

# 内蒙古某地浸铀矿山地质-开采模型对比研究与剩余资源量评价

张丽丽, 赵凯培, 肖诗伟, 霍晨琛

(中核矿业科技集团有限公司, 北京 101149)

**摘要:** 为了促进地浸铀资源的充分利用, 统计分析了内蒙古某地浸铀矿山研究区内的矿段厚度、过滤器长度和矿层有效厚度, 采用三维矿业软件构建矿体地质模型与开采模型, 通过三维实体的可视化对比, 精准掌握了浸采范围外“残难矿体”的位置, 并对其进行了剩余资源量估算, 结果表明剩余资源量可观, 有待进一步研究。应用价格法测算矿床的经济指标, 对矿床进行技术经济评价, 将经济平米铀量作为阈值约束浸采范围外的“残难矿体”资源模型并生成经济块段模型; 采用距离幂次反比法对经济块段模型进行资源量估算, 得到平米铀量在经济指标之上的资源量。通过研究, 掌握了研究区内纵向浸采范围外“残难矿体”的精确位置、剩余资源量和经济性, 实现了对地浸开采矿山剩余资源量的经济评价。

**关键词:** 铀; 地质-开采模型; 浸采范围; 剩余资源量; 经济评价

**中图分类号:** TL212.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2024)04-0052-08

**DOI:** 10.13426/j.cnki.yky.2024.03.02

矿产资源二次开发的对象主要是暂不能综合开采或采出后暂不能综合利用的矿石<sup>[1]</sup>。保持一定规模的铀资源生产能力, 不仅要加强新矿床的勘查、新采区的开拓, 也应加强地浸铀矿山资源二次评估及开发利用<sup>[2-3]</sup>。

在开采过程中, 地浸采铀过滤器在垂向上的进液量自上而下逐渐减少, 在抽液量一定的条件下, 过滤器的有效长度是有限的。在水位降深一定的条件下, 井的抽液量与注液量在一定范围内随过滤器长度的增加而增大; 但当过滤器的长度达到一定值时, 抽液量与注液量不再增加<sup>[4]</sup>。因此, 生产中的过滤器长度并不完全等同于矿层厚度, 当矿层厚度过大时, 过滤器长度会小于矿层厚度, 形成了纵向上溶浸范围外的矿体(“残难矿体”)。

针对上述问题, 笔者统计分析了研究区内的矿段厚度、过滤器长度和矿层有效厚度, 构建了三维矿体地质模型与开采模型, 通过模型对比研究定位“残难矿体”的精确位置, 进行资源二次开发利用研究。

## 1 矿床概况

矿床位于内蒙古大兴安岭华力西晚期地槽褶

皱基底上发育起来的中新生代凹陷盆地, 矿床的赋矿层位为赛汉组上段, 矿床范围内共圈出I号、II号、III号3层工业铀矿体, 其中I号为主矿层, 规模较大, 呈北东向展布, 长约8 100 m、宽100~800 m<sup>[5]</sup>。矿体形态为简单的板状和卷状, 产状平缓, 倾角 $<2^{\circ}$ 。本研究区范围为位于57~77号勘探线(按照采区内勘探线布置顺序)内I号矿层矿体。

## 2 建模数据收集与分析

采用DIMINE三维矿业软件建立三维资源模型, 并估算不同模型资源储量。三维矿业软件建模与可视化子系统能提供快速、形象、可信的三维可视化资源模型, 资源储量估算模块包含传统块段法和地质统计学法, 可实现资源储量的准确计算。

本次收集的主要图件有矿体水平投影图、勘探线剖面图、工程分布图<sup>[6]</sup>, 收集的表格数据有钻孔见矿一览表、矿体单工程参数计算表、过滤器位置表、资源储量估算表。三维模型构建前, 按照三维矿业软件系统数据格式要求, 整理得到钻孔位置信息82条、钻孔测斜信息82条、钻孔见矿信息

收稿日期: 2024-03-12

第一作者简介: 张丽丽(1988—), 女, 河北沧州人, 硕士, 高级工程师, 主要从事资源储量评价工作。

443条和过滤器长度信息79条。研究范围内既存在矿段厚度大于过滤器长度的情况,也存在过滤器长度大于矿段厚度的情况(表1)。

表1 部分钻孔的矿段厚度、过滤器长度及矿层有效厚度  
Table 1 Ore section thickness, filter length, and effective ore layer thickness of some drillings

