氧化带和沉积相变控制明显。通过矿床构造、目的层沉积体系、氧化带、有机质和铀矿化等特征的研究,建立了矿床铀成矿模式和矿体成因模型,为后期铀成矿作用标志的研究奠定了基础。

关键词 地质学;巴音戈壁组上段二岩段;因格井凹陷;层间氧化带;矿床模式;巴音戈壁盆地

中图分类号:P619.14

文献标志码:A

Geological characteristics and uranium metallogenic model of Tamusu uranium deposit in Bayin Gobi Basin

LIU Bo^{1,2}, SHI ZhiQiang¹, PENG YunBiao², LI Peng², WANG Qiang², ZHANG PengFei² and WANG HaoFeng²

(1 Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 2 No. 208 Geological Party, Bureau of Nuclear Industry, Baotou 014010, Inner Mongolia, China)

Abstract

Bayin Gobi Basin is an important energy basin in northern China. Based on a study of the geological characteristics of the Tamusu uranium deposit, the authors found that the deposit was developed on the Bayin Gobi micro-slope of Ingejin sag, and the denudation windows of Late Cretaceous and Paleogene period provided favorable conditions for the migration of ore-forming fluids into the basin. The main target bed of the deposit is the 2nd member of the Lower Cretaceous Upper Bayin Gobi Formation, composed mainly of fan delta-lacustrine deposits and fan delta sandbodies. The 2nd member of the Upper Bayin Gobi Formation, the 1st member and the 3rd member of the Upper Bayin Gobi Formation formed a favorable "mud-sand-mud" stratigraphic structure,

* 本文得到中国核工业地质局项目(编号:201603、201903)和核工业二〇八大队自主科研项目的联合资助

第一作者简介 刘波,男,1984年生,地质高级工程师,博士研究生,沉积学、铀矿勘查及铀矿床学。Email: 304110991@qq.com

** 通讯作者 时志强,男,1972年生,教授,博士生导师,从事沉积学的科研和教学工作。Email:312334691@qq.com

收稿日期 2018-07-18; 改回日期 2018-09-27。秦思婷编辑。

which is conducive to the migration of uranium-bearing oxygen-bearing water into the basin and the occurrence of interlayer oxidation. The oxidation zones in the deposit can be divided into complete oxidation zones, oxidation-reduction transition zones and reduction zones. The orebodies are mainly located in the oxidation-reduction transition zones, which are controlled by the front of the oxidation zone and the oxidation-reduction transition zones. The reductive media involved in uranium mineralization were mainly internal reductive media and external reducing media. The internal reductiuon media were composed of the organic matter and pyrite of the target layer itself, the external reduction media were the organic matter developed in the dark mudstone of the 1st and 3rd member of the Upper Bayin Gobi Formation, and the deep oil (gas) and some other materials. Uranium mineralization in the basin was closely related to the tectonic-thermal events in the basin. Uranium mineralization occurred at three stages: the first stage occurred in the Middle and Late Early Cretaceous, from (109.7 ± 1.5) Ma to (115.5 ± 1.5) Ma; the second stage occurred in the Late Cretaceous, from (45.4 ± 0.6) Ma to (70.9 ± 1.0) Ma; the third stage occurred in the Neogene, from (12.3 ± 0.2) Ma to (2.5 ± 0) Ma. The orebodies of the Tamusu uranium deposit are mainly of sandstone type, sand mud mixed type, later mudstone type and syngenetic type. The mudstone type is controlled obviously by interlayer oxidation zone and sedimentary facies transformation. The uranium metallogenetic model and orebody genetic model of the deposit were established by studying the characteristics of the deposit structure, target bed sedimentary system, oxidation zone, organic matter and uranium mineralization, which lays a foundation for the study of the indicators of late uranium mineralization.

Key words: geology, 2nd member of the Upper Bayin Gobi Formation, Yingejin sag, interlayer oxidation zone, ore deposit model, Bayin Gobi Basin

巴音戈壁盆地为中国北方重要的中新生代煤-油(气)-铀叠合盆地(吕锡敏等,2006;刘春燕等,2006,党萍等,2011;卢进才等,2017)。盆地内发现了塔木素特大型铀矿床、本巴图中型铀矿床和测老庙小型铀矿床(核工业二〇八大队,2015)。许多学者对塔木素铀矿床形成的区域构造演化(张成勇等,2015)、岩性、岩相(张万良等,2002;张成勇等,2015),矿床的矿物共(伴)生组合(潘家永等,2009;管伟村等,2014)、矿床形成的年龄(核工业二〇八大队,2015)、水岩作用(王凤岗等,2018)、流体改造(刘帅等,2017)、矿床成因(肖国贤等,2017)、成矿模式(张成勇等,2015)、成矿预测(吴仁贵等,2008;李晓翠等,2014)等开展了相关研究。也有学者依据其与一般的砂岩型铀矿床在“岩石硬度”上不同,定义该矿床的类型为硬砂岩型(王凤岗等,2018)。巴音戈壁盆地塔木素砂岩型铀矿床主要的赋矿建造为巴音戈壁组上段二岩段,主要为扇三角洲-湖泊沉积,赋矿的扇三角洲具沉积相变快,矿体产出、形态、类型受层间氧化带和沉积相约束明显,具有矿体数量多,成因复杂的特点。鄂尔多斯盆地、二连盆地(刘波等,2016;2017a;2017b;2018)、伊犁盆地(丁波等,2016;黄世杰,2018)和松辽盆地(于文斌等,2008;夏毓亮等,2010;吴仁贵等,2011)矿床成因简单,矿体

类型较单一。以往对塔木素砂岩型铀矿床的研究多侧重于层间氧化带对矿床的控制作用,形成了一系列的成因模式。笔者团队在矿床勘查研究中发现,铀矿床受层间氧化带作用控制的机制,难以“以一概全”的解释塔木素矿体复杂成因问题,难以总结其矿体成因和找矿标志。塔木素砂岩型铀矿床共有主要矿体56个,类型有砂岩型、同沉积泥岩型、砂泥混合型和后生泥岩型。矿床矿体的成因类型表达为由层间氧化带和沉积相控制。本文在矿床地质特征研究的基础上,总结矿床的成矿模式和矿体模型,以指导矿床勘查和盆地内砂岩型铀矿的战略选区工作。

1 区域地质概况

巴音戈壁盆地位于内蒙古西部,盆地基底由古亚洲造山带和阿拉善地块组成(张建新等,2018;图1a),中新生代盆地对基底构造具有一定的继承性(郑孟林等,2003)。研究区以宗乃山-沙拉扎山为界可划分为南部坳陷带和北部坳陷带,铀矿床主要分布于南部坳陷带。盆地基底主要为阿拉善陆块,石炭系一二叠系为盆地内主要的油-气储层(卢进才等,2017),油气的研究成果显著。白垩系为盆地内主要的含铀层(张成勇等,2015;刘波等,2017a)。塔

木素铀矿床位于因格井凹陷内,基底埋深0~1000 m,一般300~800 m,凹陷基底地层为下元古界北山群中深变质岩,上石炭统阿木山组中酸性火山岩、碎屑岩和侏罗系等(图1b)。盆地中生代地层主要为下白垩统巴音戈壁组和上白垩统乌兰苏海组,其中,巴音戈

壁组上段二岩段为盆地内主要的找矿目的层。岩浆岩主要分布于因格井凹陷的北部宗乃山隆起,岩性主要为志留纪花岗岩、石炭纪闪长岩、二叠纪花岗岩、花岗闪长岩和三叠纪花岗岩、辉长岩等(图1b)。志留纪—石炭纪酸性侵入岩的 $w(U)$ 平均为 $2.3 \times$

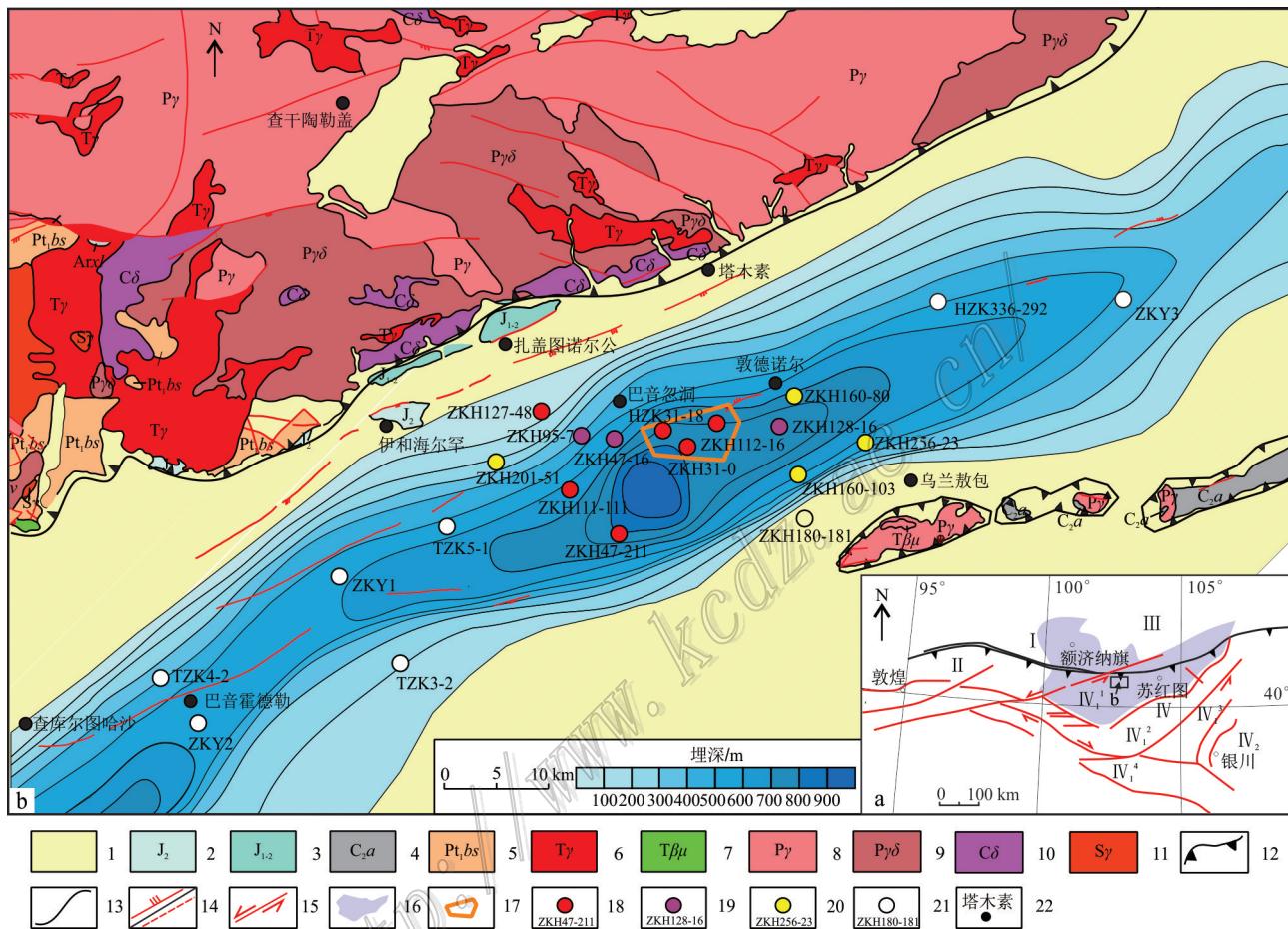


图1 巴音戈壁盆地及邻区大地构造位置(a)和塔木素地区下白垩统巴音戈壁组上段底界埋深等值线图(b)

