

某铀矿山资源储量动态监测及资源利用研究

赵凯培, 张丽丽, 霍晨琛, 王新锐

(中核矿业科技集团有限公司, 北京 101149)

摘要: 以国内某铀矿山为研究对象, 获取矿床地质勘查的钻孔位置、测斜、样品、岩性等基础数据, 构建矿床三维地质初始模型、估算资源储量; 根据矿床勘查、生产探矿和开采进展, 对矿体/块段三维模型、资源量类型、开发状态等进行动态更新; 构建不同时间矿床三维模型之间的逻辑关系, 实现矿床资源保有量、变化量及变化原因的自动监测, 掌握了矿山资源量家底; 开展资源利用研究, 计算当年和累计浸出率, 结合矿山生产数据, 预测矿体/块段可回采储量(证实储量), 有针对性地提出矿体/块段资源利用方案, 提高矿山的资源利用率。

关键词: 三维地质模型; 铀资源; 资源变化; 动态监测; 资源利用

中图分类号: TL212 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2024)04-0001-13

DOI: 10.13426/j.cnki.yky.2024.04.12

随着现代信息技术的不断发展,“数字矿山”已成为矿业发展的必然趋势^[1-2]。1994 年 Houlding 提出的“三维地质建模”,是“数字矿山”的基础,具有地质成果表达数字化、立体化、可视化、智能化与通俗实用的特点^[3]。常用的三维建模软件主要有 3DMine、Dimine、Surpac、Micromine 等,其在构建矿体空间模型、估算资源储量、优化开采方案等方面发挥了重要作用,在地学领域应用广泛^[4-9],但还缺乏与地浸铀矿山资源储量动态管理相对应的功能模块。

本研究采用自主研发的矿产资源储量动态评价系统(简称 RDS 系统),该系统是基于 BeeGo 系统框架和 Go 语言开发的数字化矿业软件,数据存储采用非关系型数据库(MongoDB 数据库),三维模型利用 WebGL 技术,其具有数据存储、三维模型构建、资源储量动态管理、主要技术指标测算、技术经济评价等功能。前人应用该系统对某地浸铀矿山进行研究,利用系统功能模块实现矿床的资源量估算和资源动态管理^[10-12];但还未阐明资源储量动态监测本质,也未深入开展资源储量动态监测的应用研究。

本研究以某地浸铀矿山为研究对象,分析其矿体特征,利用钻孔数据还原其空间轨迹信息,建

立矿床三维数字化地质模型、估算资源储量,综合生产数据,开展资源储量动态监测,以提高矿山的资源利用率。

1 矿床地质概况

矿床处于天山—兴蒙华力西褶皱系基础上发育的中新生代内陆盆地。盆地由川井拗陷、乌兰察布拗陷、马尼特拗陷、腾格尔拗陷和苏尼特隆起等 6 个二级构造单元组成,其内部又分为 43 个次级凹陷和 22 个次级凸起。矿床位于马尼特拗陷西部的塔北次级凹陷,赋存于下白垩统赛汉组上段(K_1s^2)地层中。

赛汉组上段砂体主要发育 1 套半干旱-半湿润环境下沉积的以砂岩为主的粗碎屑岩建造。岩性主要为砾岩和砂岩,由碎屑物和杂基组成,胶结物含量少。砂岩类岩石碎屑物以石英、长石为主,岩屑次之,云母极少;砾岩类岩石碎屑物以岩屑为主,石英、长石次之。重矿物及炭屑含量一般小于 1%,个别达 1%~2%。

矿床共划分为 3 个工业铀矿体,其中 I 号矿体规模较大,呈北东向展布,长约 8 100 m、宽 100~800 m,从西部的 B415 线到东部的 B255 线连续分布。矿体埋深为 81.64~151.87 m,厚度为 0.50~

收稿日期: 2024-04-19

第一作者简介: 赵凯培(1994—),男,河北石家庄人,硕士,工程师,主要从事资源储量动态评价工作。

表2 钻孔空间轨迹信息

Table 2 Space trajectory information of drilling holes

钻孔编号	时间	测点深度/m	方位角/(°)	倾角/(°)
BZK363-83	2012-12-31	0	0	-90.00
BZK363-83	2012-12-31	107.26	0.02	-88.18
BZK363-83	2012-12-31	130.17	361	-87.22
BZK363-85	2012-12-31	0	0	-90.00
BZK363-85	2012-12-31	107.74	0.07	-88.47
BZK363-85	2012-12-31	132.44	360	-88.52
KC0303	2013-09-15	0	0	-90.00
...