钻孔	矿段厚度/m	过滤器长度/m	矿层有效厚度/m
KZ57-08	16.6	10	11.5
KZ57-03	13.2	8	9.2
KZ57-10	13.6	8	9.2
KC59-01	14.7	10	11.5
KC59-08	3.9	8	9.2
KZ61-10	24.3	10	11.5
KC63-01	4.6	8	9.2
KC63-04	17.2	10	11.5
KC63-06	28.8	10	11.5
KC63-08	26.7	10	11.5

研究区内见矿钻孔共79个,其中有8个钻孔的过滤器长度大于矿段厚度,71个钻孔的过滤器长度小于矿段厚度。经统计,矿段平均厚度为16.99 m,过滤器平均长度为9.42 m,两者平均差值为7.57 m。在抽出井与注入井工作情况下,液流不但会在水力梯度驱动下沿矿层水平运移,还会沿垂直于矿层的方向运移,使得液流运移厚度增大(即矿层有效厚度)。

一般情况下,有效厚度通常大于过滤器长度的10%~20%<sup>[4]118</sup>。本研究采用中间值(15%)粗略计算矿层有效厚度,矿段厚度与矿层有效厚度的差距较大(表1)。经统计,矿层有效厚度平均值为10.83 m,与矿段厚度的平均差值为6.16 m(图1)。这表明在现有开采条件下,仍有部分含矿样段处于过滤器溶浸范围之外,暂时没能得到开发与利用,可以考虑这部分资源的二次开发利用。

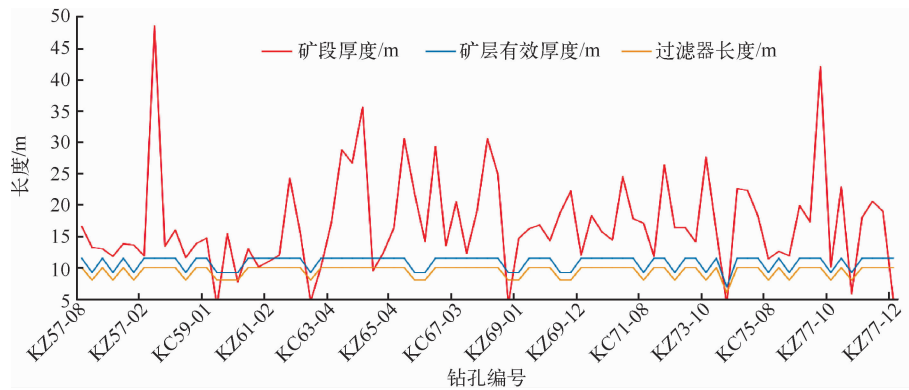


图1 含矿层矿段厚度、有效厚度与过滤器长度对比

Fig. 1 Comparison of ore section thickness, effective thickness, and filter length of ore layer

### 3 地质-开采模型对比研究与资源储量估算

本次建模范围为57~77号勘探线,共计11条勘探线、79个见矿钻孔(图2)。研究区的砂岩矿体形态复杂多变,无法用规则的几何模型来表达。三维矿体模型构建主要采用TIN技术,该技术具有灵活、简便、快速的特点,简化了资源储量估算中的体积计算过程。具体建模方法:在三维矿业软件中导入相应格式的钻孔位置、轨迹、样品信息,校验数据,生成钻孔三维模型,圈定剖面矿体轮廓线,由线转化为面,由面转化为体,进而建立矿体三维模型<sup>[7]</sup>。

#### 3.1 矿体模型构建

矿体地质模型构建是依据钻孔的原始见矿信息,按照规范中矿体圈定原则和连接原则,人机交互圈定剖面上的矿体轮廓线。将相邻剖面的矿体轮廓线用“最小周长法”连接,并对边缘轮廓线外推,形成由并列的三角片组成的封闭空间几何体(矿体的地质模型)<sup>[8]</sup>,见图3(a)。

矿体开采模型构建是以过滤器实际位置为基础,按照大于过滤器长度15%的矿层有效厚度确定各剖面浸采矿体轮廓线,每个钻孔的过滤器布置需兼顾相邻钻孔的见矿位置,以便达到采区整体抽注平衡及资源的有效利用。将相邻剖面的浸采矿体轮廓线用“最小周长法”连接,并对边缘轮