1—巴音戈壁组上段剥蚀区;2—中侏罗统碎屑岩;3—中-下侏罗统碎屑岩;4—上石炭统阿木山组中酸性火山岩、碎屑岩;5—古元古界北山群变质岩;6—三叠纪花岗岩;7—三叠纪辉长岩;8—二叠纪花岗岩;9—二叠纪花岗闪长岩;10—石炭纪闪长岩;11—志留纪花岗岩;12—蚀源区边界;13—地质界线;14—逆断层/推断断层;15—走滑断层;16—巴音戈壁盆地范围;17—塔木素铀矿床;18—铀工业矿孔;19—铀矿化孔;20—铀异常孔;21—无矿孔;22—地名
I—哈萨克斯坦板块;II—塔里木板块东北端;III—西伯利亚板块;IV—华北板块;IV₁—阿拉善陆块;IV₁¹—阿北陆缘区;IV₁²—阿拉善陆隆区;
IV₁³—阿拉善断陷;IV₁⁴—河西走廊陆缘区;IV₂—晋陕陆块

Fig. 1 Tectonic location of Bayin Gobi basin and adjacent areas (a) and contour map of buried depth of the Upper Bayin Gobi Formation of Lower Cretaceous in Tamusu area (b)

1—Source area; 2—Middle Jurassic clasolite; 3—Middle and Lower Jurassic clasolite; 4—Amushan Formation of Upper Carboniferous volcanics, clasolite; 5—Proterozoic Beishan Group of metamorphic rocks; 6—Triassic granite; 7—Triassic gabbro; 8—Permian granite; 9—Permian granodiorite; 10—Carboniferous diorite; 11—Silurian granitic granite; 12—Etch boundary; 1—Geological boundary; 14—Reverse fault/inferred fault; 15—Strike-slip fault; 16—Range of the Bayin Gobi basin; 17—Tamusu uranium deposit; 18—Uranium industrial ore hole; 19—Uranium mineralized hole; 20—Uranium anomalous hole; 21—Barren hole; 22—Place name
I—Kazakhstan plate; II—Northeastern margin of Tarim plate; III—Siberia plate; IV—North China plate; IV₁—Alashan block; IV₁¹—North Alxa continental margin; IV₁²—Alxa continental rise; IV₁³—Alxa depression; IV₁⁴—Hexi Corridor continental margin; IV₂—Shanxi-Shaanxi block

10^{-6} ~ 3.3×10^{-6} , Th/U比值为3.9~4.5,活化铀迁移量为 -0.7×10^{-6} ~ -0.2×10^{-6} 。二叠纪酸性侵入岩w(U)平均为 3.0×10^{-6} ~ 4.5×10^{-6} , Th/U比值为3.5~6.4,活化铀迁移量为 -0.4×10^{-6} ~ -2.3×10^{-6} ,铀迁出明显。三叠纪酸性侵入岩w(U)平均为 3.3×10^{-6} ~ 5.5×10^{-6} , Th/U比值为1.9~4.8,活化铀迁移量为 -1.0×10^{-6} ~ -2.6×10^{-6} 。另外,元古代地层也具有较高的w(U)和Th/U比值,也有不同程度铀的迁出。岩浆岩来自于亏损地幔,高Sr、低Y,为埃达克岩,可能与俯冲环境有关(史兴俊等,2014;史兴俊,2015;张建新等,2018)。花岗岩类为准铝质-过铝质,钙碱性-高钾钙碱性系列,为I型花岗岩,富大离子亲石元素,亏损高场强元素(史兴俊,2015),Th/U比值3.3~6.4,铀源条件较好。

2 矿床地质特征

2.1 矿床构造特征

塔木素铀矿床位于因格井双断裂型凹陷中,赋存

于凹陷北部下白垩统巴音戈壁组底界面微斜坡上。下白垩统巴音戈壁组与上白垩统乌兰苏海组呈微角度不整合接触,缺失下白垩统苏红图组。下白垩统巴音戈壁组沉积后,受北东方向应力场作用,盆地构造反转,地层由北东向南西抬升掀斜,形成微向斜(图2)。在下白垩统巴音戈壁组沉积后到上白垩统乌兰苏海组沉积前,盆地遭受了大量的抬升剥蚀,表现为巴音戈壁组缺失顶部褐色泥岩。

晚白垩世乌兰苏海组沉积后,北部蚀源区持续隆升,使得盆地北部上白垩统乌兰苏海组大部被剥蚀,形成晚白垩世剥蚀窗口,有利于含铀含氧水向盆地内运移(图2)。在古近纪,凹陷受喜山运动影响,凹陷南部早期断裂发生活化,盆地由南西向北东抬升,地层剥蚀,形成古近纪剥蚀窗口。

2.2 目的层岩石学及沉积体系特征

矿床的主要含矿层下白垩统巴音戈壁组上段二岩段,岩性主要为褐黄色、黄色、紫红色、褐红色、灰色、灰黑色含砾砂岩、砂岩、泥岩和粉砂岩,局部可见

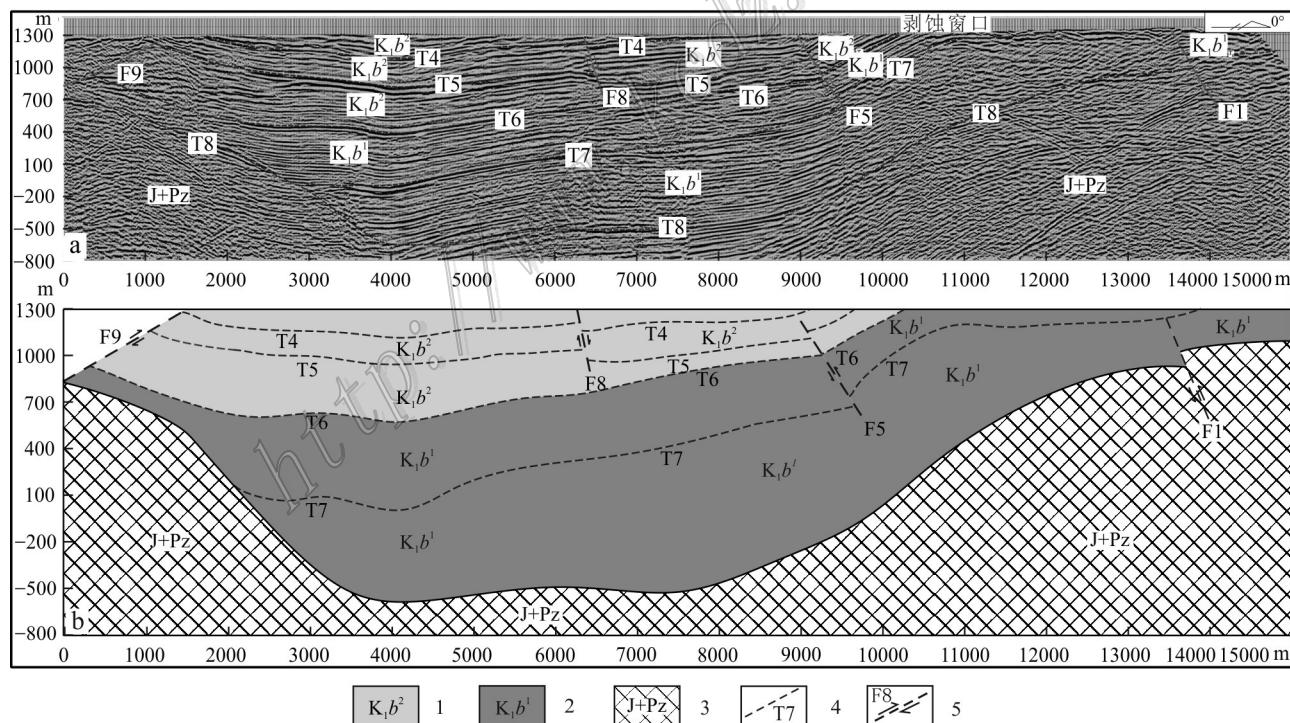


图2 塔木素铀矿床浅层地震剖面图(a)和塔木素铀矿床浅层地震剖面解译图(b)

1—下白垩统巴音戈壁组上段;2—下白垩统巴音戈壁组下段;3—侏罗系及古生界;4—地震解译追踪界面及编号;5—解译断层及编号

Fig. 2 Shallow seismic profile of the Tamsu uranium deposit(a) and interpretation of shallow seismic profile of Tamsu uranium deposit(b)

1—Bayingobi Formation of Upper Cretaceous; 2—Bayingobi Formation of Lower Cretaceous; 3—Jurassic and Paleozoic;
4—Seismic interpretation tracking interface and its serial number; 5—Interpretation of fault and its serial number

薄层泥灰岩。灰色泥岩、粉砂岩和砂岩中见植物碎片、炭屑和黄铁矿等还原介质。通过巴音戈壁组上段二岩段钻孔取样,采取薄片样品54件(图3),经鉴定砂岩主要为长石砂岩,其次为岩屑长石砂岩和长石石英砂岩,颗粒支撑结构,少部分为杂基支撑结构。砂岩碎屑成分以石英、长石为主,岩屑(主要为花岗岩屑,少量火山岩岩屑和变质岩岩屑)次之,含少量云母及重矿物。其中,重矿物主要为磁铁矿、榍石、电气石、绿帘石、石榴子石、锆石等,母岩主要为蚀源区的花岗岩或变质岩。巴音戈壁组上段二岩段砂岩成分成熟度和结构成熟度均较低,碎屑物搬运距离短,为近源、快速沉积的产物。