表3 钻孔样品信息和岩性信息

Table 3 Sample information and lithological information of drilling holes

钻孔编号	时间	起/m	止/m	品位/%	密度/ (10^3 kg/m^3)	样段厚度/m	平米铀量/ (kg/m^2)	地层、岩性
BZK363-83	2012-12-31	107.27	113.37	0.020 4	2.04	6.1	2.54	灰色中砂岩、砂质砾岩
BZK363-83	2012-12-31	113.37	116.67	0	2.04	3.3	0	黄色砂质砾岩
BZK363-83	2012-12-31	116.67	120.67	0.018 9	2.04	4.0	1.54	灰色砂质砾岩
BZK363-83	2012-12-31	120.67	123.77	0	2.04	3.1	0	黄色砂质砾岩
BZK363-85	2012-12-31	107.75	111.35	0.014 3	2.04	3.6	1.05	灰色砂岩、浅灰色泥质砾岩
BZK363-85	2012-12-31	111.35	115.55	0	2.04	4.2	0	灰色中粗砂岩、砂质砾岩
BZK363-85	2012-12-31	115.55	119.85	0.024 9	2.04	4.3	2.18	灰色中粗砂岩、粗砂岩
KC0303	2013-09-15	90.31	95.11	0.033 6	2.04	4.8	3.29	细砂岩
KC0303	2013-09-15	116.11	127.91	0.015 9	2.04	11.8	3.83	中砂岩
...

原始数据整理过程中,若由于人员录入错误或其他原因,造成样段交叉、钻孔号重复、样段总长度大于总孔深等错误,系统可自动检查数据,提示错误。根据提示的错误信息,与原始资料对照核实后,重新导入数据或在数据库中直接修改,保证数据准确,完成原始数据整理。如钻孔 KC0303 样品信息“止”大于总孔深,钻孔 BZK363-83 方位角大于 360° 。

2.1.2 集成钻孔数据库

RDS 系统具有时间属性,所以首先要初始化时间,建立可以用于对比的时间。以矿床勘查结束后评审备案时间作为起始时间,对矿体/块段形

态、资源储量变化等实施动态监测。RDS 系统中初始化时间步骤为:点击时间设置模块,在“新建批次”一栏中命名矿床勘查阶段,键入时间,对矿床作相应备注,然后选择新建批次(图 2a);选择三维建模模块,点击矿床管理,新建矿床并输入基本信息(图 2b)。

设置矿床初始时间后(矿床初始时间与钻孔施工时间可以不一致),将经过数据整理后的钻孔坐标信息、空间轨迹信息、样品信息和岩性信息导入矿床,集成钻孔数据库并生成钻孔空间轨迹(图 3),从而建立矿床钻孔数据库。



图 2 批次设置及矿床管理

Fig. 2 Batch setting and deposit management

2.2 三维模型建立

建立矿床三维模型的主要方法是剖面线法。首先,在生成的钻孔空间轨迹中选择需要进行矿体或块段圈定的勘探线剖面,生成二维剖面;将钻孔轨迹、样品、岩性等信息投影到二维剖面,圈定矿体剖面线圈。然后,根据圈连规则及外推原则,圈连相邻勘探线剖面矿层,利用最小周长法或最小面积法将相邻勘探线剖面对应矿层圈连,按照无限外推和平推 1/4 基本工程间距等外推原则,在矿体边界向勘探线外侧外推,形成矿体/块段模型(图 4);完成矿体模型圈定后,建立矿体初始三维模型。

2.3 资源储量估算

常用的矿床资源储量估算方法包含几何法、距离幂次反比法、地质学统计法等,不同的方法具有不同的适用条件^[15-17]。在本研究评审备案地质报告资源估算中,采用的估算方法为地质块段法(几何法的一种);为了保证资源估算的准确性和合理性,本次三维模型资源估算也采用地质块段法,其估算原理如下。