廓线外推,形成由若干三角片并列组成的矿体开采模型,见图 3(b)。

### 3.2 开采模型对比研究

在同一剖面上,轮廓线是地质模型与开采模

型差异的最直观反映(图 4)。矿体地质模型与开采模型存在较大差异,该剖面上有部分矿段处于浸采范围外,未被开发利用。

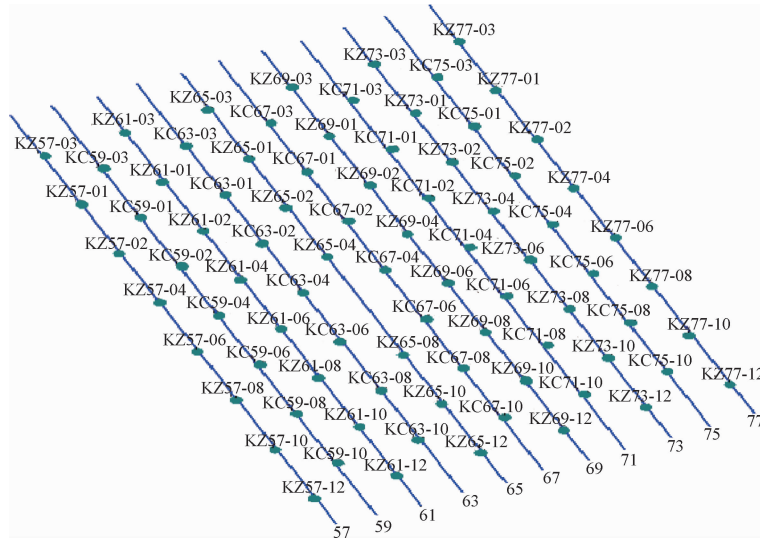


图 2 研究区钻孔平面布置图

Fig. 2 Layout plan of drilling holes in the research area

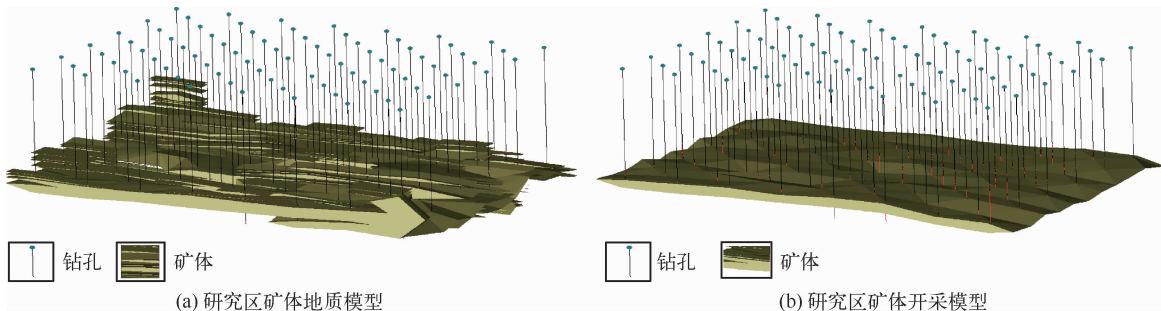


图 3 研究区矿体模型

Fig. 3 Mineral body models within the study area

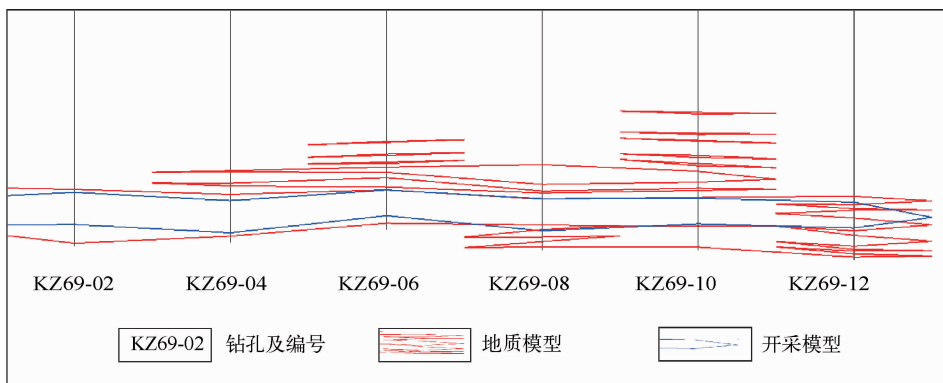
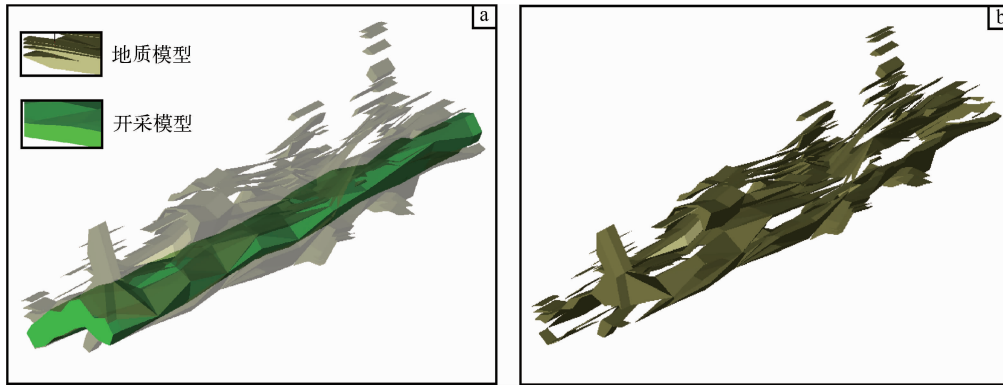