塔木素铀矿床巴音戈壁组上段划分为3个岩段,分别为巴音戈壁组上段一岩段、巴音戈壁组上段二岩段和巴音戈壁组上段三岩段。其中,巴音戈壁组上段一岩段主要为扇三角洲-湖泊沉积,主要为暗色、黑色砂砾岩、泥岩,泥岩中大量发育炭屑、同沉积黄铁矿;巴音戈壁组上段二岩段主要为扇三角洲-湖泊沉积(图4,图5)。巴音戈壁组上段三岩段主要为扇三角洲-湖沼沉积,湖沼分布于整个矿床范围,主要为灰色、灰白色砂砾岩、泥岩,泥岩中含少量炭屑、黄铁矿等。巴音戈壁组上段二岩段扇三角洲主要由扇三角洲平原和扇三角洲前缘组成(图5)。扇三角洲平原主要发育水上分流河道、分流间湾及决口扇等。扇三角洲平原分流河道砂体具有粒度粗的特点,以砂质砾岩或砾岩沉积为主,发育叠瓦状构造和槽状交错层理,底界面为冲刷面,见滞留沉积的泥砾和植物茎干。分流间湾,以细粒沉积物充填为主,见植物茎干、根化石、动物潜穴,动物潜穴以粗大的垂直潜穴为特征(图6),代表了极浅水或周期覆水的沉积环境。扇三角洲前缘是扇三角洲的水下部分,以河口坝砂体或水下分流河道砂体与扇三角洲前缘泥构成的互层沉积,垂向上为倒粒序(图4)。扇三角洲前缘主要的微相为水下分流河道、河口坝。水下分流河道以灰色、褐黄色和褐红色砂岩为主,分选磨圆均较好,发育槽状交错层理,河道底部见滞留沉积。水下分流河道以中细粒沉积物为主,概率曲线以跳跃总体和悬浮总体为主,滚动总体较少;跳跃总体斜率为 45° ,分选中等。平均值(M_z)为1.24,粒度中等;分选系数(Σ)为0.90,分选中等;偏度(SK)为0.03,主峰偏于细;峰度(KG)为0.99,中等(近正态)。

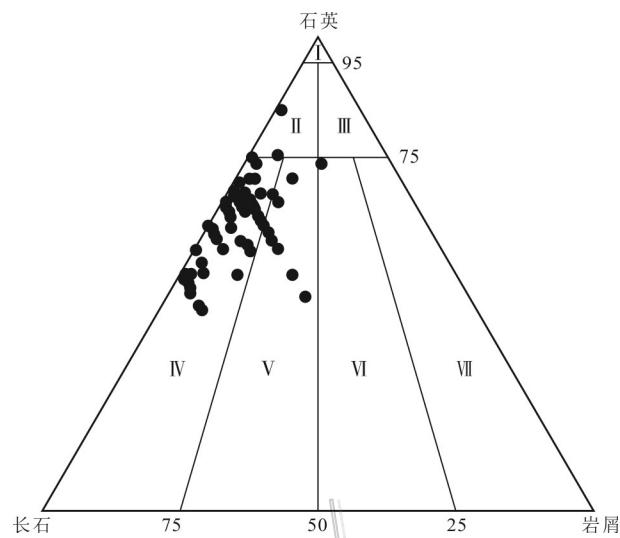


图3 巴音戈壁组上段砂岩三角图分类(福克砂岩分类)

I—石英砂岩; II—长石石英砂岩; III—长石砂岩; IV—岩屑长石砂岩; V—长石岩屑砂岩; VI—岩屑砂岩; VII—岩屑石英砂岩

Fig. 3 Triangular classification of sandstone in the Upper Bayin Gobi Formation (Folk sandstone classification)

I—Quartz sandstone; II—Feldspar quartz sandstone; III—Feldspathic sandstone; IV—Lithic-feldspathic sandstone; V—Feldspar lithic sandstone; VI—Lithic-sandstone; VII—Lithic-quartz sandstone

河口坝砂体与三角洲前缘泥互层(图7),可分为近端河口坝和远端河口坝。近端河口坝砂体成透镜状,底部冲刷现象明显,前缘泥所占比例较少。远端砂体比近端河口坝砂体薄,呈不连续的席状分布,前缘泥比例大。由于水动力强弱不同,近端河口坝的粒度比远端坝要粗。另外,由于河口坝或水下分流河道砂体在沉积时饱含孔隙水,所以在上覆沉积物荷载下容易形成水下滑塌构造,发育液化变形构造。三角洲前缘泥沉积与三角洲前缘河口坝呈互层(图7)。扇三角洲前缘泥实为扇三角洲沉积间歇期的湖侵沉积,在远端河口坝发育的时段,单层的扇三角洲前缘泥普遍较厚,而在近端河口坝发育的时段,扇三角洲前缘泥较薄。扇三角洲前缘泥具有与湖泊沉积成因相似,淡水动物化石发育。前扇三角洲分布在矿床南东部,整体呈东西向展布。滨浅湖沉积主要由深灰色、浅灰色泥岩、粉砂岩和薄层的砂岩组成,炭化植物碎屑较发育。矿床内的铀矿体主要赋存于扇三角洲平原亚相、扇三角洲前缘亚相中,在扇三角洲前缘泥中见有少量铀矿体(图5)。

2.3 层间氧化带特征

塔木素铀矿床巴音戈壁组上段3个岩段垂向上

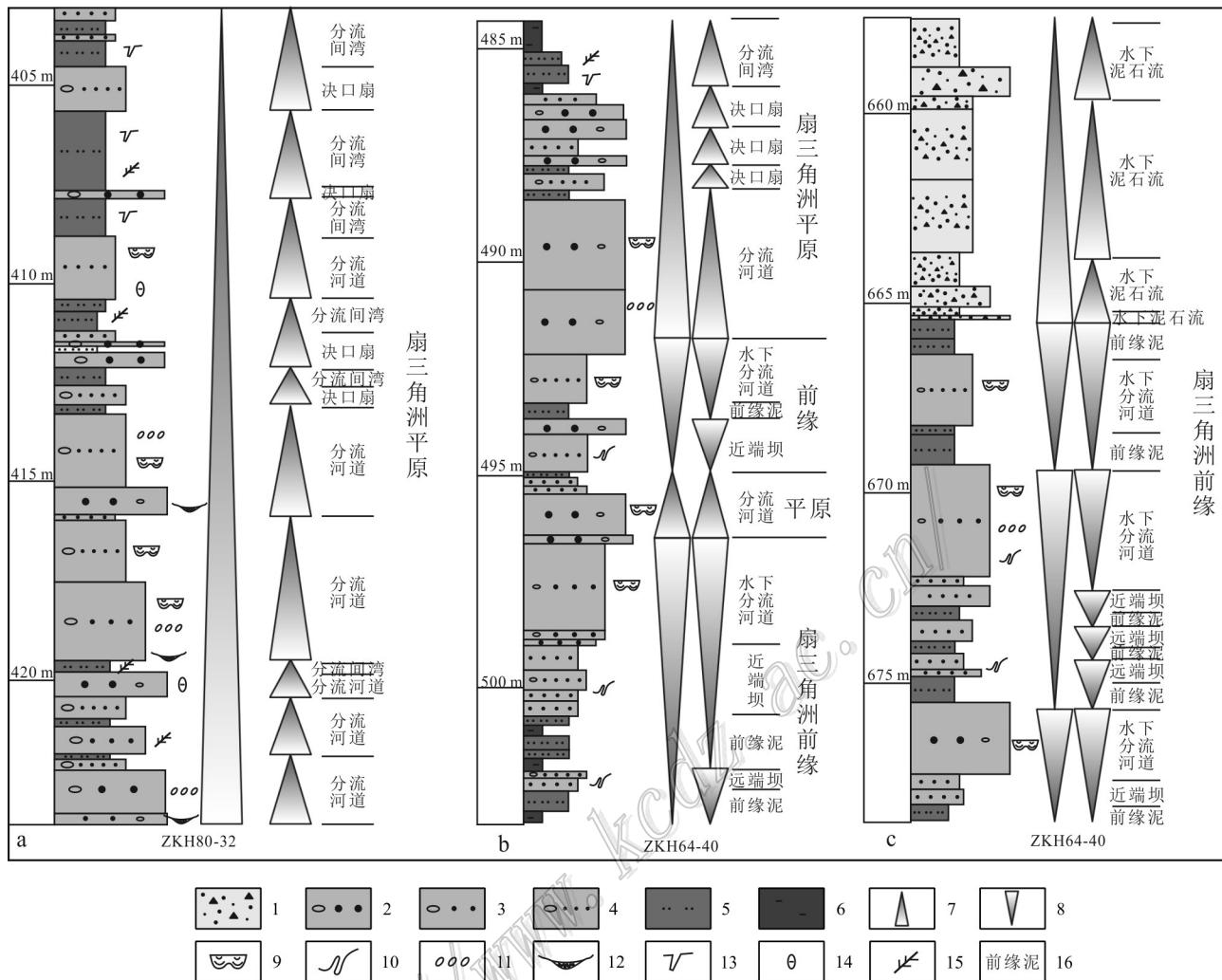


图4 巴音戈壁组上段二岩段扇三角洲平原及前缘沉积序列图

a. 扇三角洲平原沉积序列(ZKH80-32);b. 扇三角洲平原及前缘沉积序列图(ZKH64-40);c. 扇三角洲前缘沉积序列图(ZKH64-40)
1—水下泥石流;2—含砾粗砂岩;3—含砾中砂岩;4—含砾细砂岩;5—粉砂岩;6—泥岩;7—正粒序;8—倒粒序;9—槽状交错层理;
10—滑塌层理;11—叠瓦构造;12—冲刷面;13—动物潜穴;14—泥砾;15—植物茎秆;16—沉积微相

Fig. 4 Sequence diagram of fan delta plain and fan delta front in the 2nd member of Upper Bayin Gobi Formation

a. Sedimentary sequence of fan delta plain (ZKH80-32); b. Sedimentary sequence of fan delta plain and front (ZKH64-40); c. Sedimentary sequence of fan delta front (ZKH64-40)

1—Underwater debris flow; 2—Gravel-bearing coarse sandstone; 3—Gravel-bearing medium sandstone; 4—Gravel-bearing fine sandstone;
5—Siltstone; 6—Mudstone; 7—Normal grain sequence; 8—Down grain sequence; 9—Trough cross bedding; 10—Collapse bedding;
11—Imbricate structure; 12—Scour surface; 13—Animalburrow; 14—Mud gravel; 15—Plant stalk; 16—Sedimentary microfacies

构成稳定的“泥-砂-泥”地层结构(图8)。

层间氧化带发育在2个隔水岩层之间的含水层中。巴音戈壁组上段一岩段和三岩段以湖泊沉积为主,层间氧化作用较弱,层间氧化带主要发育于巴音戈壁组上段二岩段。剖面上,层间氧化带形态多为层带状。氧化带的发育程度受巴音戈壁组上段二岩段砂体渗透性控制。氧化带沿河道呈多层带状发