块段面积为

$$S = S' / \cos \alpha,$$

式中: S —块段实际面积; S' —块段投影面积; α —块段平均倾斜面与投影面间的夹角。

块段体积为

$$V = S \cdot \bar{M},$$

式中: V —块段体积; \bar{M} —块段平均厚度。

块段矿石量为

$$Q = V \cdot \bar{D},$$

式中: Q —块段矿石量; \bar{D} —平均密度。

块段资源量为

$$P = Q \cdot C,$$

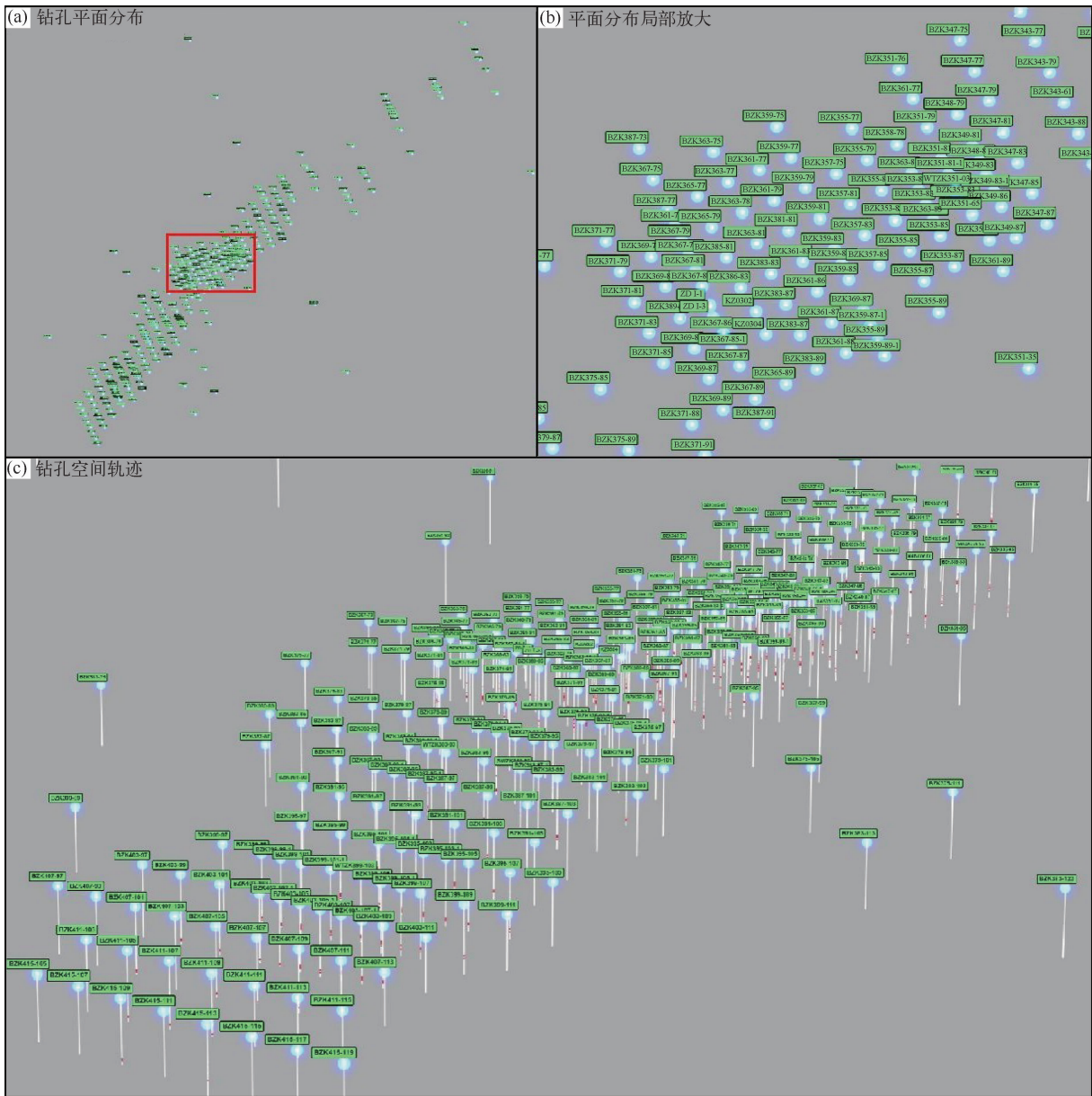
式中: P —块段资源量; C —平均品位。

经估算,矿床资源量与原地质报告备案的资源量相比,误差为-1.99%,处于规范允许误差范围($\pm 10\%$)内,符合估算要求。

3 资源储量动态监测

3.1 搭建时空架构

搭建时空架构是通过建立三维模型与各类数



(a) 钻孔平面分布图;(b)红框局部放大展示图;(c)钻孔空间轨迹图。

图 3 钻孔工程分布及空间轨迹

Fig. 3 Engineering distribution and spatial trajectory of drilling holes

据之间的逻辑关系,实现模型与数据的连通和相互作用。逻辑关系是时空架构中的核心概念,描述了三维模型与各类数据之间的连接、依赖和交互方式。以搭建三维模型中一个矿体与块段间树状逻辑关系为例,说明搭建时空架构过程。一个矿体(矿体 Pt1)有大部分已开采(块段 Pt1-1),小部分未开采(块段 Pt1-2);Pt1-1 的一部分(Pt1-1-1)分在 1

采区(简称 1[#]),另一部分(块段 Pt1-2)分在 2 采区(简称 2[#])。1 采区全部由块段 Pt1-1-1 组成,共有 28 个抽注单元(相当于 28 个块段),可描述为 1[#]-Pt1-1-1-1~1[#]-Pt1-1-1-28。块段 Pt1-1-2 在 2 采区有 6 个抽注单元(相当于 6 个块段),可描述为 2[#]-Pt1-1-2-1~2[#]-Pt1-1-2-6。建立矿体 Pt1 与各块段之间关系即为搭建时空架构的一部分(图 5)。

