

哈萨克斯坦楚—萨雷苏盆地砂岩型铀矿床地质—水文地质条件及地浸工艺

马亮¹⁾, 张子敏¹⁾, 张建¹⁾, 刘玉龙¹⁾, 冯晓曦²⁾

1) 中广核铀业发展有限公司, 北京, 100029; 2) 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津, 300170

内容提要: 楚—萨雷苏盆地位于中亚哈萨克斯坦东南部, 是全球最著名的产铀盆地之一。本文从区域地层和大地构造背景出发, 分析了该盆地铀成矿条件和铀矿化时空分布特征, 总结了典型矿床的品位、厚度、埋深、形态、矿物成分、化学成分及渗透性、富水性等地质—水文地质方面的特点, 结合该地区普遍采用的地浸采铀工艺, 探讨了其地浸开采规模化、标准化和低成本的原因, 并借鉴哈萨克斯坦在砂岩型铀矿勘查、采冶过程中的先进理念和实践经验, 为我国盆地铀资源的研究和开发提出了建议。

关键词: 哈萨克斯坦; 楚—萨雷苏盆地; 砂岩型铀矿床; 地质—水文地质条件; 地浸工艺

中亚哈萨克斯坦是全球最大的产铀国, 2015 年天然铀产量 23800t (世界核协会 (WNA), 2016), 占全球总产量的 39%, 全部来自低成本的地浸开采, 其中大部分产自楚—萨雷苏盆地。该盆地面积超过 150000km², 盆地内拥有门库杜克、英凯、莫英库姆、布琼诺夫、乌瓦纳斯、坎茹干、阿克达拉等世界著名的超大型和大型地浸砂岩型铀矿床, 是全球最著名的产铀盆地之一, 累计可地浸铀矿资源/储量 1.40Mt 以上, 占哈萨克斯坦全国砂岩型铀矿资源/储量的 60.5% (姚振凯等, 2015)。地浸矿山设计产能超过 16000 吨, 占哈萨克斯坦地浸产能份额近 70%, 是中亚乃至世界的天然铀生产中心, 并拥有全世界最先进的地浸采铀技术和生产管理体系, 对全球天然铀市场有着举足轻重的影响, 是我国铀资源开发“走出去”和地浸采铀技术“引进来”的重要目标区域。

有关该盆地铀资源的研究, 过去国内的报道侧重于区域成矿规律和微观层次成矿作用方面, 对矿床的时空分布特征、地质矿化特点、地质—水文地质条件, 以及先进的地浸采铀工艺技术则鲜有报道。笔者曾连续多年在中哈合资地浸铀矿山一线工作, 期间接触到较丰富生产技术资料和历史勘查资料, 并借此机会对楚—萨雷苏盆地铀矿床的时空分布特征、地质—水文地质条件及地浸采铀工艺进行了研

究, 目的是借鉴哈萨克斯坦在砂岩型铀矿勘查和地浸开采过程中的先进理念和实践经验, 为我国盆地铀资源的研究和开发提出建议。

1 盆地典型矿床地质及矿化特征

1.1 盆地大地构造剖面结构

楚—萨雷苏盆地大地构造位于亚欧东西向活化构造带天山造山带西段卡拉套次造山带北东缘 (姚振凯等, 2015), 大地构造剖面呈三层结构 (图 1), 下构造层由强烈褶皱的前寒武纪和早古生带地层组成, 属加里东期褶皱基底, 埋深 2~3km, 为一套被早古生代基性岩和辉长—闪长岩侵入体贯入的地槽构造层; 中构造层为晚泥盆世—二叠纪的弱褶皱地层, 属过渡的半地台沉积层, 埋深 220~450m; 上构造层为中、新生代呈近水平状产出地台盖层, 主要为一套晚白垩世的陆相灰色细砾—砂质—杂色粘土建造和古近纪的滨海相灰色砂—粘土建造。所有砂岩型铀矿床均产于上构造层, 在上白垩统门库杜克组、英库杜克组、扎尔巴克组以及古新统乌瓦纳斯组、始新统乌尤克组等富铀地层组内, 有多个岩性稳定、厚度大的富铀层产出。

1.2 盆地层间氧化带及铀矿化特征

层间氧化带砂岩型铀矿床的成矿作用和矿化特

注: 本文为国家重点基础研究发展计划“中国北方巨型砂岩铀成矿带陆相盆地沉积环境与大规模成矿作用” (编号: 2015CB453006) 的成果。

收稿日期: 2016-06-12; 改回日期: 2017-06-27; 责任编辑: 章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2017.04.012