图 4 69 号勘探线剖面地质模型与开采模型对比

Fig. 4 Section comparison between geological model and mining model of 69# line

三维矿体的地质模型与开采模型的对比见图5(a),图中黄色矿体为地质模型,绿色矿体为开采模型。可以看出,研究区有较多矿段处于浸采范

围之外,采用布尔运算,两实体表面求差(地质资源模型-开采资源模型),得到过滤器浸采范围之外的三维矿体模型,见图5(b)。



(a)矿体地质模型与开采模型;(b)浸采范围外的矿体模型。

图5 矿体地质模型与开采模型对比

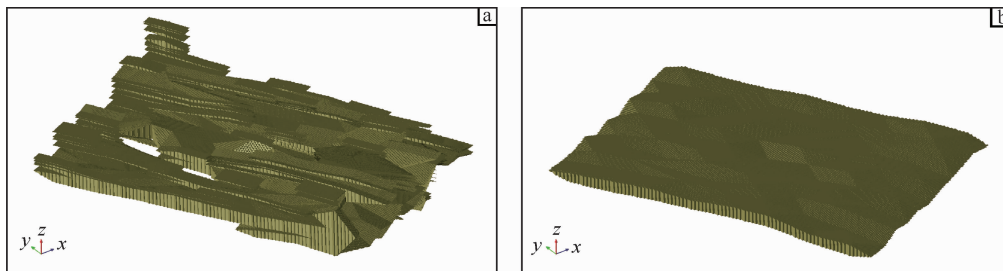
Fig. 5 Comparison between ore geological model and mining model

### 3.3 资源储量估算

#### 3.3.1 块段模型创建

块段模型是资源量估算的基础<sup>[9]</sup>,首先创建矿体的空块模型,利用三维矿体模型对空块模型进行约束(图6),使矿体内充满相应尺寸的单元块,单元块可准确地估算矿体的资源储量,累加后

可计算矿体体积,也可作为品位赋值的载体。按照经验选择单元块尺寸,矿体边缘的自然尖灭特点使矿体边缘厚度很小,因此还需设定一些尺寸更小的次级块。采区内钻孔布置的行距为25 m,孔距为25 m,设置内部单元块尺寸为4 m×4 m×0.4 m,边界单元块尺寸为2 m×2 m×0.2 m。



(a)矿体地质模型约束后;(b)矿体开采模型约束后。

图6 矿体地质模型与开采模型约束后的块段模型

Fig. 6 Constrained block model of ore geological model and mining model

#### 3.3.2 资源储量估算

##### 3.3.2.1 资源储量估算方法

距离幂次反比法是地质统计学常用的几何空间差值方法,是利用已知临近值的距离指数与幂次成反比的关系来推估网格点值的方法,距离幂次反比法的一般步骤如下。

1)以被估单元块中心为圆心、以影响半径( $R$ )为半径做圆,确定影响范围;在三维状态下,圆变为球体。最常见的是各向异性导致搜索半径不同,则搜索范围为椭球体。

2)计算落入搜索椭球体内每一样品与被估单元块中心的距离。

3)通过式(1)<sup>[10]</sup>计算单元块的品位:

$$\omega = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{1}{(d_i)^p} \omega_i}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{(d_i)^p}}, \quad (1)$$