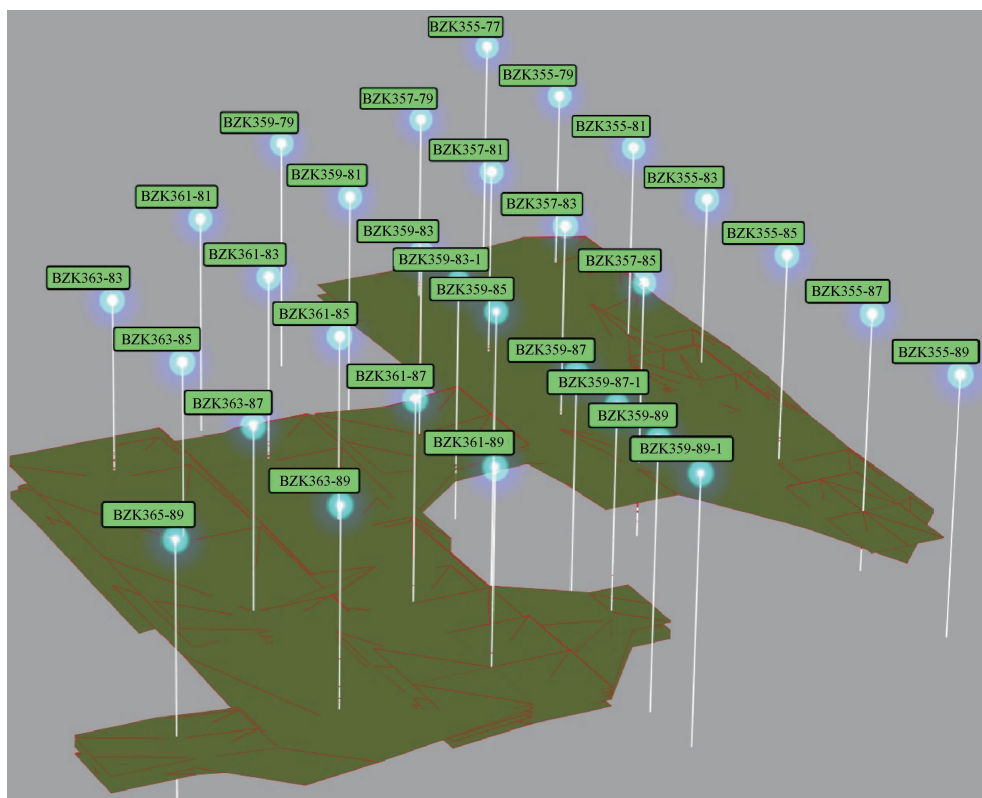


图 4 矿体模型

Fig. 4 Model of ore body

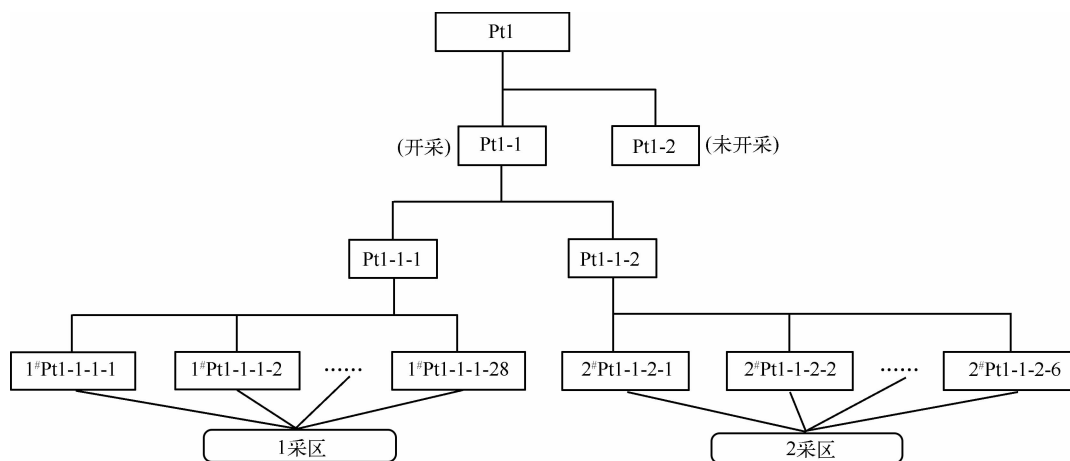


图 5 树状结构逻辑图

Fig. 5 Tree structure logic diagram

搭建时空架构主要包括建立三维模型空间形态(包括面积、体积、产状等)、资源量、矿体与块段和采区抽注单元、支管与主管及总管等之间的逻辑关系与数学模型(图 6)。通过建立总管、主管、支管之间的管网结构来实现三维模型与生产数据

逻辑关系的搭建,总管对应水冶厂,主管对应采区,支管对应抽注单元,逻辑关系搭建后可实现水冶厂、采区、抽液孔数据与模型之间的传输,使三维模型成为真正意义上的抽注单元模型,为接收和存储生产数据建立基础。