育,以褐黄色、褐红色粗砂岩、中砂岩、细砂岩为主,见染状褐铁矿化或褐铁矿化斑点。

从剖面来看,层间氧化带由北向南,厚度逐渐变小,埋深逐渐变浅。在北部,氧化砂体的厚度与含水层的厚度基本一致,向南氧化砂体的厚度变薄,小于含水层的厚度,逐步尖灭,氧化砂体厚度在75~150 m 内铀矿化较好。还原砂体厚度展布趋势与氧化砂体

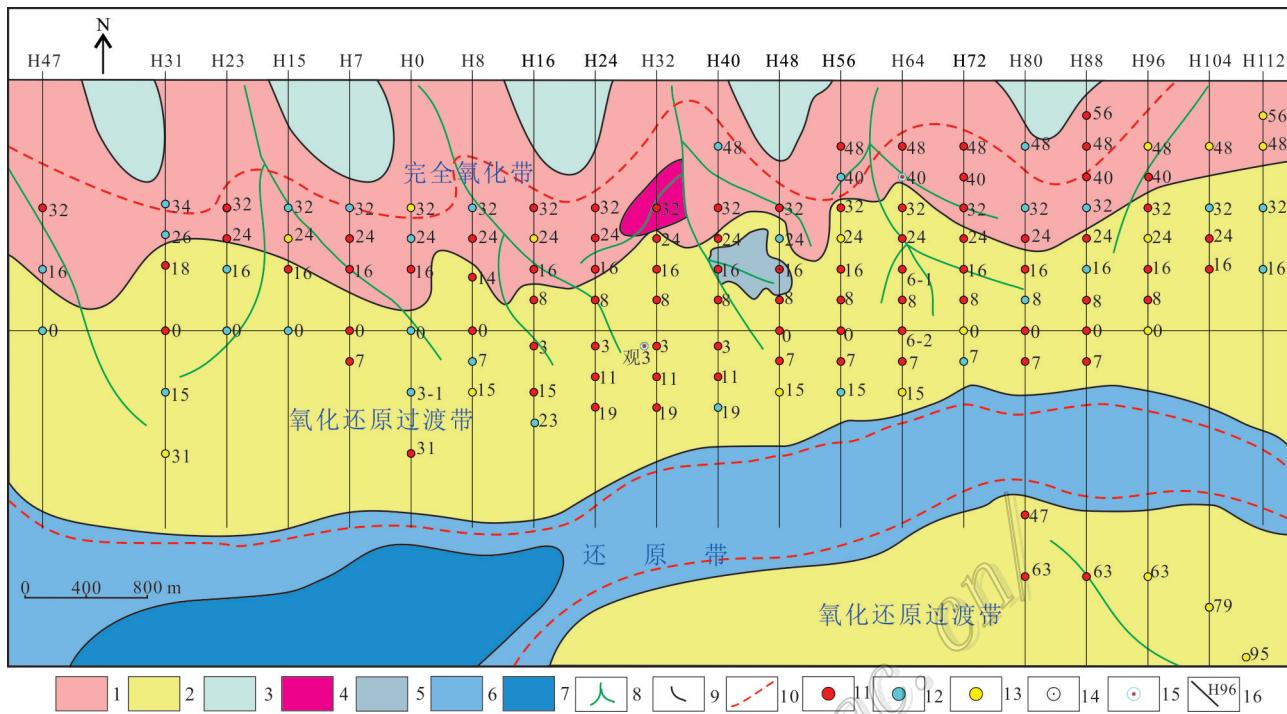


图5 巴音戈壁组上段二岩段沉积体系及岩石地球化学图

1—辫状分流河道; 2—水下分流河道+河口坝; 3—分流间湾; 4—决口扇和决口河道; 5—水下泥石流; 6—前缘泥; 7—浅湖; 8—主流线;
9—岩相界线; 10—完全氧化带/氧化还原过渡带/还原带界线; 11—二岩段工业铀矿孔; 12—二岩段铀矿化孔; 13—二岩段铀异常孔;
14—物探参数孔; 15—水文地质孔; 16—勘探线及编号

Fig. 5 Deposition system and petrogeochemical map of the 2nd member of Upper Bayin Gobi Formation

1—Braided distributary channel; 2—Underwater distributary channel + estuary dam; 3—Diverting bay; 4—Mouth fan and crevasse river;
5—Underwater debris flow; 6—Front mud; 7—Shallow lake; 8—Mainstream line; 9—Lithofacies boundary; 10—Complete oxidation
zone/redox transition zone/reduction zone; 11—2nd member industrial uranium ore hole; 12—2nd member uranium mineralized hole;
13—2nd member uranium mineralized hole; 14—Geophysical parameter hole; 15—Hydrogeological hole;
16—Exploration line and number

厚度展布趋势相反，在氧化砂体厚度大的地方还原砂体厚度小，还原砂体厚度在40~100 m时矿化较好。在矿床南部主要为前三角洲泥岩、粉砂岩，氧化不发育。氧化砂体比率展布与氧化砂体厚度展布具有一定的相似性，比率在40%~70%时铀矿化相对较好。铀矿化主要产于氧化砂岩与灰色砂岩和灰色泥岩接触部位(界面控矿)，在砂岩和泥岩中均有工业铀矿体的产出。平面上，层间氧化带水平分带明显，北部靠近盆缘一侧砂体完全氧化，发育完全氧化带，向湖盆方向逐渐过渡为氧化还原过渡带和还原带(图5)。氧化还原过渡带宽度大于2.0 km，氧化带前锋线近东西向展布，呈不规则蛇曲状，延伸大于7.0 km。巴音戈壁组上段铀矿化受层间氧化带控制，铀矿化位于氧化还原过渡带内，在氧化砂体厚度中等偏薄的地区最为有利。

3 铀矿化特征、流体动力学及成矿模式

矿床内铀矿化主要与层间氧化作用和扇三角洲沉积有关。铀矿体类型有砂岩型、砂泥混合型、后生泥岩型和同沉积泥岩型，主要为砂岩型和砂泥混合型(图9)。

在扇三角洲砂体和层间氧化作用发育情况下，多发育砂岩型铀矿体；在扇三角洲砂体发育，同时由横向相变泥岩隔层较多时，多发育砂泥混合型铀矿体；在扇三角洲平原分流间湾泥岩、粉砂岩发育较多时，在其裂隙和溶蚀孔洞中(水岩作用)发育后生泥岩型铀矿体；在三角洲前缘或前三角洲，由于泥岩沉积成岩过程中铀含量达工业铀矿化时，形成同沉积泥岩型铀矿体。矿床的矿体主要受矿床层间氧化作

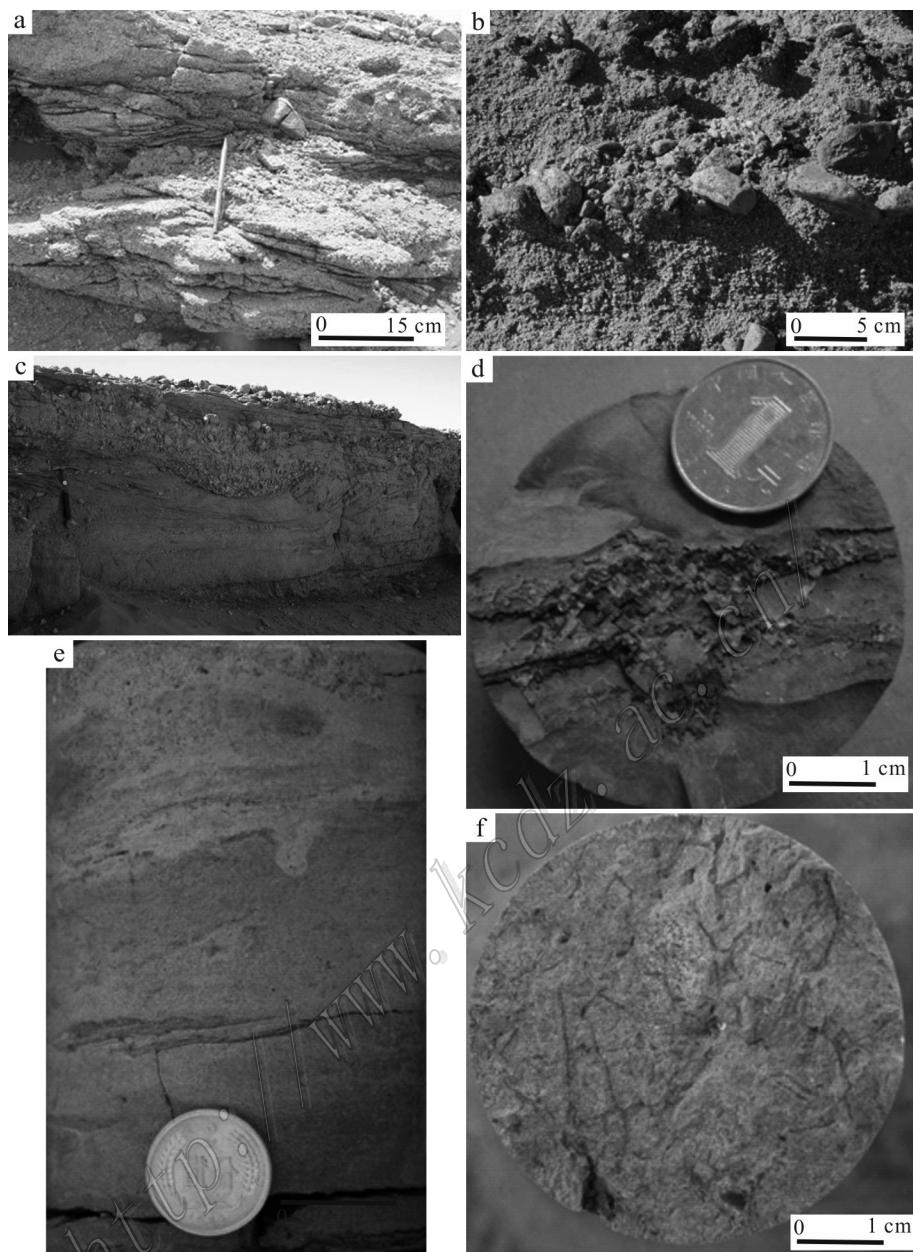


图6 巴音戈壁组上段二岩段扇三角洲平原沉积典型现象

- a. 扇三角洲平原分流河道槽状交错层理;b. 扇三角洲平原分流河道叠瓦状构造;c. 河道冲刷面;d. 分流间湾碳化的植物茎干;
e. 分流间湾发育的垂直动物潜穴;f. 分流间湾发育的植物根化石

Fig. 6 Typical sedimentary phenomena of fan delta plain in the 2nd member of Upper Bayin Gobi Formation

- a. Crisscross bedding of the fan delta plain distributary channel; b. Imbricate structure of the fan delta plain distributary channel; c. Scour surface of the channel; d. The carbonized plant stem of the distributary bay; e. Vertical animal burrows of the distributary bend; f. Plant root fossils of the distributary bend