式中: $\omega$ —待估点的品位, g/t;  $d_i$ —待估点与已知点间距离, m;  $p$ —幂次, 本矿床成矿稳定, 品位变化小, 取 2;  $\omega_i$ —已知点品位, g/t。

### 3.3.2.2 资源储量估算

距离幂次反比法按照一定的搜索规则对矿体品位进行估值, 搜索椭球体需要根据矿体的产状分布进行设定, 对不同产状的矿床或矿体其搜索规则也不同, 应尽量保证搜索方向与矿体分布保持一致。本次设定搜索椭球体的走向 $45^\circ$ 、倾角

$0^\circ$ 、倾伏角 $-2^\circ$ ; 基本搜索半径设定为工程间距的 2 倍, 当估算过程中出现单元块无法估值的情况时, 再成倍放大搜索半径。

为了确保得到各参数的无偏估计量<sup>[11]</sup>, 需要对样品段进行样长组合, 目的是将空间不等长的样段和品位量化到与工程方向一致的均匀离散点(样长的中点)上。样品组合长度的选择由统计数据确定, 要参考矿床大部分样品的长度, 保证大部分样品数据组合后不会改变。对 443 个样品进行长度直方图分析, 样长平均值为 3.09 m、中值为 0.9 m、最大值为 27.1 m、最小值为 0.1 m, 最终确定样品组合长度为 1 m<sup>[12]</sup>。品位赋值后的地质块段模型见图 7, 品位赋值后的开采块段模型见图 8。