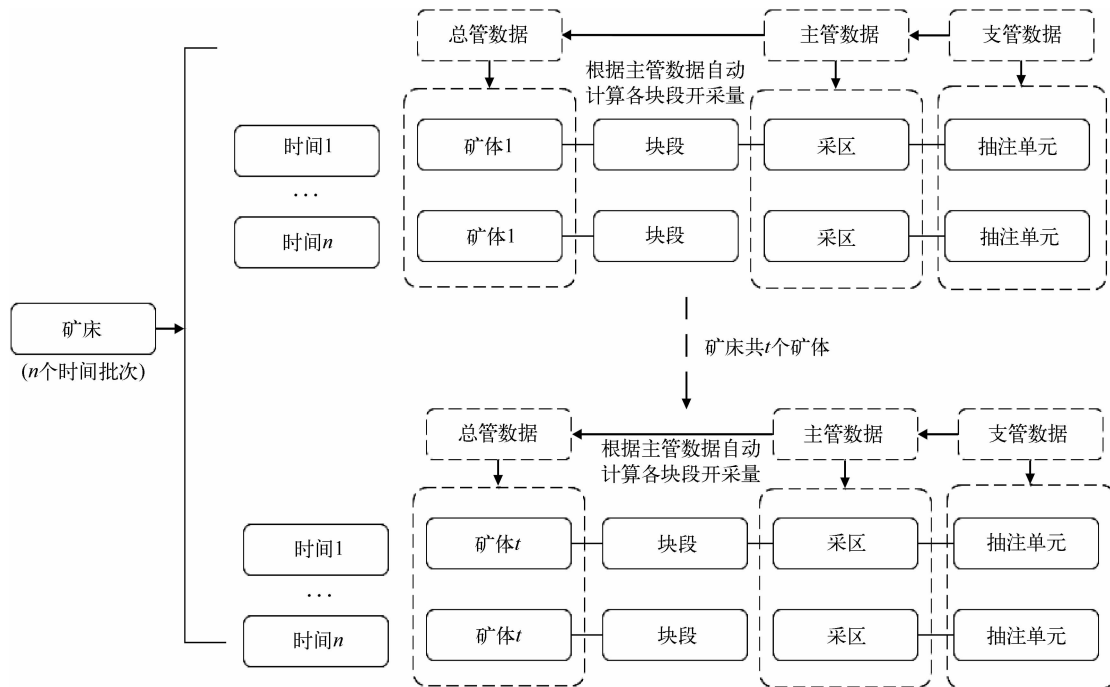


图6 矿床时空架构逻辑关系图

Fig. 6 Logical relationship diagram of the spatiotemporal architecture of mineral deposits

3.2 构建时空模型

构建时空模型时,首先设置时间,本矿床勘查过程分为详查阶段和勘探阶段(图7),矿山开采时间通常以月度、季度、年度为单位;然后在矿床初始三维模型基础上,根据勘查、生产探矿的钻孔信息更新矿体或块段三维模型,并重新估算其资源储量。