作者简介: 马亮, 男, 1979 年生。高级工程师, 长期从事铀矿勘查与开发工作。ltma628@sohu.com。

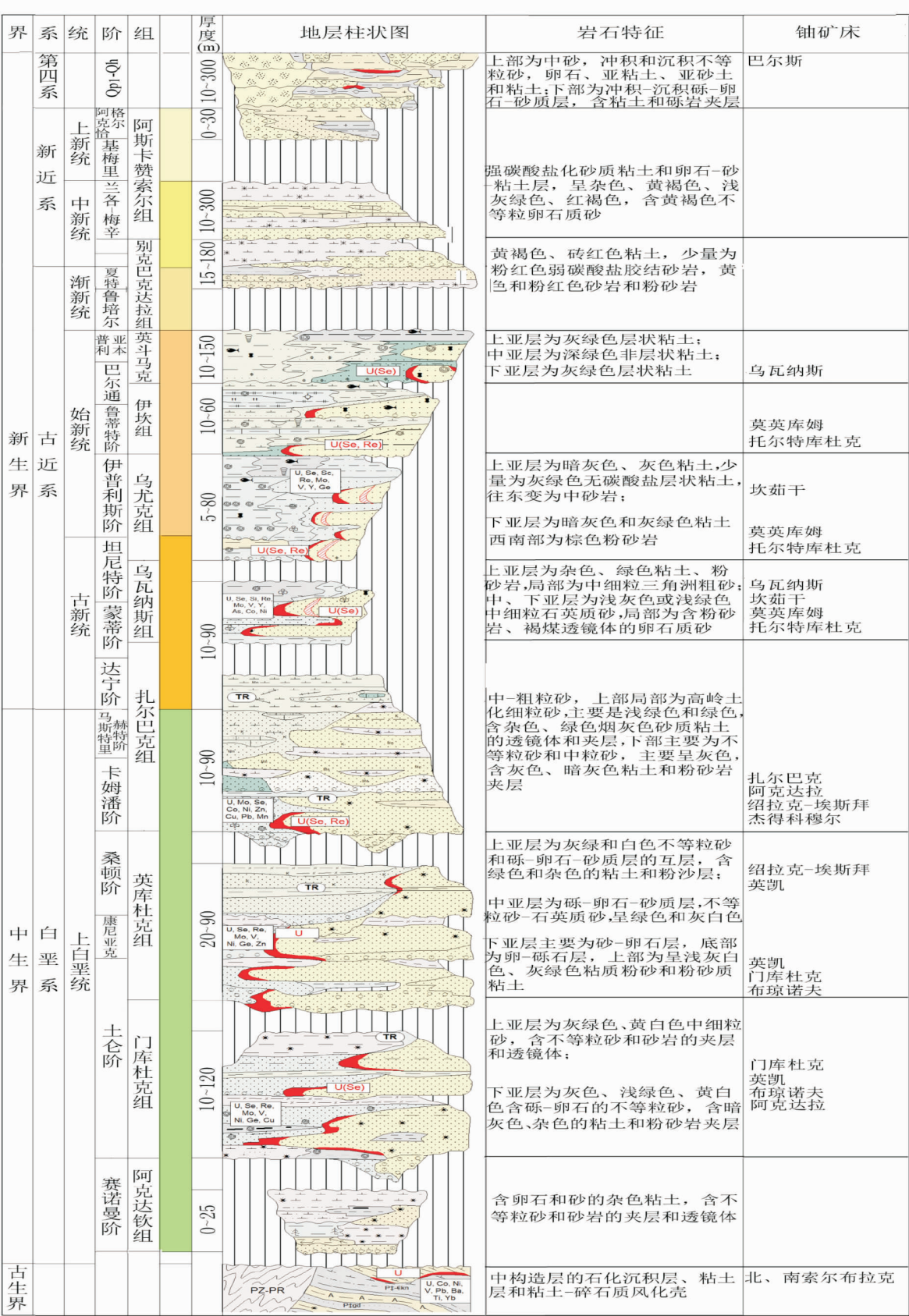


图 1 哈萨克斯坦楚萨雷苏盆地沉积地层柱状图(据哈萨克斯坦原子能工业总公司,2010,修改)

Fig. 1 Sedimentary stratigraphic column in Chu—Careisu basin, Kazakhstan (modified according to Kaztomprom,2010)

表 1 哈萨克斯坦楚—萨雷苏盆地主要矿床矿体参数一览表(据 Берикблов 等^①; 张子敏等^{②③})

Table 1 Ore body Parameters of main deposits in Chu—Careisu basin, Kazakhstan

(Data from Берикблов et al. ^①; Zhang Zimin et al. ^{②③})

矿床	资源规模	主矿体个数	矿体长度 (km)	矿体宽度(m)	矿体厚度(m)	矿体埋深(m)	品位(%)	勘查进尺 (× 10 ⁴ m)
英凯	超大型	7	9 ~ 31	250 ~ 350	5 ~ 7. 5	300 ~ 515	0. 045 ~ 0. 063	300
门库杜克	超大型	30	36. 3	20 ~ 500	4. 5 ~ 6. 5	270 ~ 450	0. 01 ~ 0. 09	250
布琼诺夫	超大型	不详	> 20	50 ~ 1500	7. 4	530 ~ 670	0. 055 ~ 0. 103	> 100
南英凯	大型	4	20	50 ~ 600	4. 4 ~ 7. 3	460 ~ 520	0. 04 ~ 0. 045	
扎尔巴克	大型	8	3 ~ 22	25 ~ 850	0. 5 ~ 15	125 ~ 145	0. 012 ~ 0. 4	36. 5
坎茹甘	大型	24	1 ~ 2	200 ~ 2000	0. <i>n</i> ~ 10	200 ~ 300	0. 03 ~ 0. 07	
莫英库姆	大型	> 20	20	200 ~ 1000	0. <i>n</i> ~ 10	200 ~ 500	0. 0 <i>n</i> ~ <i>n</i>	
乌瓦纳斯	大型	26	10	1 ~ 1500	2 ~ 7	82 ~ 126	0. 02 ~ 0. 04	35. 6