用和沉积相相变制约。

3.1 矿体分布及铀矿化蚀变特征

矿床内的矿体主要分布于扇三角洲平原和扇三角洲前缘,零星分布于前三角洲泥岩中。矿床共发现矿体56个,这在同类型砂岩型铀矿中属于特例,如二

连盆地、鄂尔多斯盆地、松辽盆地和伊犁盆地等铀矿床均为简单板状、卷状,矿体较稳定(聂逢君等,2015;刘波等,2016;2017a;2017b;2018;丁波等,2017)。塔木素铀矿床矿体为砂岩型和砂泥混合型,其次为后生泥岩型和同沉积泥岩型。其中,砂岩型、砂泥混合型

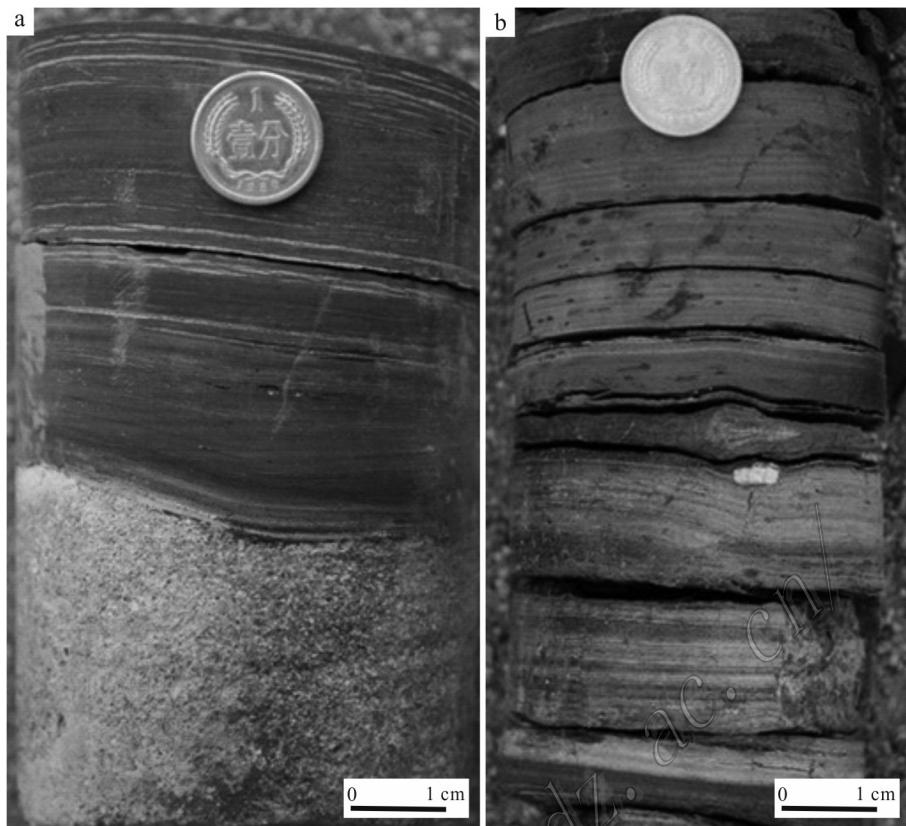


图 7 巴音戈壁组上段二岩段扇三角洲前缘沉积典型现象

a. 扇三角洲前缘泥与河口坝沉积; b. 扇三角洲前缘泥与粉砂岩互层

Fig. 7 Typical sedimentary phenomena of fan delta front in the 2nd member of Upper Bayin Gobi Formation

a. Mud and mouth bar deposits of fan delta front; b. Mud and siltstone interlayer of fan delta front

和后生泥岩型为后生成因,与沉积后期流体作用关系密切;同沉积泥岩型,为同沉积成因。

矿床主要的蚀变有赤铁矿化/褐铁矿化、白云石化、方解石化、石膏化、黄铁矿化、绿泥石化、萤石化等。赤铁矿化、褐铁矿化主要发育于层间氧化带内,在氧化带和氧化还原过渡带发育,主要表现为砂岩氧化呈黄色、褐红色,发育于成矿作用的整个阶段(图 10);白云石化、方解石化和石膏化,主要发生于沉积后期(成矿前期),在高热流的盆地内,含钙镁的热卤水交代先成的碳酸盐矿物和碎屑岩,主要表现为白云石交代方解石、交代碎屑物和方解石交代碎屑物,使得交代后,孔隙度增大,有利于后期铀矿物的充填。石膏主要发育在碎屑物间隙内,特别是在石膏很发育的地段,碎屑物粒间几乎全部为石膏,同时见石膏交代石英、斜长石及碳酸盐等。

成矿期主要的铀矿物为沥青铀矿、铀石和钛铀

矿,共生的主要矿物主要为黄铁矿、方铅矿等。矿床内的铀矿物主要以独立矿物的形式存在,见少量吸附态铀;矿床内的铀矿化主要的分布形式有 3 种:① 主要分布于矿物的解理内、矿物表面孔洞、矿物的周边、矿物的裂隙;② 分布于胶结物中;③ 分布于植物碎屑内。矿床内的黄铁矿主要为胶状、草莓状、花朵状和球粒状等,与铀矿化的关系密切。矿床内可见少量方铅矿,与铀矿化同期生成。成矿后期的蚀变矿物主要有萤石、石膏和铁氧化物。萤石主要发育于砂岩的胶结物中,可能与蚀源区花岗岩中含 F 矿物与砂岩中的钙质发生反应,在砂岩孔隙中沉淀,与成矿作用关系不明显;石膏的形态有 3 种,即顺层产出的石膏(沉积成因)、穿切层理呈脉状产出的石膏和较均匀地分布在砂岩胶结物中的石膏。石膏发育于成矿晚期,主要发育于岩石裂隙、层间软弱面和碎屑物间隙。石膏充填的裂隙系统为后生泥岩型铀矿化提供了通道和发育场所。

3.2 流体动力学及铀成矿模式

因格井凹陷为双断裂型,凹陷北部和南部均遭受了剥蚀,为残留盆地。下白垩统巴音戈壁组沉积后,盆地出现长时间沉积间断,与晚白垩世乌兰苏海组

呈微角度不整合。在早白垩世巴音戈壁组上段沉积期,因格井凹陷比较开阔,巴音戈壁组上段地层呈水平沉积。巴音戈壁组沉积后,盆地受古亚洲造山带和滨西太平洋的双向挤压,凹陷北部宗乃山-沙拉扎

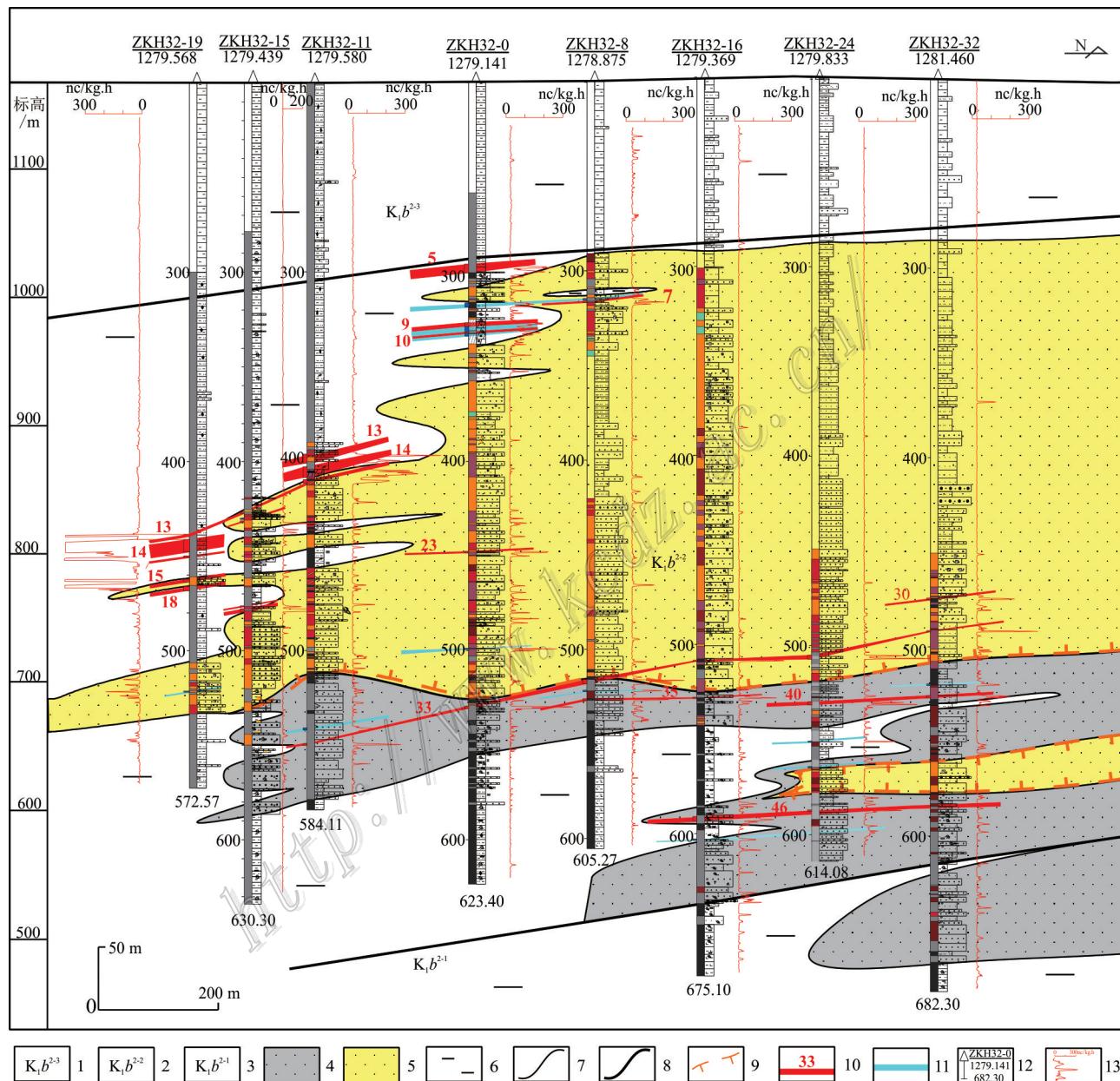


图8 塔木素铀32号线典型地质剖面图

1—巴音戈壁组上段三岩段;2—巴音戈壁组上段二岩段;3—巴音戈壁组上段一岩段;4—灰色砂岩;5—黄色氧化砂岩;6—泥岩;7—氧化边界线;8—一段界线;9—氧化带前锋线;10—铀矿体及编号;11—铀矿化体;12—钻孔孔号、标高及深度;13—伽玛曲线