一般情况,在地浸矿山开采单体设计前,需要在矿床达到勘探程度的基础上(探明资源量)进一步生产探矿(即开拓资源量),而后根据井型井距设计和施工抽液孔、注液孔等生产钻孔,形成抽注单元(图8)。同时,随着工程间距的不断加密及勘查程度的加深,可能会出现矿体内部天窗(图7c)、矿体被分割为多个块段、矿体边界发生改变等情况;这直观反映出矿体查明程度越来越高,监测结果可为资源利用提供坚实基础。

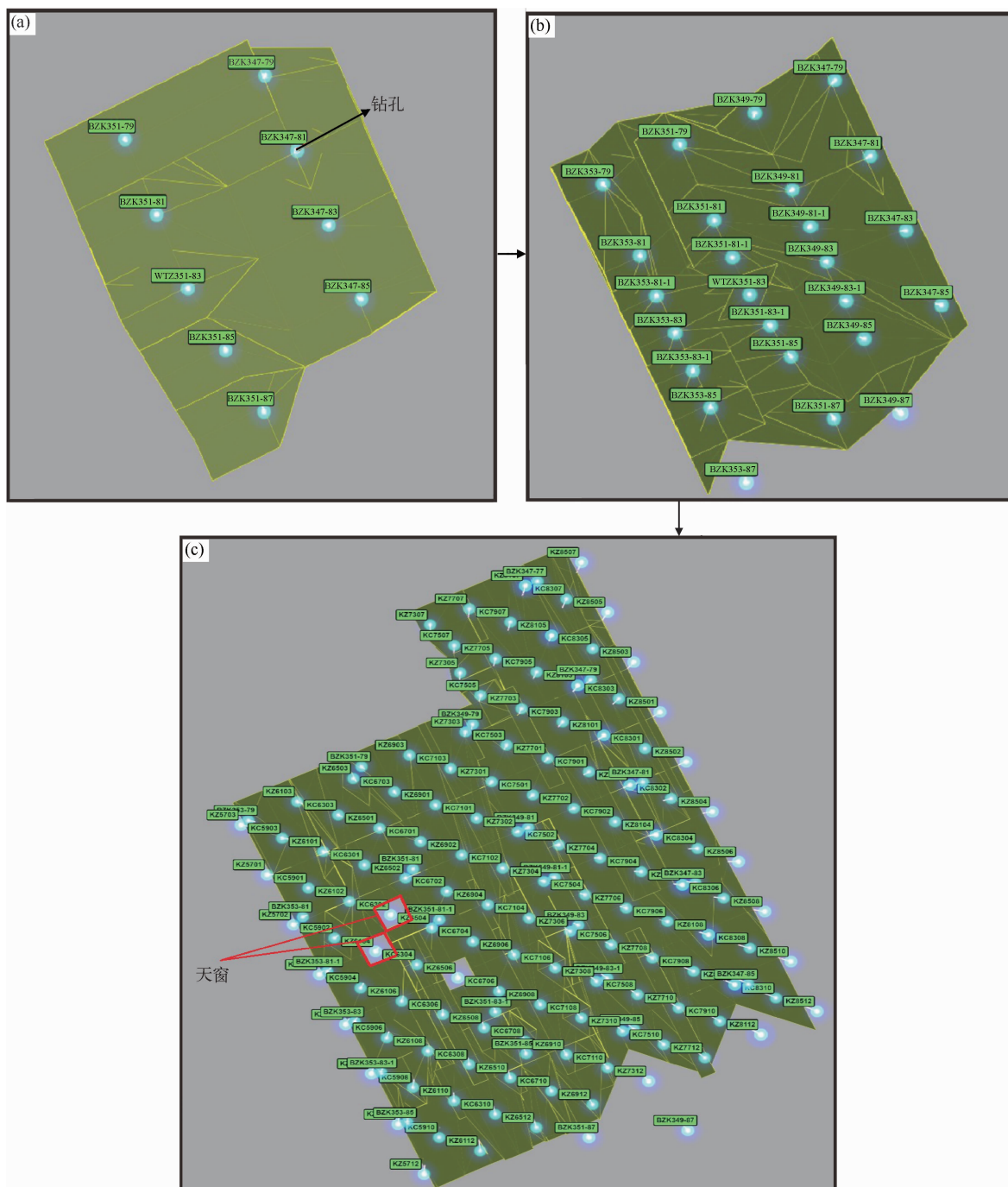
按照设置的时间,根据新增钻孔工程信息,对矿体/块段资源量、类型、开发状态及变化情况进行更新,结合矿床初始三维模型与资源储量估算等信息,搭建时空架构与更新的矿床三