征,通常与层间氧化带的发育过程和空间展布密切相关,矿化严格受氧化带前锋线控制。楚—萨雷苏盆地为一大型渗入型自流水盆地,具有优越的层间氧化带发育和成矿条件,这一点多国学者已取得了大量研究成果(Печенкин, 2003; Кисляков, Щеточкин, 2012;; 姚振凯等, 2015): ①大地构造位于亚欧东西向活化构造带天山造山带西段卡拉套次造山带北东缘,盆地基底为前寒武纪花岗—变质岩富铀建造,盆地蚀源区发育早古生代富铀黑色岩系(局部铀含量达 0. 01% ~ 0. 02%) 和晚古生代富铀的火山岩建造和浅色花岗岩(铀含量达 $10 \times 10^{-6} \sim 17 \times 10^{-6}$, 发育多个内生工业铀矿床), 为盆地中新世代砂岩型铀矿的形成提供了充足的铀源保证; ②盆地盖层上白垩统和古近系为构造稳定的地台阶段沉积, 多为河流相、三角洲相的灰色、杂色不等粒砂体, 具有胶结疏松、成岩度低、渗透性高的特点, 为层间氧化带的发育和铀的迁移聚集提供了优越的物质基础和空间条件; ③新生代以来适度的弱构造活化, 使区域内古水文地质补—径—排关系长期稳定, 且区域性分布的有机质含量和硫化物含量低(表 2), 为铀成矿提供了优越的水动力和水文地球化学环境, 有利于氧化带的持续、快速发育和铀的迁移聚集。

在上述诸多有利条件的协同作用下,形成了规模巨大的区域性层间氧化带,并伴随着大规模的铀成矿作用。目前已查明盆地上白垩统氧化前锋带沿走向延伸可达 400 km, 宽可达数十千米(古近系海相地层中的层间氧化带规模相对较小), 并控制着超大型、大型矿床密集分布(表 1)。单个矿床铀资源规模为 10 ~ 300 kt 不等, 铀矿化沿氧化带前锋线可延伸至 20 ~ 30km 以上, 在平面图上呈弯曲带状

展布,矿体宽度一般 50 ~ 800m,局部可达 2 km, 有时形成长宽 1. 5 ~ 2 km 等轴状矿体。铀矿体在剖面上呈现“卷状”特点, 且具有明显的多层矿化特征(图 1、图 2), 矿石品位 0. 035% ~ 0. 07%, 局部可达 0. *n*%, 甚至达到 *n*%。矿体平均厚度大, 一般 3 ~ 8 m, 平米铀量高, 多在 3 ~ 7. 5 kg/m² 之间。

表 2 哈萨克斯坦楚萨雷苏盆地典型矿床矿石矿物成分(%)

(据张子敏等^{②③})

Table 2 Ore mineral composition(%) of typical deposits in Chu—Careisu basin, Kazakhstan (According to Zhang Zimin et al. ^{②③})

酸溶液的 溶解性	矿物	扎尔巴克 矿床	门库杜克 矿床
非溶组分	石英	76. 89	68. 14
	硅质岩碎屑	6. 63	13. 69
	重矿物	0. 17	0. 04
	小计	83. 69	81. 87
难溶组分	长石	6. 33	9. 87
	黑云母、白云母	0. 18	1. 42
	高岭石	4. 44	2. 94
	蒙脱石	1. 71	2. 73
	针铁矿、水针铁矿	1. 45	0. 31
	炭化有机质碎屑	0. 23	0. 05
	小计	14. 34	17. 32
可溶组分	黄铁矿和白铁矿	1. 77	0. 25
	方解石、菱铁矿	0. 14	0. 50
	铀石	0. 06	0. 01
	沥青铀矿	—	0. 05
	小计	1. 97	0. 81
共计		100. 00	100. 00

盆地铀矿床分布的一个重要特征,是垂向上呈明显的多层矿化(图 1、图 2), 可划分为晚白垩世陆相沉积和古近纪滨海相沉积两个大的层位, 两层矿

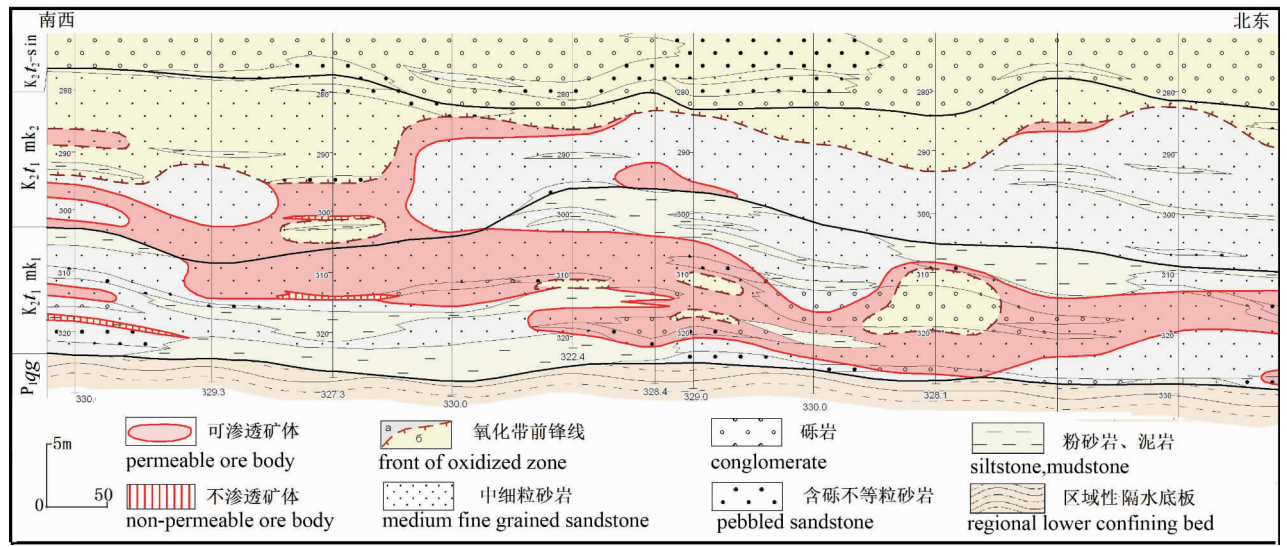


图 2 门库杜克矿床地质剖面(据哈萨克斯坦原子能工业总公司,2010,修改)