Fig. 8 Typical geological section along No. 32 line of the Ttamusu uranium ore deposit

1—The 3rd member of the Upper Bayin Gobi Formation; 2—The 2nd member of the Upper Bayin Gobi Formation; 3—The 1st member of the Upper Bayin Gobi Formation; 4—Gray sandstone; 5—Yellow oxide sandstone; 6—Mudstone; 7—Themember boundary; 8—Sandstone boundary; 9—Oxidation front; 10—Uranium orebody and its serial number; 11—Uranium mineralized body; 12—Serial number, elevation and depth of the drill hole; 13—Gamma curve

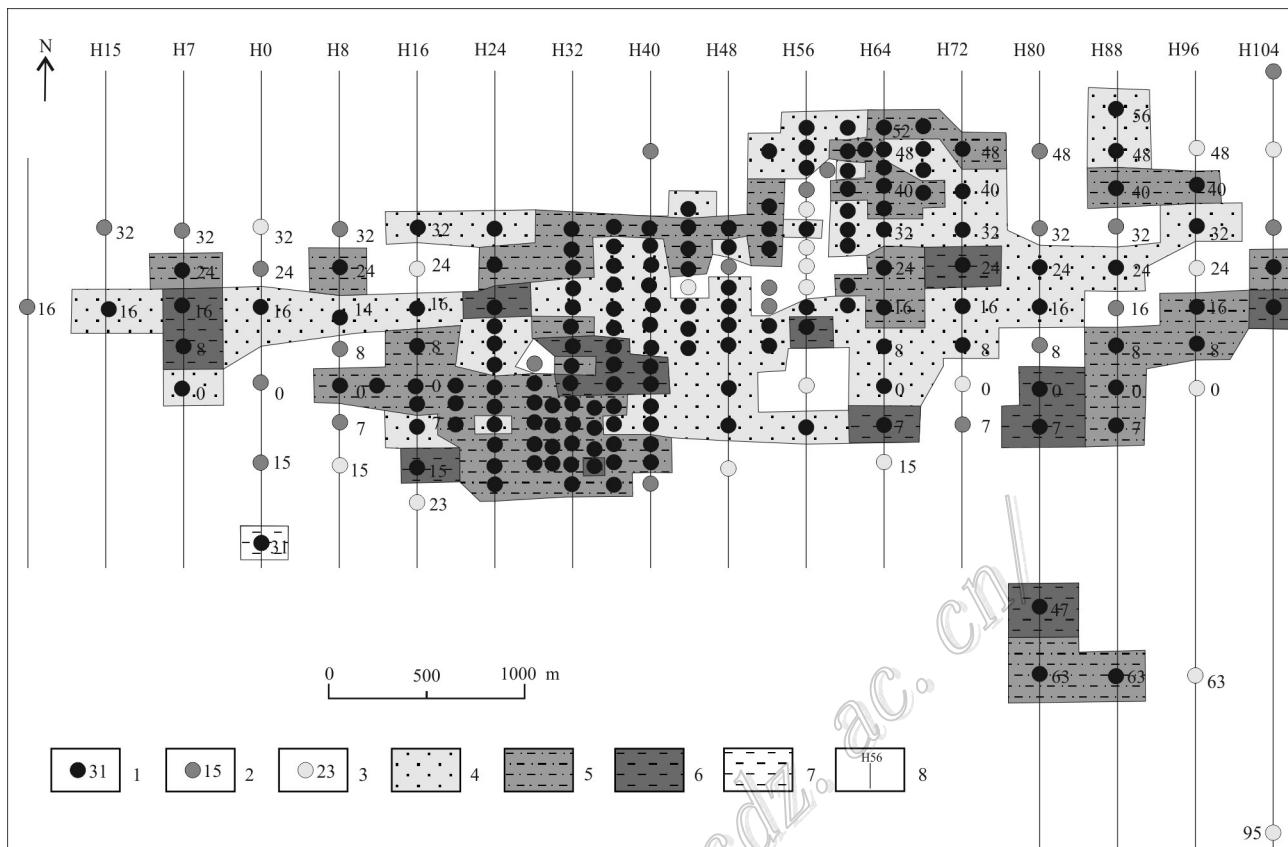


图9 塔木素铀矿床矿体类型平面分布图

1—工业铀矿孔;2—铀矿化孔;3—铀异常孔;4—砂岩型铀矿体;5—混合型铀矿体;6—后生泥岩型铀矿体;7—同沉积泥岩型矿体;
8—勘探线及编号

Fig. 9 Distribution of the types of orebodies in the Tamusu uranium deposit

1—Industrial uranium ore hole; 2—Uranium mineralization hole; 3—Uranium anomaly hole; 4—Sandstone type uranium orebody; 5—Mixed uranium orebody; 6—Epigenetic mudstone type uranium orebody; 7—Sedimentary mudstone type orebody; 8—Exploration line and its serial number

山隆起抬升明显,使得北部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期—晚白垩世长期的沉积间断,形成大型的剥蚀窗口。盆地内的含铀含氧水顺剥蚀窗口向盆地内运移,在巴音戈壁上段二岩段“泥-砂-泥”地层结构的约束下,与外部还原介质、砂体内本身的还原介质、还原(流)气体发生作用,形成铀矿体(图11)。

在晚白垩世乌兰苏海期,盆地进入坳陷期,在凹陷内沉积了乌兰苏海组,主要为一套曲流河-冲积平原沉积,形成了区域盖层;在古近纪,受喜山运动的影响,盆地由南西-北东发生抬升,凹陷南部地层整个抬升翘起,巴音戈壁组形成微向斜,在矿床东部缺失乌兰苏海组。通过对盆地内铀矿石矿物沥青铀矿进行年龄测定,铀成矿作用表现为3期:第一期早白垩世中晚((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);第三期为新近纪((2.5 ± 0.0) Ma~ (12.3 ± 0.2) Ma)(核工业二〇八大队,2015)。盆地内铀成矿作用表现为多期、多阶段,与区域构造热事件密切相关。在早白垩世中-晚期,盆地内伴随着恩格尔乌苏断裂的活动,同时有苏红图组火山岩的大面积喷发。据钟福平等(2011)对盆地内苏红图坳陷火山岩的 ^{39}Ar - ^{40}Ar 同位素测年可知,其火山岩的喷发年龄为(105.55 ± 4.03) Ma~(112.71 ± 2.06) Ma,为早白垩世喷发。伴随着火山喷发,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,该期氧化作用,伴随着后期氧化作用的改造,主要为赤铁矿化或在褐铁矿化中可见赤铁矿化斑点。从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。

矿物	围岩	成矿前	成矿期	成矿后期
石英 长石 云母 锆石 榍石 岩屑 黄铁矿	====			
白云石 方解石 石膏		=====		
褐铁矿 赤铁矿 黄铁矿 沥青铀矿 铀石 钛铀矿物 吸附态铀 方铅矿			====	
萤石 石膏 铁氧化物			—	=====

图10 塔木素铀矿床造岩矿物、蚀变矿物及铀矿物生成顺序示意图

Fig. 10 Schematic diagram of rock-forming minerals, altered minerals and uranium minerals in the Tamusu uranium deposit

晚白垩世晚期(80~65 Ma左右, 韩伟等, 2015; 刘溪等, 2017), 盆地经历了由北向南强烈的推覆作用(韩伟等, 2015; 刘溪等, 2017), 与盆地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, 层间氧化带的规模也较上期小, 表现为盆地内褐铁矿化分布较赤铁矿化分布范围小。该时期盆地古气候炎热干旱, 盆地蒸发量增强, 使得表生盐度高卤水向盆地内渗入, 在盆地内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(图11)。在盆地挤压抬升过程中, 深部有机流体(还原气体)向上运移(张成勇等, 2015), 还原气体与 SO_4^{2-} 发生反应生成黄铁矿, 该期主要特点为发育了大量的自形-半自形和分散浸染状黄铁矿。黄铁矿和植物炭

屑的还原作用导致矿质沉淀, 该期形成的铀矿体主要为砂岩型、砂泥混合型和后生泥岩型, 其中后生泥岩型主要与微裂隙、层间软弱面发育的黄铁矿还原作用有关。在新近纪, 受喜山运动影响, 盆地受南西到北东的整体剧烈抬升, 使得古近系、上白垩统在盆地南部遭受剥蚀, 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, 由于受红格尔-诺日公隆起的影响, 盆地内地下水由径流-弱径流, 转为滞水。从矿床现有水化学特征看, 盆地内水为古水和现代水的混合水, 为 SO_4^{2-} -Cl-Na型水。该时期由于气候持续干旱炎热, 在较封闭滞留水的环境下, 盆地内水岩作用强烈, 盆地内 NaCl型高矿化度地下水中的 Na^+ 替换了斜长石中的 Ca^{2+} , 使得斜长石由更长石转变为钠长石, 被替换出的钙离子与地下水中的 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 和 Mg^{2+} 形成白云石等碳酸盐矿物, 同时交代了原有的方解石, 在岩石中形成孔洞(王凤岗等, 2018)。该过程中发生的脱碳作用, 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。在受扩散作用影响, 水中的铀趋向于向水岩作用相对强烈地段迁移, 从而促使铀在特定的层位集中、富集。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。成岩后, 含 CO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} 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)。

4 矿体成因模型

矿床内铀矿体主要受层间氧化作用、地层结构、有机质控制。矿床内矿体个数多, 成因复杂。矿体主要有砂岩型、砂泥混合型、后生泥岩型和同沉积泥岩型。砂岩型、砂泥混合型和后生泥岩型铀矿体主要受层间氧化作用和有机质、深部流(气)体控制。砂岩型铀矿体发育于砂体比较好的扇三角洲平原分流河道、扇三角洲前缘水下分流河道中, 铀矿体主要位于氧化砂岩与灰色砂岩界面、氧化还原过渡带中(图8, 图12)。砂泥混合型铀矿体发育于扇三角洲分流河道与分流间湾、河道间泥岩结合的部位, 矿化发育于砂岩和泥岩中, 泥岩中发育微弱氧化作用(图