维模型及资源储量估算信息等,进而构建矿床时空模型(图9)。

图9展示了矿床自勘查(详查和勘探阶段)至2019年的动态变化情况,并以块段I-2-5为例,详细展示其变化特征。可以看出,块段I-2-5详查阶段至勘探阶段发生变化,其原因是增加了钻探工程;2013—2014年,块段部分区域进行了井场开拓,矿体形态进一步发生变化;2015—2016年,块段形态未发生改变,此时处于生产状态;2017年,在块段未动用部分开展了进一步开拓工作,矿体形态再次发生变化,块段I-2-5整体处于生产状态;2018—2019年,因块段已开拓完毕,矿体形态不再发生改变,块段处于生产状态。

3.3 资源储量变化动态监测

由RDS系统构建和按设置时间更新的矿床时空模型,可实现矿床勘查至生产的全寿命周期资源保有、变化情况及变化原因动态监测。国内外矿业软件资源储量管理均可对当前时间下资源储量保有情况进行动态监测,但尚不能实现资源变化情况和变化原因动态监测。



(a) 详查阶段; (b) 勘探阶段; (c) 井场开拓。

图 7 块段 I-2-5 不同勘查阶段特征

Fig. 7 Characteristics of different exploration stages in block I-2-5

本研究主要讨论矿体形态特征及资源变化情况(勘探增减、重算增减)动态监测,矿床详查—勘探阶段至矿床完成基建后资源变化情况动态监测结果见表 4。

进入生产期后,实现生产期的年度资源储量

更新变化,需根据年度(或月度、季度)的各采区、抽注单元的浸出液量,结合浸出液铀浓度,计算采区、块段年度(或月度、季度)累计开采量、保有资源量,最终实现对矿床所有矿体/块段资源储量的动态监测(表 5)。