Fig. 2 Geological profile of the Menkydyk deposit (modified according Kaztomprom,2010)

化呈现出明显的分化特点。相比晚白垩世陆相沉积中发育的门库杜克、英凯、布琼诺夫等全球著名的超大型、大型矿床而言,产于古近纪海相地层乌瓦纳斯组、乌尤克组中的铀矿床在规模、品位、厚度、渗透性等方面相对较差,其原因可能与古近纪海相地层中的粘土含量增多,渗透性相对较差(表 4),氧化带的发育速度和成矿作用相对减弱相关。

1.3 典型矿床矿石矿物成分和化学成分

砂岩型铀矿床矿石的矿物成分和化学成分,是决定地浸开采技术经济可行性的重要因素,对地浸开采溶浸液配方和酸耗量大小有着决定性影响。楚—萨雷苏盆地主要矿床,特别是产于上白垩统的门库杜克组、英库杜克组、扎尔巴克组的矿床,按矿石矿物成分而言,铀矿物以沥青铀矿和铀石为主,呈

表 3 哈萨克斯坦楚萨雷苏盆地典型矿床矿石化学成分(%)及与中国伊犁盆地典型矿床的比较(据张子敏等^{②③};张占峰等^④)

Table 3 Comparison of ore chemical composition (%) of typical deposits between Chu—Careisu basin,

Kazakhstan, with Ili basin, China (From Zhang Zimin et al. ^{②③} ; Zhang Zhanfeng et al. ^④)											
矿床	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	共计
哈萨克斯坦楚萨雷苏盆地中门库杜克	0.15	7.27	83.87	0.03	2.49	0.34	0.22	0.00	1.17	1.03	96.57
哈萨克斯坦楚萨雷苏盆地扎尔巴克	0.19	7.74	86.38	0.02	1.89	0.25	0.17	0.00	1.47	0.78	98.89
中国伊犁盆地蒙古尔	0.43	7.59	83.17	0.07	2.20	0.89	0.36	0.04	11.05	0.27	96.07

表 4 楚—萨雷苏盆地含矿含水层水文地质参数表

Table 4 Hydrogeological parameters of Ore bearing aquifer in Chu—Careisu basin

含水层名称	含矿围岩	含水层厚度 (m)	顶板承压 水头(m)	流量 (L/s)	降深 (m)	渗透系数 (m/d)	导水系数 (m ² /d)	矿化度 (g/L)	水化学类型
塔兰斯 卡一切冈	细粒砂	3.8~12		0.004 ~1.0	4.3~1.5	0.007 ~2.8	0.027 ~28	4.5~6.8	SO ₄ —Cl—Na
乌瓦纳斯	细粒砂	5~15	49~65	0.3~3.0	12~45	0.4~2.3	10~41	1.1~3	SO ₄ —Cl—Mg—Na
扎尔巴克	中粒、不等粒砂	40~80	63~78	1.1~2.7	6.3~14.6	1.5~4.0	20~140	3.9~6	SO ₄ —Cl—Na
英库杜克	含砾不等粒砂	35~75	62~86	3.5~7.7	2.7~10.3	3.7~13	40~850	3.9~6	SO ₄ —Cl—Na
门库杜克	中粒、不等粒砂,砾石	40~65	59~86	2.5~9.2	2.0~9.0	5.0~20	270~860	3.3~6	SO ₄ —Cl—Na

分散状和细浸染状, 矿石胶结程度低, 非常疏松, 以非溶组分和难溶组分为主(表 2), 主要脉石矿物为石英和长石, 特征矿物含量低。按化学成分而言(表 3), 归为硅酸盐型, 呈明显的低铁($\text{Fe 总} < 1.8\%$)、低碳酸盐(CO_2 含量 $0. n\%$)、低有机碳($< 0.0n\%$)特征, P_2O_5 和其他对地浸开采“有害”的组分含量也很低, 矿石工业类型可归为特征矿物含量低的含铀碎屑岩和高硅酸盐型铀矿石, 属易浸出类型。

总之, 楚—萨雷苏铀矿床地质条件优越, 特别是产于上白垩统的铀矿床, 资源规模大、分布集中, 矿体形态简单、连续性好、厚度大, 品位和平米铀量较高, 勘探程度高(如英凯矿床的勘查进尺超过 300 万 m, 表 1), 资源可靠性高, 矿石的矿物成分和化学成分相对简单, 碳酸盐和其他“有害”组分含量低, 属于易浸出矿石类型, 资源规模和品质在全球首屈一指, 非常有利于规模化地浸开采。