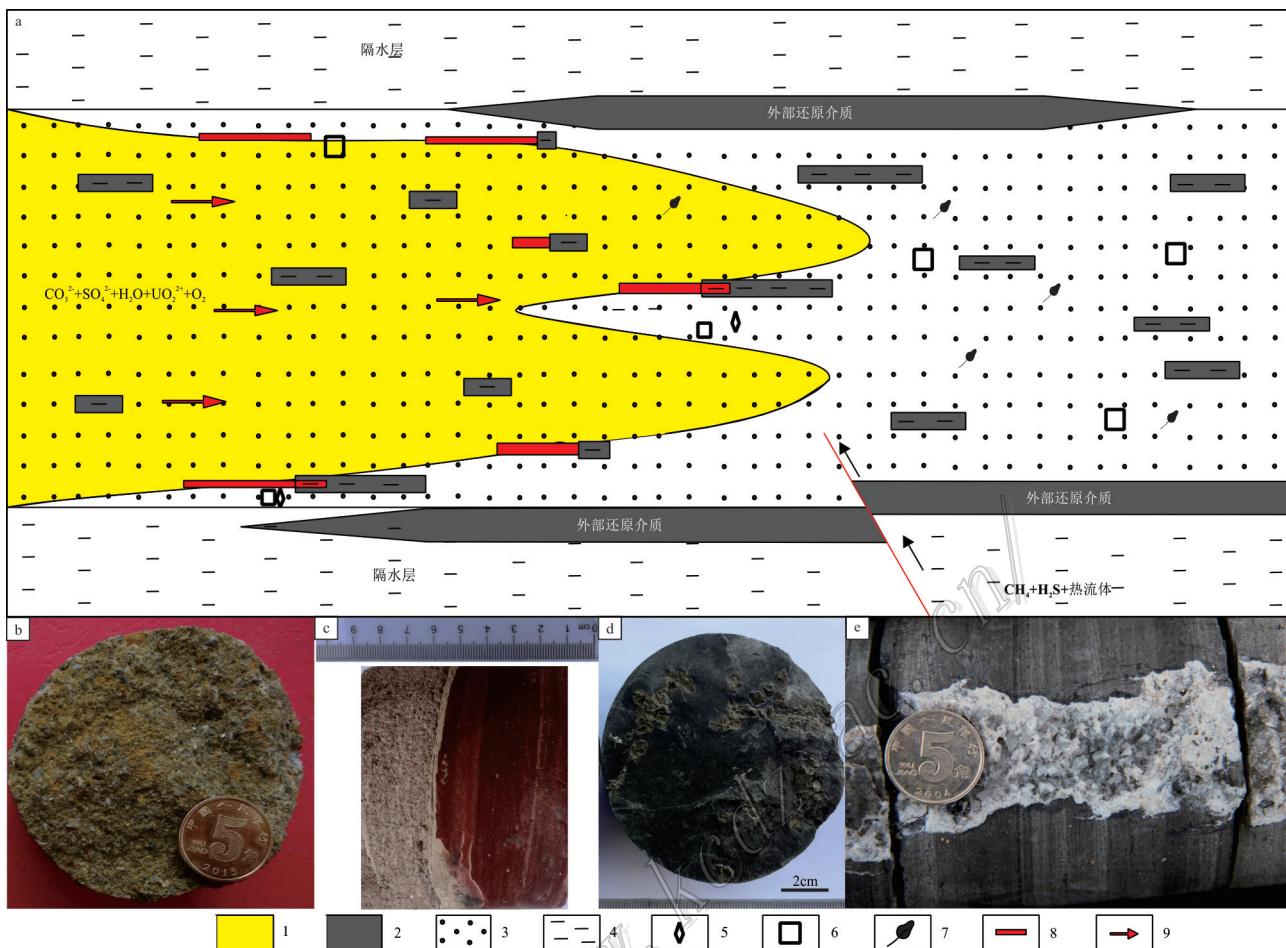


图11 巴音戈壁盆地塔木素铀矿床铀成矿模式示意图

a. 铀沉淀富集示意图;b. 黄色氧化砂岩;c. 氧化还原过渡带砂岩(砂泥混合型矿石);d. 后生泥岩型矿石;e. 裂隙中充填的碳酸盐化
1—氧化带;2—顶底板深灰色泥岩及灰色建造;3—辫状河三角洲砂体;4—泥岩;5—碳酸盐化;6—黄铁矿化;7—碳屑;
8—铀矿体;9—含铀含氧水

Fig. 11 Schematic uranium metallogenetic model of the Tamusu uranium deposit, Bayin Gobi basin

a. Diagram of uranium precipitation and enrichment; b. Yellow oxidized sandstone; c. Redox transition zone sandstone (sand mud mixed ore);
d. Epigenetic mudstone type ore; e. Carbonate carbonation filled in fissure

1—Oxide zone; 2—Deep gray mudstone and gray formation of top and bottom; 3—Braided river delta sand body; 4—Mudstone;
5—Carbonation; 6—Pyrite mineralization; 7—Carbon chip; 8—Uranium orebody; 9—Uraniferous water

12);后生泥岩型铀矿化发育于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,泥岩中见裂隙和溶蚀的孔洞,铀矿化主要发育于裂隙带附近黄铁矿化发育的泥岩孔洞中,泥岩裂隙中多见褐铁矿化。后生泥岩型铀矿化与层间氧化作用的关系密切,主要发育于扇三角洲平原分流间湾、分流河道间泥岩中。同沉积泥岩型铀矿化受早白垩世巴音戈壁组上段二岩段沉积作用的控制,泥岩的吸附作用较强,铀富集明显,形成泥岩型铀矿体。

5 结 论

(1) 塔木素铀矿床主要位于因格井凹陷内,凹陷为双断型。凹陷在早白垩世巴音戈壁组沉积后—晚白垩世乌兰苏海组沉积前,受宗乃山隆起间歇性抬升影响,地层掀斜抬升,遭受剥蚀,同时使得巴音戈壁组形成微向斜。晚白垩世乌兰苏海组沉积后,北部蚀源区持续隆升,上白垩统乌兰苏海组大部分被剥蚀,形成晚白垩世剥蚀窗口。

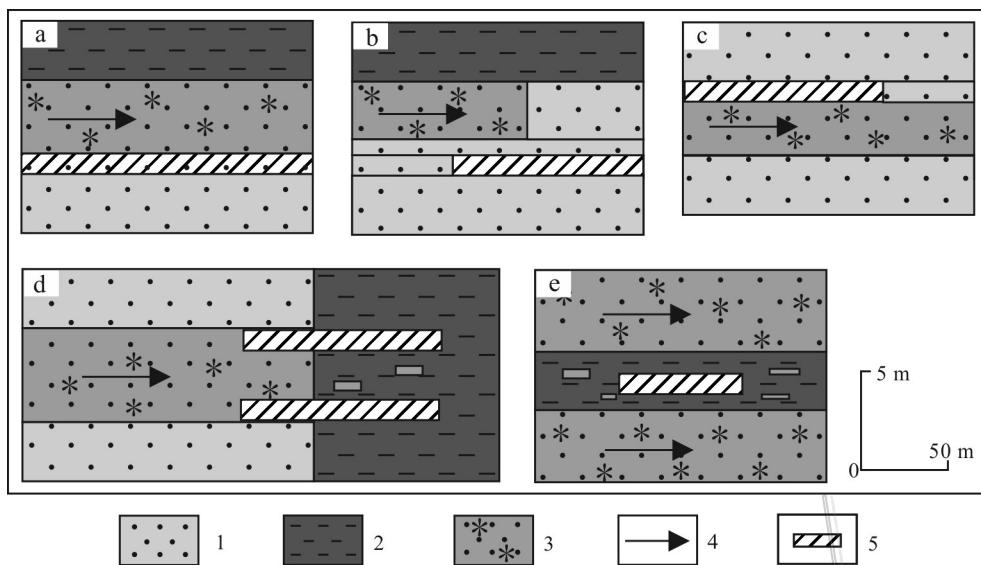


图12 塔木素铀矿床氧化带、铀储层及铀矿体成因模型

a~c. 砂岩型铀矿体氧化带、储层结构模型;d. 砂泥混合型铀矿体氧化带、储层结构模型;e. 后生泥岩型铀矿体氧化带模型
1—砂岩;2—泥岩;3—氧化砂岩;4—含铀含氧水及运移方向;5—铀矿体

Fig. 12 Genetic model of oxidation zone, uranium reservoir and uranium orebody in the Tamsu uranium deposit

a~c. Sandstone type uranium orebody oxidation zone and reservoir structure model; d. Sand and mud mixed uranium orebody oxidation zone, reservoir structure model; e. Post secondary mudstone uranium orebody oxidation zone model
1—Sandstone; 2—Mudstone; 3—Oxidized sandstone; 4—Migration direction of uranium- and oxygen-bearing water; 5—Uranium orebody

古近纪,受喜山运动影响,凹陷南西部抬升,晚白垩世乌兰苏海组在矿床南西部遭受严重剥蚀,在矿床南西部形成古近纪剥蚀窗口。剥蚀窗口的发育有利于后生含铀含氧水向盆地内运移成矿。

(2) 盆地内主要的目的层为下白垩统巴音戈壁组上段二岩段,为扇三角洲-湖沼沉积,其与巴音戈壁组上段一岩段、三岩段构成稳定的“泥-砂-泥”结构。内外部还原介质在一定程度上控制了层间氧化作用和铀成矿。巴音戈壁组上段一岩段、三岩段湖相暗色泥岩,深部的还原性流(气)体等,为铀成矿提供了间接还原介质。巴音戈壁组上段二岩段内发育的有机质、黄铁矿等为铀成矿提供了直接的还原介质。

(3) 层间氧化作用为盆地内铀矿床的主要铀成矿作用。铀成矿作用主要表现为多期多阶段性,与区域构造热事件密切相关。矿床蚀变矿物组合复杂,成矿前期蚀变矿物组合为白云石、方解石和石膏;成矿期主要的蚀变矿物组合为褐铁矿、赤铁矿、黄铁矿、沥青铀矿、铀石、钛铀矿物、吸附态铀和方铅矿;成矿后期主要蚀变矿物组合为萤石、石膏和铁氧化物。矿床内矿体为砂岩型、砂泥混合型、后生泥岩型和同沉积泥岩型,不同的氧化带和沉积相变控制矿体的产出。

(4) 矿床整体成因复杂、矿体类型多样,矿床的形成是层间氧化作用、地层结构、有机质和还原流(气)体等多因素耦合的结果。通过铀成矿模式和矿体模型的总结,为矿床成矿作用标志总结和盆地内其他地区勘查和战略选区提供借鉴。

致谢 野外期间得到核工业二〇八大队地勘三处同事的全力支持和帮助。匿名审稿人给予了好的意见及建议,使文章在原有基础上认识进一步提高,特此谢忱。

References

- Dang B, Zhao H, Lin G C, Wu K L, Kang X Y, Ge H Y, Wu B and Liu S H. 2011. Geochemistry and tectonic setting of Permian volcanic rocks in Yingen-Ejin Banner basin and its neighboring areas, western Inner Mongolia[J]. Geological Bulletin of China, 30(6): 923-931 (in Chinese with English abstract).
- Ding B, Liu H X, Xiu X Q, Liu T, Pan C Y and Zhang X. 2016. Metallogenetic fluid characteristics in relation to uranium mineralization in Mengqiguer uranium deposit, Xinjiang[J]. Mineral Deposits, 35 (3): 559-572 (in Chinese with English abstract).