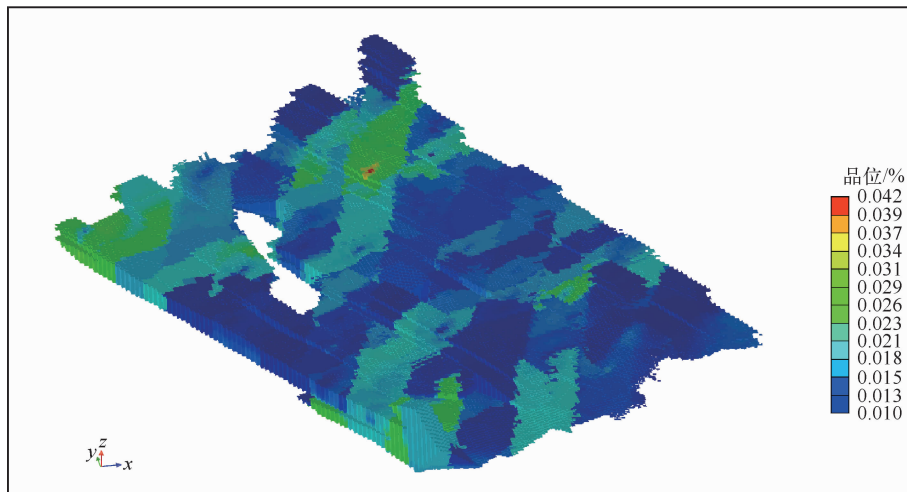


图 7 品位赋值后的地质块段模型

Fig. 7 Geological block model after grade assignment

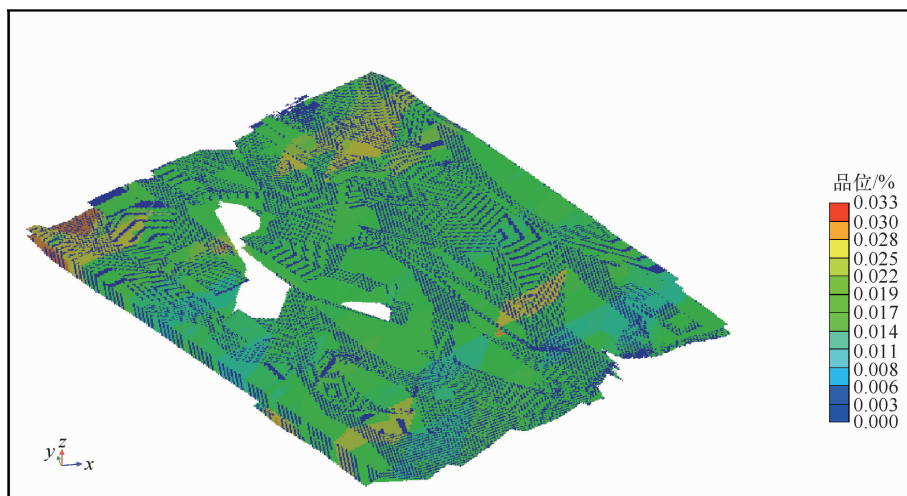


图 8 品位赋值后的开采块段模型

Fig. 8 Geological mining model after grade assignment

### 3.3.3 资源储量估算结果

用样长组合后的钻孔数据库分别对矿体地质模型和开采模型进行资源储量估算,结果见表2。可以看出,地质模型估算铀金属量为423.8 t,开

采模型估算铀金属量为319.7 t,二者差值较大,资源储量的估算结果也表明了溶浸范围之外存在较多剩余资源量。

表2 资源储量估算结果

Table 2 Resource reserve estimation results

模型	体积/m <sup>3</sup>	密度/(t/m <sup>3</sup> )	矿石量/t	铀品位/%	铀金属量/t
地质模型	1.396×10 <sup>6</sup>	1.9	2.652×10 <sup>6</sup>	0.016 0	423.8
开采模型	1.041×10 <sup>6</sup>	1.9	1.978×10 <sup>6</sup>	0.016 2	319.7

## 4 经济评价

### 4.1 主要技术指标测算

为使资源得到合理的二次开发利用,采用价格法对“残难矿体”的剩余资源量进行经济评价。当矿山生产成本与市场价格相等时,反算出矿石品位、平米铀量和浸出液铀浓度,将其作为边际品位、边际平米铀量和边际铀浓度;当矿山成本为全成本时,反算出经济品位、经济平米铀量和经济铀浓度<sup>[13]</sup>;当矿山成本为直接生产成本时,反算出边界品位、边界平米铀量和边界铀浓度<sup>[14]</sup>。地浸采铀中,平米铀量是矿体平面上单位面积内的铀金属总量,是与矿石的品位、矿石密度与矿体厚度相关的综合性指标,是衡量地浸经济效益参考尺度之一<sup>[15]</sup>。因此,本研究选择平米铀量作为评价依据。

平米铀量测算式为<sup>[16]</sup>

$$U_0 = K \frac{N_0 M f \gamma_0}{10^3 E}, \quad (2)$$

式中:  $U_0$ —边界平米铀量, kg/m<sup>2</sup>;  $E$ —浸出率, %;  $N_0$ —浸出液铀质量浓度, mg/L;  $M$ —有效厚度, m;  $f$ —液固体积质量比, m<sup>3</sup>/t;  $\gamma_0$ —矿石密度, t/m<sup>3</sup>;  $K$ —含矿层铀浓度修正系数,  $K = M_w / M_{gr}$  ( $M_w$ 为含矿含水层平均厚度,  $M_{gr}$ 为含矿层平均厚度)。

在地浸铀矿山生产状态下,影响其技术经济评价结果的经济因素主要有铀金属价格、原材料费、燃料费及各类税费,矿床2018年的井场和水冶厂材料费见表3,人工成本费用见表4,相关税费见表5。影响评价结果的矿床参数有水冶回收率、浸出率、矿石密度、有效厚度等,其中人工成本费为推测数据,其他费为现场收集数据。

表3 井场及水冶厂材料费

Table 3 Materials costs for well sites and water treatment plants

	材料	每千方溶液单耗	不含税单价/元	材料类型
井场	硫酸/t	2.62	185.00	原辅材料
	电/(kW·h)	591.09	0.40	外购动力
	煤/t	0.07	900.00	外购动力
	双氧水/t	0.05	1.75×10 <sup>3</sup>	原辅材料
水冶厂	碳酸氢钠/t	0.01	2.00×10 <sup>3</sup>	原辅材料
	D263(B)树脂/t	1.60×10 <sup>-3</sup>	3.00×10 <sup>4</sup>	原辅材料
	硫酸/t	0.07	185.00	原辅材料
	碳酸钠/t	3.70×10 <sup>-3</sup>	2.00×10 <sup>3</sup>	原辅材料
	电/(kW·h)	0.20	400.00	外购动力
	煤/t	0.08	900.00	外购动力
	柴油/t	1.20×10 <sup>-3</sup>	8.33×10 <sup>3</sup>	原辅材料
	磺化煤油/t	1.30×10 <sup>-3</sup>	7.00×10 <sup>3</sup>	原辅材料
	氢氧化钠/t	0.01	3.00×10 <sup>3</sup>	原辅材料
	TBP/t	0.20×10 <sup>-3</sup>	2.70×10 <sup>4</sup>	原辅材料
	P204/t	0.20×10 <sup>-3</sup>	1.80×10 <sup>4</sup>	原辅材料