2 盆地典型矿床水文地质条件及评价

对产于中新世盆地的砂岩型铀矿来说, 水文地质条件不仅对矿床的形成至关重要, 并是找矿的重要依据, 且对地浸开采有着决定性影响。水文地质条件包括含矿含水层的结构、数量、特征、渗透性、富水性, 地下水静水位、流向、流速和水化学成分, 以及含水层间水力联系、隔水层分布与隔水性能等一系列因素和条件。其中矿石和围岩的渗透性占首要位置, 是决定矿床是否可地浸开采的先决条件, 也是影响矿床地浸技术经济指标的重要因素。基于这一点, 前苏联及哈萨克斯坦在地浸砂岩型铀矿床勘查过程中, 将矿石的“渗透性”指标作为储量计算的一项必须边界条件。如楚萨雷苏和锡尔达林盆地的层间氧化带砂岩型铀矿床, 普遍以渗透系数 1m/d 作为储量计算的边界条件之一, 矿层渗透系数低于 1m/d 的矿石, 必须从矿体中剔除, 或圈为低渗透矿体。这一点对提高资源回收率、减少“呆矿”有重要

意义, 建议我国铀矿勘查部门研究借鉴, 探讨设置适合我国地浸砂岩型铀矿的“渗透边界”指标, 具体数值应由铀矿勘查和采冶部门专题研讨确定。

2.1 盆地含矿含水层水文地质特征

楚—萨雷苏盆地沉积盖层, 在纵剖面上可划分为 2 个大的水文地质单元: 上部为中—新生代盖层沉积中的潜水和承压孔隙水, 下部为古生代建造中的层状裂隙水。其中上部水文地质单元可进一步划分为两层含水岩组: 新近纪沉积层孔隙潜水含水岩组和晚白垩世及古近纪沉积层承压水含水岩组。根据地层特征、岩性组成、埋藏条件, 以及补径排关系, 含矿的上白垩统及古近系承压水含水岩组可进一步划分出塔萨兰斯卡—切冈、乌瓦纳斯、扎尔巴克、英库杜克、门库杜克等 5 个含水层(表 4)。

2.2 典型矿床地浸水文地质条件分析

盆地上白垩统的主要含矿层, 实质上是一个具有统一水力联系的厚大含水层, 具有典型的泥—砂—泥结构, 顶板为古近纪的粘土层, 底板为二叠纪的粉砂岩、泥质板岩。含水层在垂向上可以分为 3 个亚层, 分别为扎尔巴克、英库杜克和门库杜克亚层。各含矿含水层主要由中—细砂夹不等粒砂质夹层及砾石透镜体组成, 粒度组成总体变化不大(表 5), 渗透性高、富水性强, 平均渗透系数达到 7m/d 以上(表 6), 钻孔抽注液能力强, 抽液量可轻松达到 $8 \sim 10\text{m}^3/\text{h}$, 注液可达到 $3 \text{ m}^3/\text{h}$ 以上。矿体多在含水层中、下部发育, 部分矿体紧贴隔水底板, 矿石渗透性与围岩渗透性相当, 含水层结构有利于地浸溶浸液控制。水化学类型均为 $\text{SO}_4\text{—Cl—Na}$ 型水, 矿化度 $5 \sim 8\text{g/L}$ 之间, PH 值在 $7 \sim 8$ 之间, 地下水矿化度较高, SO_4^{2-} 、 Cl^- 含量普遍较高, 对硫酸盐水泥及设备具有一定的侵蚀性, 矿石的碳酸盐含量不高($< 0.5\%$), 地下水中碳酸盐硬度低(门库杜克矿床为 2.6mmol/L), 地浸生产中部分地段产生石膏沉淀, 但总体上影响较小。

总之, 与我国伊犁盆地地浸条件较好的矿床

表 5 楚—萨雷苏盆地典型矿床含矿含水层粒度成分
Table 5 Grain-size component of Ore bearing aquifer in Chu—Careisu basin

矿床	含矿含水层	样品数量	粒级 (mm)						
			10~2	2~1	1~0.5	0.5~0.25	0.25~0.1	0.1~0.05	<0.05
门库杜克	下亚层	993	10.0	5.1	6.4	30.2	27.5	6.8	14.0
门库杜克	上亚层	607	3.7	2.4	3.2	36.6	32.3	6.7	15.1
扎尔巴克	下亚层	1468	7.3	5.8	7.2	48.4	13.8	5.6	11.9
扎尔巴克	上亚层	77	5.4	6.2	9.2	46.4	12.2	5.3	15.3

表 6 哈萨克斯坦楚—萨雷苏盆地典型矿床与中国伊犁盆地 蒙其古尔矿床水文地质参数比较 (据张子敏等^[26]; 张占峰等^[9])

Table 6 Comparison of hydrogeological parameters of typical deposits between Chu—Careisu basin, Kazakhstan, and Ili basin, China (%) (From Zhang Zimin et al.^[26]; Zhang Zhanfeng et al.^[9])

水文地质参数	扎尔巴克	门库杜克	英凯	中国 蒙其古尔
含水层底板连续性	连续稳定			
含水层顶板埋深(m)	112 ~ 118	285 ~ 310	140 ~ 235	420
含水层厚度(m)	20 ~ 31	50 ~ 60	35 ~ 75	7.14 ~ 14.5
矿体在含水层中位置	下部,部分紧贴隔水地板发育			中—上部
水位埋深(m)	57 ~ 60.5	74	40 ~ 50	6 ~ 110
顶板水头(m)	55 ~ 58	101 ~ 270	平均 74	195 ~ 429
钻孔抽流量(m ³ /h)	> 10	> 10	> 10	3.8
钻孔注流量(m ³ /h)	平均 5.6	> 3	> 3	2.1
水位降深(m)	3.7 ~ 10.7	7.46		80
矿石有效孔隙度(%)	33 ~ 52	33 ~ 37	> 33	25 ~ 32
矿层渗透系数(m/d)	平均 7.8	平均 7.2	3.7 ~ 13	0.08 ~ 1.28
矿石与围岩渗透比较	略大	略小	略小	略小
矿化度(g/L)	7.3 ~ 7.5	5.4 ~ 5.8	0.9 ~ 4.7	0.63 ~ 1.07
pH 值	6.9 ~ 7.87	7.4		7.46 ~ 8.15
水化学类型	SO ₄ —Cl— Mg—Na	SO ₄ — Cl—Na	SO ₄ — Cl—Na	SO ₄ —Cl— Na—Ca