- Guan W C, Liu X D and Liu P H. 2014. Study on the geological characteristics of claystone in Tamusu area of Bayingobi basin[J]. World Nuclear Geoscience, 31(2): 95-102(in Chinese with English abstract).
- Han W, Lu J C, Wei J S, Zhang Y P, Li Y H and Li Y. 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).
- Huang S J. 2018. Discussion on the forming condition of ultra-large and super large sandstone type uranium deposits[J]. Uranium Geology, 31(3): 129-133(in Chinese with English abstract).
- Li X C, Liu W S, Jia L C and Zhang C W. 2014. Prognosis and prospecting direction of sandstone-type uranium deposits in Tamusu area, Bayingobi basin[J]. Journal of East China Institute of Technology, 37(2): 158-163(in Chinese with English abstract).
- Liu B, Yang J X, Qin Y W and Zhang F. 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 B, Yang J X, Qiao B C, Tong B L and Zhang F. 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 B, Yang J X, Peng Y B, Kang S H, Qiao P, Lü C and Zhang F. 2017b. Study of structure and formation in uranium-bearing paleovalley and typical metallogenic models in eastern part of Erlian basin[J]. Mineral Deposits, 36(1): 126-142(in Chinese with English abstract).
- Liu B, Peng Y B, Kang S H and Qin Y W. 2018. Depositional characteristics and uranium metallogenic fluid dynamics of uranium bearing paleo-valley of Saihan Formation in Basiqi, Erlian basin[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 37(2): 316-325(in Chinese with English abstract).
- Liu C Y, Lin C S, Wu M B and Zheng M L. 2006. Tectonic evolution and petroleum prospects of the Mesozoic Inggen-Ejinqi basin, Inner Mongolia[J]. Geology in China, 33(6): 1328-1335(in Chinese with English abstract).
- Liu S, Zhang C Y, Nie F J, Hou S R and Li J B. 2017. Relationship of fluid transformation and uranium mineralization in Tamusu area of Bayingobi basin, Inner Mongolia[J]. Uranium Geology, 33(4): 199-205(in Chinese with English abstract).
- Liu X, Han W, Wei J S and Zhang Y P. 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).
- Lu J C, Zhang H A, Niu Y Z, Liu H C, Chen Q T and Wei J S. 2017. Carboniferous-Permian petroleum conditions and exploration breakthrough in the Yinggen-Ejin basin in Inner Mongolia[J]. Geology in China, 44(1): 13-32(in Chinese with English abstract).
- Lü X M, Ren Z L, Chen Q L, Li X B and Guan Y L. 2006. Basement structure of Yingen basin and its significance on basin evolution[J]. Coal Geology & Exploration, 34(1): 16-19(in Chinese with English abstract).
- Nie F J, Li M G, Deng J Z, Yan Z B, Zhang C Y, Jiang M Z, Yang J X, Kuang W Z, Kang S H and Shen K F. 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).
- No. 208 Geology Brigade of Nuclear Industry. 2015. Investigation, evaluation and exploration of uranium resources in Bayingobi basin, Inner Mongolia[R]. (in Chinese).
- Pan J Y, Liu C D, Guo G L, Chen A P, Chen F Z and Yan Z B. 2009. The discovery of selenium-bearing minerals in the tamusu sandstone-type uranium deposits, Inner Mongolia, China and its significance[J]. Acta Mineralogica Sinica, 29(1): 44-48(in Chinese with English abstract).
- Shi X J, Zhang L, Wang T, Xian X C, Tong Y, Zhang J J, Geng J I and Ye K. 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 X J. 2015. The tectonic affinity of the Zongnaishan-shalazhashan zone in northern Alxa and its implications: Evidence from intrusive and metamorphic rocks (dissertation for doctor degree)[D]. Supervisor: Xiao X C and Wang T. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences(in Chinese with English abstract).
- Wang F G, Hou S R, Zhang L, Men H and Wang J L. 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): 633-646(in Chinese with English abstract).
- Wu R G, Zhou W P, Liu P H, Hou S R, Wang Y J and Ma F S. 2008. Analysis of metallogenic condition and prospecting protential of sandstone type uranium deposit in Tamusu district of Bayingobi basin[J]. Uranium Geology, 24(1): 24-31(in Chinese with English abstract).
- Wu R G, Cai J F, Yu Z Q, Gong W J, Xu Z and Ning J. 2011. The hydrothermal alteration and mineral composition of Baixintu uranium deposit in Sonliao basin[J]. Uranium Geology, 27(2): 74-80(in Chinese with English abstract).
- Xia Y L, Zheng J W, Li Z Y, Li L Q and Tian S F. 2010. Metallogenic characteristics and metallogenic model of the Qianjiadian uranium deposit in Songliao basin[J]. Mineral Deposits, 29(Supp.): 154-155(in Chinese with English abstract).
- Xiao G X, Wen H L, Hou S W, Dai M J and Zhang G X. 2017. Controlling factors and genesis of Tamusu uranium deposit in Bayingobi basin, Inner Mongolia[J]. Global Geology, (4): 1124-1132(in Chinese with English abstract).
- Yu W B, Dong Q S, Zhou L Y, Zhu J F, Zhang Y and Li G P. 2008. The effect of reverse structure of faults on the mineralization of sand-

- stone-type uranium deposits in the southern Songliao basin[J]. *Uranium Geology*, 24(4): 195-200(in Chinese with English abstract).
- Zhang C Y, Nie F J, Hou S R, Wang J L, Deng W and Zhang L. 2015. Tectonic evolution characteristics of Bayingobi basin and its control on the mineralization of sandstone type uranium deposits[J]. *Uranium Geology*, 31(3): 384-388(in Chinese with English abstract).
- Zhang J X and Gong J H. 2018. Revisiting the nature and affinity of the Alxa block[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 34(4): 940-962(in Chinese with English abstract).
- Zhang W L and Fu X. 2002. Selection of prospecting target horizon for locating interlayer oxidation zone sandstone-type uranium deposits in Bayingobi basin[J]. *Uranium Geology*, 18(2): 85-88(in Chinese with English abstract).
- Zheng M L, Li M J, Cao C C and Zhang J Y. 2003. Superposed characteristics of cretaceous and Jurassic basins in Beishan-Alxa area[J]. *Geotectonica et Metallogenesis*, 27(4): 384-389(in Chinese with English abstract).
- Zhong F P, Zhong J H, Wang Y, You W F, Yang W L and Zheng M L. 2011. The Early Cretaceous volcanic rocks in Suhongtu depression in Yinggen-Ejina Qi basin: Its scientific significance to the research of Altun Fault[J]. *Earth Science Frontiers*, 18(3): 233-240 (in Chinese with English abstract).
- 卢进才,张洪安,牛亚卓,刘护创,陈清棠,魏建设. 2017. 内蒙古西部银额盆地石炭系一二叠系油气地质条件与勘探发现[J]. *中国地质*, 44(1), 13-32.
- 吕锡敏,任战利,陈启林,李相博,关银录. 2006. 银根盆地基底构造特征及其控盆意义[J]. *煤田地质与勘探*, 34(1): 16-19.
- 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.
- 潘家永,刘成东,郭国林,陈安平,陈法正,严兆彬. 2009. 内蒙塔木素砂岩型铀矿中硒矿物的发现与意义[J]. *矿物学报*, 29(1): 44-48.
- 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.
- 史兴俊. 2015. 阿拉善北部宗乃山-沙拉扎山构造带构造属性及意义(博士论文)[D]. 导师: 肖序常, 王涛. 北京: 中国地质科学院.
- 王风岗,侯树仁,张良,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): 633-646.
- 吴仁贵,周万蓬,刘平华,侯树仁,王永君,马福森. 2008. 巴音戈壁盆地塔木素地段砂岩型铀矿成矿条件及找矿前景分析. *铀矿地质*, 24(1): 24-31.
- 吴仁贵,蔡建芳,于振清,宫文杰,徐喆,宁君. 2011. 松辽盆地白兴吐铀矿床热液蚀变及物质组成研究[J]. *铀矿地质*, 27(2): 74-80.
- 夏毓亮,郑纪伟,李子颖,李林强,田时丰. 2010. 松辽盆地钱家店铀矿床成矿特征和成矿模式[J]. *矿床地质*, 29(s1): 154-155.
- 肖国贤,李文辉,候树文,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*, (4): 1124-1132.
- 于文斌,董清水,周连永,朱建峰,张毅,李国鹏. 2008. 松辽盆地南部断裂反转构造对砂岩型铀矿成矿的作用[J]. *铀矿地质*, 24(4): 195-200.
- 张成勇,聂逢君,侯树仁,王俊林,邓薇,张良. 2015. 巴音戈壁盆地构造演化及其对砂岩型铀矿成矿的控制作用[J]. *铀矿地质*, 31(3): 384-388.
- 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.
- 张万良,付湘. 2002. 巴音戈壁盆地层间氧化带砂岩型铀矿找矿目的层选择[J]. *铀矿地质*, 18(2): 85-88.
- 郑孟林,李明杰,曹春潮,张军勇. 2003. 北山-阿拉善地区白垩纪、侏罗纪盆地叠合特征[J]. *大地构造与成矿学*, 27(4): 384-389.
- 钟福平,钟建华,王毅,由伟丰,杨伟利,郑孟林. 2011. 银根-额济纳旗盆地苏红图坳陷早白垩世火山岩对阿尔金断裂研究的科学意义[J]. *地学前缘*, 18(3): 233-240.

附中文参考文献

- 党犇,赵虹,林广春,仵康林,康晓燕,葛海影,吴斌,刘少红. 2011. 内蒙古西部银根-额济纳旗盆地及邻区二叠纪火山岩的地球化学特征和构造环境[J]. *地质通报*, 30(6): 923-931.
- 丁波,刘红旭,修晓茜,刘涛,潘澄雨,张晓. 2016. 新疆蒙其古尔铀矿床成矿流体特征及其与铀成矿的关系[J]. *矿床地质*, 35(3): 559-572.
- 管伟村,刘晓东,刘平辉. 2014. 巴音戈壁盆地塔木素地区黏土岩地质特征研究[J]. *世界核地质科学*, 31(2): 95-102.
- 韩伟,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]. *地质学报*, 89(12): 2277-2285.
- 核工业二〇八大队. 2015. 内蒙古巴音戈壁盆地铀矿调查评价与勘查[R].
- 黄世杰. 2018. 我国特大、超大型砂岩型铀矿形成条件探讨[J]. *铀矿地质*, 31(3): 129-133.
- 李晓翠,刘武生,贾立城,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.
- 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.
- 刘波,彭云彪,康世虎,秦彦伟. 2018. 二连盆地巴赛齐赛汉组含铀古