表 4 人工成本费用

Table 4 Labor costs

材料名称	工效/(m <sup>3</sup> /工日)	人工工日
		单价/[元/(人·日)]
直接人工费	9 029.69	300.00
厂队管理人员成本	9 029.69	400.00
公司管理人员成本	9 369.86	500.00

表 5 经营成本费用

Table 5 Operating costs

成本类型	名称	价格/(元/m <sup>3</sup> )
经营成本	维简费	0.443 8
	安全生产措施费	0.443 8
	其他制造费	1.013 3
全成本	其他管理费	0.116 8
	经营或销售费	$0.14 \times 10^{-2}$
	财务费	0.021 6
	产品运输费	0.073 6

依据平米铀量测算式,得到不同类型的平米铀量(表 6)。边界平米铀量为 0.78 kg/m<sup>2</sup>,边际平米铀量为 1.98 kg/m<sup>2</sup>,经济平米铀量为 2.08 kg/m<sup>2</sup>。经测算,当钻孔的见矿平米铀量达到经济平米铀量且矿体有一定连续性时,表明该钻孔控制的矿体具有经济可采性。

表 6 2018 年矿床主要技术指标测算结果

Table 6 Calculation results of the main technical indicator of the deposit in 2018

指标类型	成本类型	成本/(元/m <sup>3</sup> )	平米铀量/(kg/m <sup>2</sup> )
边界指标	直接生产成本	1.56	0.78
边际指标	经营成本	2.94	1.98
经济指标	全成本	3.09	2.08

## 4.2 经济性评价

利用布尔运算求减功能,计算得到浸采范围外“残难矿体”三维模型,运用阈值法提取出未利用矿体中平米铀量大于 2.08 kg/m<sup>2</sup>的块段模型,运用距离幂次反比法对块段模型进行资源储量估算,得出的剩余经济资源量见表 7。可以看出,有 135.4 t 铀资源的平米铀量在 2.08 kg/m<sup>2</sup>以上(图 9),经济铀资源较为可观。

表 7 平米铀量 $\geq 2.08$  kg/m<sup>2</sup>的剩余资源量Table 7 Resources with uranium content greater than 2.08 kg/m<sup>2</sup>

参数	体积/m <sup>3</sup>	密度/(t/m <sup>3</sup> )	矿石量/t	品位/%	金属量/t
数值	440 566	1.9	837 075	0.016 2	135.4

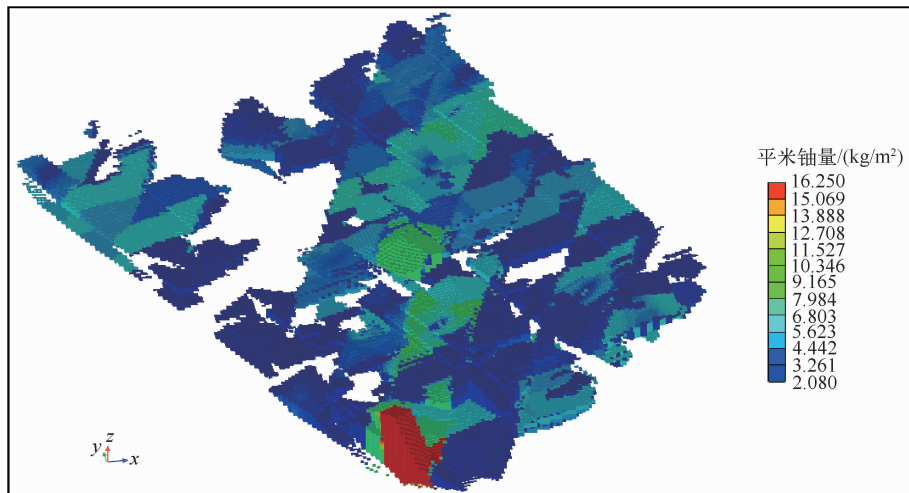


图 9 大于等于经济平米铀量的块段模型

Fig. 9 Economic block model

## 5 结论

模型对比研究用于定位纵向溶浸范围外“残

难矿体”是可行的,可将保有资源进行信息化、数字化描述,并可视化表达,让矿山技术人员清楚直观地了解纵向上保有资源情况。

采用距离幂次反比法对矿体的地质块段模型和开采块段模型分别进行资源储量估算,清晰展现了量化后每部分的资源量;采用价格法对矿床进行主要技术指标测算,测算出不同类型的平米铀量,掌握了研究范围内纵向上溶浸范围外“残难矿体”的经济性。溶浸范围外、经济指标之上的资源量较为可观,有必要对该部分资源进行二次开发利用。