类比(表 6),楚—萨雷苏盆地砂岩型铀矿床在渗透性、富水性方面有明显优势,钻孔抽注液能力强,含矿含水层结构有利于地浸溶浸液控制,拥有实施大流量地浸开采的先天条件,这一点已经得到了多个矿山生产实践的证实。

3 铀矿山地浸采铀工艺

由上可知,楚—萨雷苏盆地铀矿床规模大、分布集中,优越的资源禀赋和适宜的地质—水文地质条件,决定了盆地铀资源地浸开采具有规模化和低成本的特点。迄今为止,哈萨克斯坦已经与加拿大、法国、俄罗斯、日本等国合作开发了楚—萨雷苏盆地的铀资源,在盆地铀资源勘查和地浸开采方面,积聚了丰富的经验和数据。考察该盆地各矿山的地浸采铀工艺,发现各矿山在技术工艺上具有一定程度的统一性,整体表现出模块化设计和标准化操作的特点。

3.1 工艺钻孔的结构和分类

哈萨克斯坦地浸矿山普遍采用的工艺钻孔分为抽液孔、注液孔、观测孔和检查孔 4 种类型。检查孔与勘查钻孔相同,钻取岩芯以检查浸出效果,一般不成井。其他工艺钻孔多采用填砾式结构(图 3),其钻孔结构和成井工艺与国内普遍采用的填砾式结构

相似。最大的不同在于止水封孔环节的水泥用量。国内地浸矿山工艺钻孔在隔水层部位进行止水封孔时,常采用耐酸水泥封孔至井口,水泥耗量可达十余吨。而在哈萨克斯坦,仅在最关键部位用耐酸水泥封筑数米,其上部采用泥浆回注充填至井口,钻孔封孔的水泥用量单孔约为 300 kg 左右,大大节省了钻孔成本,提高了成井效率,而且泥浆回填可减少泥浆坑污染物,有利于环保。

为了加强钻孔设计的规范性和提高钻孔成井效率,各大型地浸矿山需根据自身的地质—水文地质条件及实践经验数据,参考行业规范,制定矿山层面的工艺钻孔成井规范,对钻孔设计和成井工艺进行严格、明确的规定和指导。如根据地浸矿山的实践经验,总结出一些普遍适用的工艺

钻孔结构参数:工艺孔过滤器的最佳长度不应超过 8m,注液孔沉砂管的长度为 11m,抽液孔和观测孔的沉砂管设置为 5.5m。

3.2 工艺钻孔排列方式和工程间距

地浸井场工艺钻孔排列方式和工程间距,一般依据矿体形态和地质—水文地质条件确定。通常采用采用六边形和行列式两种井网结构。钻孔工程间距一般依据水文地质参数进行模拟,并结合实践经验确定。由于楚—萨雷苏盆地的资源禀赋和渗透性较好,从降低成本的角度考虑,一般采用较大的工程间距,六边形井网钻孔间距一般为 40 ~ 60m(国内地浸铀矿床一般采用 25 ~ 30m),行列式井网的抽液孔和注液孔行列间距可达 50 ~ 60m。另外,对与相对较窄的条带状矿体,通常采用抽注合一的通用孔进行开采。

3.3 溶浸工艺

哈萨克斯坦酸法地浸采铀溶浸工艺分酸化、积极浸出、消极浸出和退役四个阶段。酸化阶段溶浸液中的硫酸浓度为 10 ~ 20g/L 之间,有时达到 25g/L,一般认为浸出液的 pH 值小于 2.5 ~ 3、铀含量达到 30mg/L 时,矿层的酸化过程即算完成,进入积极浸出阶段。积极浸出阶段是铀金属快速溶解并随浸出液抽出的过程,这一阶段溶浸液中的硫酸浓度一

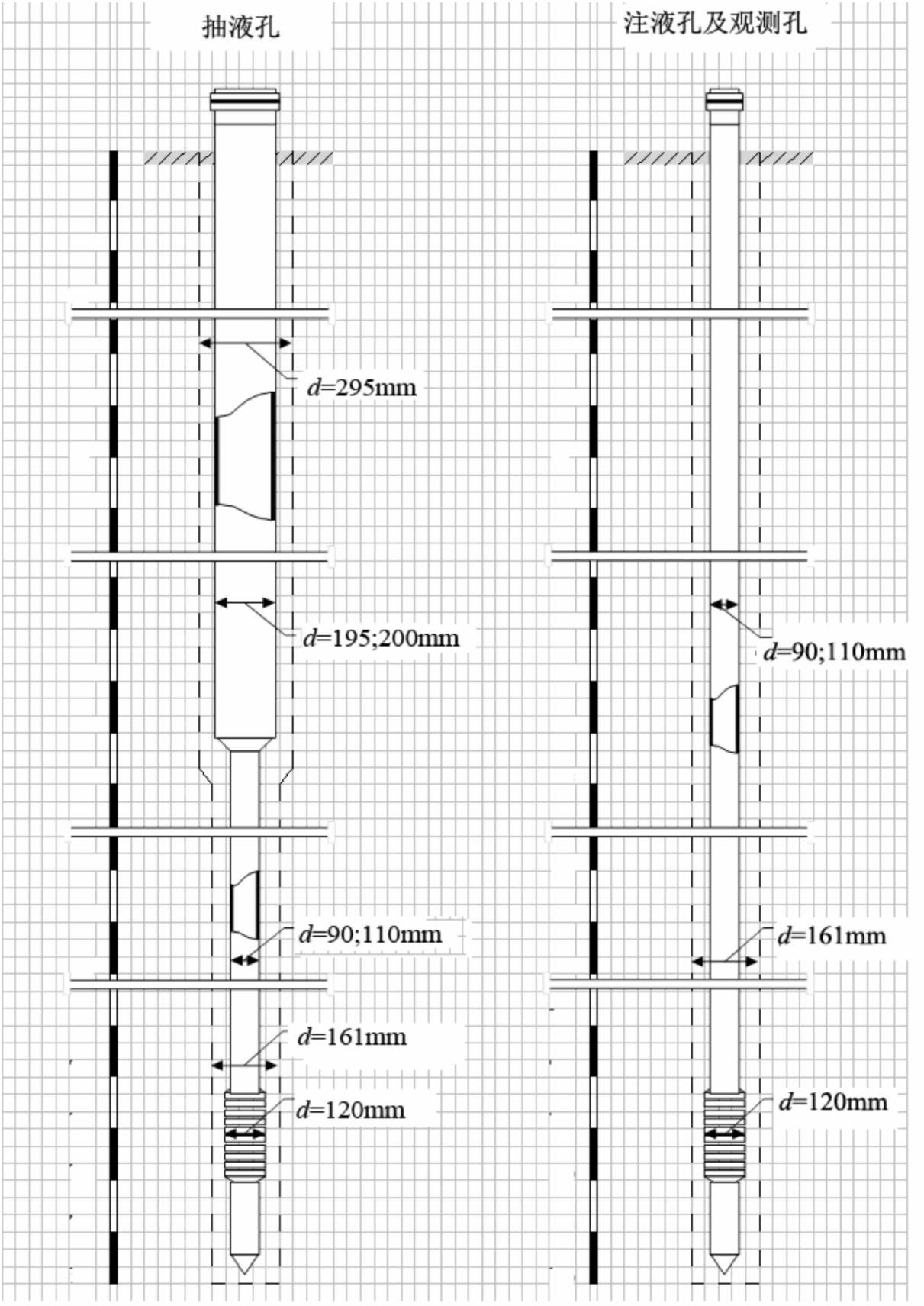


图 3 地浸工艺钻孔的结构图 (据张子敏等^②)

Fig. 3 Borehole structure of in-situ leaching process (According to Zhang Zimin et al.^②)

表 7 楚萨雷苏盆地某矿山浸出工艺技术指标
(据张子敏等^①)

Table 7 Main technical and economic indicators of a mine in Chu—Careisu basin (According to Zhang Zimin et al. ^①)			
阶段	监测项目		指标
酸化阶段	酸度		g/L
	单孔抽液量		m ³ /d
	单孔注液量		m ³ /d
	酸化时间		月
	酸化阶段结束时 产品液特性	铀含量	mg/L
		pH	2.4 ~ 2.5
		电位	mV
积极浸出阶段	吨矿酸耗		kg/t 矿石
	溶浸液酸度		g/L
	单孔抽液量		m ³ /d
	单孔注液量		m ³ /d
	浸出液平均铀含量		mg/L
	浸出液 pH 值		
	溶浸液铀含量		mg/L
	单位酸耗		kg/kgU

般保持在 3 ~ 10 g/L, pH 值在 1.8 ~ 2.2, Eh 约为 400 ~ 500mV, 浸出液平均铀含量一般可达 80mg/以上,。当浸出率达到 70 ~ 80% 后, 浸出液中的铀含量一直不断下降, 浸出过程进入消极浸出阶段, 这时, 溶浸液中的硫酸浓度应不断降低, 直至与吸附尾液中的硫酸浓度相当, 但抽注过程持续进行, 目的是从矿石孔隙中排挤出有较高浓度硫酸和铀含量的溶液, 直至浸出液铀浓度下降到 10 ~ 20mg/L 以下。浸出过程在经济上已不再合理时, 停止抽注, 进入退役阶段, 继续监测地下水水文地球化学指标, 直至恢复到原始状态。楚萨雷苏盆地某矿山酸化和积极浸出阶段技术指标见表 7。

4 结语

(1) 哈萨克斯坦楚—萨雷苏盆地层间氧化带砂岩型铀矿床分布集中, 资源品质总体优越。但相比而言, 以晚白垩世陆相沉积地层门库杜克、英库杜克、扎尔巴克三个层位的资源分布最为集中, 其资源规模、品位、渗透性等指标, 均较古近纪海相沉积地层中的矿床更为优越。

(2) 与我国北方产铀盆地相比, 楚萨雷苏盆地构造及演化过程相对简单, 中、新生代盖层为一套晚白垩世陆相灰色细砾—砂质—杂色粘土建造和古近纪的滨海相灰色砂—粘土建造, 具有明显的高渗透性和低有机质的特点, 有利于含铀含氧水的持续渗