### 参考文献:

- [1] 戴时林. 红旗岭镍矿资源的二次开发与利用方法探讨[J]. 世界有色金属, 2018(19):111-112.
- [2] 王成, 宋继叶, 张晓, 等. “两碳目标”下铀资源的保障能力及应对策略[J]. 铀矿地质, 2021, 37(5):765-779.
- [3] 何江川, 廖广志, 王正茂. 关于二次开发与三次采油关系的探讨[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2011, 33(3):96-100.
- [4] 王海峰, 谭亚辉, 杜运斌, 等. 原地浸出采铀井场工艺[M]. 北京:冶金工业出版社, 2002.
- [5] 唐大伟. 巴彦乌拉铀矿床矿体特征研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2010, 29(S1):117-123.
- [6] 张浩浩, 李旭. 蒙其古尔铀矿床三维地质模型构建及应用[J]. 铀矿地质, 2021, 37(3):519-527.
- [7] 柳波. 矿产资源储量动态管理的三维地质建模方法[J]. 现代矿业, 2019, 35(9):81-83.
- [8] 周旋, 王选问, 金瑜. 基于地质统计学方法的某铁矿资源量估算[J]. 金属矿山, 2015(7):86-90.
- [9] 普文周, 杨松华. 基于 3DMine 软件建立层状矿体模型的研究及应用[J]. 有色金属设计, 2022(49):9-13.
- [10] 张明明, 周涛发, 袁峰, 等. 长江中下游地区玢岩型铁矿床资源储量估算研究[J]. 地质学报, 2011, 85(7):1215-1222.
- [11] 张丽丽, 吴卫芳. 某地浸铀矿床资源储量三维动态管理方法研究[J]. 铀矿冶, 2015, 34(2):97-102.
- [12] 车海龙. Micromine 软件在某金矿床资源储量估算中的应用[J]. 吉林地质, 2020, 39(3):72-89.
- [13] 肖诗伟. 铀生产矿山边界品位实质探讨[C]//中国核学会. 中国核科学技术进展报告(第四卷)——中国核学会 2015 年学术年会论文集. 北京:中国原子能出版社, 2015:112-120.
- [14] 刘耀驰, 吕俊文, 徐乐昌, 等. 浅谈提前关停铀矿山的资源回收[J]. 铀矿冶, 2002, 21(8):134-137.
- [15] 王海峰, 叶善东. 原地浸出采铀工程技术[M]. 北京:中国原子能出版传媒有限公司, 2011.
- [16] 辜骏如, 郭福生, 夏菲, 等. 铀矿资源技术经济学[M]. 北京:原子能出版社, 2004.

## Comparative Study of Geological-mining Models and Evaluation of Remaining Resources of an In-situ Leaching Mine in Inner Mongolia

ZHANG Lili, ZHAO Kaipei, XIAO Shiwei, HUO Chenchen

(China Nuclear Mining Science and Technology Corporation, CNNC, Beijing 101149, China)

**Abstract:** In order to promote the full utilization of in-situ leaching uranium resources, statistical analysis was conducted on the thickness of ore bodies, filter length, and effective thickness of ore layers in a research area of an in-situ leaching uranium mine in Inner Mongolia. The three-dimensional mining software was used to construct a geological model and mining model of the ore body. Through visual comparison of three-dimensional entities, the location of the "residual difficult ore body" outside the leaching range was accurately grasped, and the remaining resource amount was estimated. The results show that the remaining resource amount was considerable and needed further research. Using the price method to calculate the economic indicators of the deposit, conducting a technical and economic evaluation of the deposit, using the calculated economic uranium per square meter as a threshold to constrain the resource model of the "residual difficult ore body" outside the leaching range, and generating an economic block model. Using the inverse distance power method to estimate the resource quantity of the economic block model, the resource quantity of the uranium per square meter above the economic indicators is estimated. Through research, the precise location, remaining resources, and economic viability of "residual difficult ore bodies" outside the vertical leaching range within the research area have been mastered, achieving economic evaluation of the remaining resources of in-situ leaching mines.

**Key words:** uranium; geological-mining model; leaching mining range; remaining resources; economic evaluation