人和氧化带的快速发育, 这是其快速形成富、大矿床的基础条件。

(3) 楚—萨雷苏盆地层间氧化带砂岩型铀矿床优越的资源禀赋及适宜的地质—水文地质条件, 以及哈萨克斯坦丰富的地浸采铀研究和实践经验, 决定了其地浸生产呈现出规模化、标准化和低成本的特点。

(4) 建议我国在砂岩型铀矿勘查规范储量计算章节中, 引入“渗透系数”边界条件, 具体数值建议由我国铀矿勘查和采冶部门设专题研讨确定。

(5) 建议我国地浸矿山在地浸工艺钻孔成井过程中, 借鉴哈萨克斯坦在水泥封孔环节的经验, 探索钻探泥浆回填技术, 减少水泥耗量, 减少泥浆污染物, 降低地浸开采的钻孔成本。

(6) 近年来国内采用“煤铀兼探”、“油铀兼探”等战略性举措, 北方地浸砂岩型铀资源勘查势头良好, 仅鄂尔多斯盆地就涌现出了大营、纳岭沟、双龙、宁东等超大型、大型铀矿床和铀矿产地, 资源潜力十分可观, 应当借鉴楚—萨雷苏盆地的勘查研究和地浸经验, 以盆地为单位加强共性规律的总结和研究, 加强勘查和开采单位的交流和融合, 探索具有普适性的地浸工艺流程, 提高地浸采矿的模块化设计和标准化操作水平, 降低生产成本, 提升国内铀资源的经济性和竞争力。

注 释 / Notes

① Берикблов Б Р, Перов Н Н, Карелин В Г. 1998. 哈萨克斯坦铀矿床. 刘平, 郭华, 张子敏, 等. 译. 北京: 核工业北京地质研究院.

② 张子敏, 张剑勇, 张建, 马亮, 等. 2015. 哈萨克斯坦中门库杜克矿床初步技术尽职调查报告. 北京: 中广核铀业发展有限公司: 1 ~ 78.

③ 张子敏, 张剑勇, 张建, 马亮等. 2015. 哈萨克斯坦扎尔巴克矿床初步技术尽职调查报告. 北京: 中广核铀业发展有限公司: 1 ~ 57.

④ 张占峰, 蒋宏, 李家金, 康勇, 等. 2010. 新疆察布查尔县蒙其古尔铀矿床 P0 ~ P31 线详查地质报告. 乌鲁木齐: 核工业二一六大队: 1 ~ 205.

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; the literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

姚振凯, 刘翔. 2015. 伊盟和楚—萨雷苏两成矿区铀成矿大地构造模式对比. 铀矿地质, 31(6): 547 ~ 554.

Kisliakov YA M, Schetochkin V N. 2012. Hydrogenous mineralization. Moscow: “Geoinformmark” company: 1 ~ 611 (In Russian)

Petchenkin I G 2003. Metallogeny of Turan platform. Moscow: VIMS: 1 ~ 143 (In Russian).

World Nuclear Association. 2016. “World Uranium Mining Production”

[OL]. (2016-05-19) [2017-01-24] <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/mining-of-uranium/world-uranium-mining-production.aspx> (June 20, 2016).

Yao Zhenkai, Liu Xiang. 2015. Comprison of the tectonometallogenic model between Ordos basin, China, and Chu—Careisu Basin,

Kazakhstan. Uranium Depsoit, 31 (6) : 547 ~ 554.

Кисляков Я М, Щеточкин В Н. 2012. Гидрогенное рудообразование. Москва: ЗАО “Геоинформмарк”: 1 ~ 611.

Печенкин И Г. 2003. Металлогения туранской плинты. Москва: ВИМС: 1 ~ 143.

An Analysis on Geological—Hydrogeological Conditions and in-situ Leaching Mining of Sandstone-hosted Uranium Deposits in Chu—Careisu Basin, Kazakhstan

MA Liang¹⁾, ZHANG Zimin¹⁾, ZHANG Jian¹⁾, LIU Yulong¹⁾, FENG Xiaoxi²⁾

1) China General Nuclear Power Group (CGN) Uranium Resources Co. , Ltd. , Beijing, 100029;

2) Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin, 300170

Abstract: Chu—Careisu basin is located in the southeastern part of Kazakhstan, a central Asian nation, and it is one of most uranium-rich basins in the world. This article focused on its regional strata and tectonic background, analyzed the metallogenic condition and spatial and temporal distribution features, summarized on the geological—hydrogeological characteristics, including grade, thickness, depth, shape, mineral contents, chemical contents, permeability and water yield property of aquifer, discussed the reasons for its large-scale, standardized and low-cost in-situ leaching mining activity based on the mining technology massively-deployed in this region, summarized several advanced ideas and practical experiences of uranium exploration and mining process of sandstone-hosted uranium deposits in Kazakhstan, and proposed several suggestions for research and development of uranium resources in China’s basin terrains.

Keywords: Kazakhstan, Chu—Careisu basin, sandstone-hosted uranium deposits, geological—hydrogeological conditions, in-situ leaching mining process.

Acknowledgement: This article was financially supported by National Basic Research Program of China (NO. 2015CB453006).

First author: Ma Liang, male, born in 1979, senior engineer, mainly engaged in exploration and development of uranium deposits. Email: ltma628@sohu.com; ma_liang@cgnpc.com.cn

Manuscript received on: 2016-10-18; Accepted on: 2017-04-15; Edited by: ZHANG Yuxu.

Doi: 10.16509/j.georeview.2017.04.012