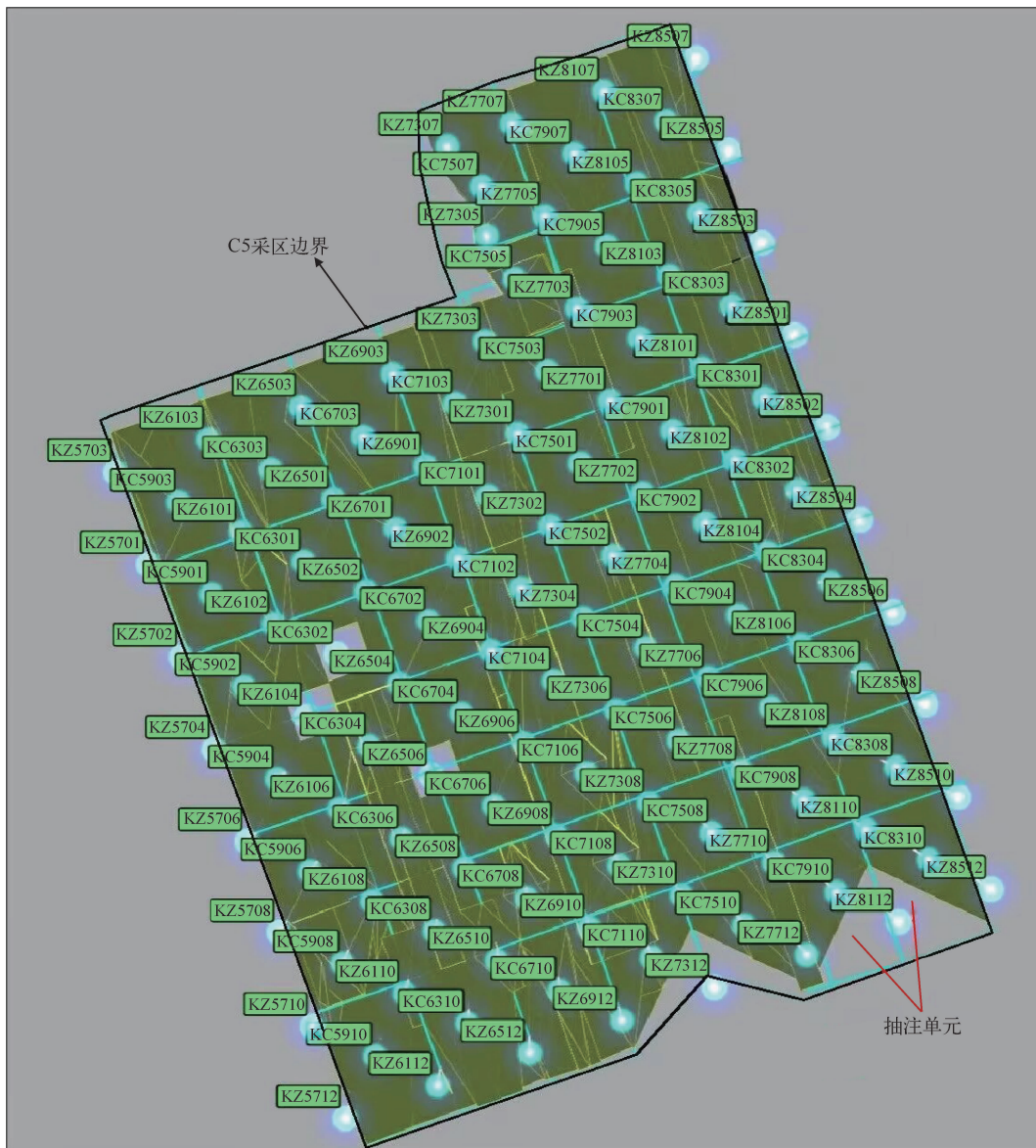


图 8 采区及抽注单元划分

Fig. 8 Division of mining areas and pumping units

表 4 勘查阶段部分矿体(块段)资源变化情况

Table 4 Resource changes of ore bodies (blocks) during the exploration phase

矿体/块段	资源类型	阶段(状态)	年度	资源量/t	较上一阶段增减/t	变化率/%
I-2-5	控制	详查	2009	237.4	—	—
	探明	勘探	2013	412.7	175.3	73.8
	探明	井场开拓	2017	402.6	-10.1	-2.4
I-2-4	控制	详查	2009	476.2	—	—
	探明	勘探	2013	445.3	-30.9	-6.5
	探明	井场开拓	2015	594.7	149.4	33.6

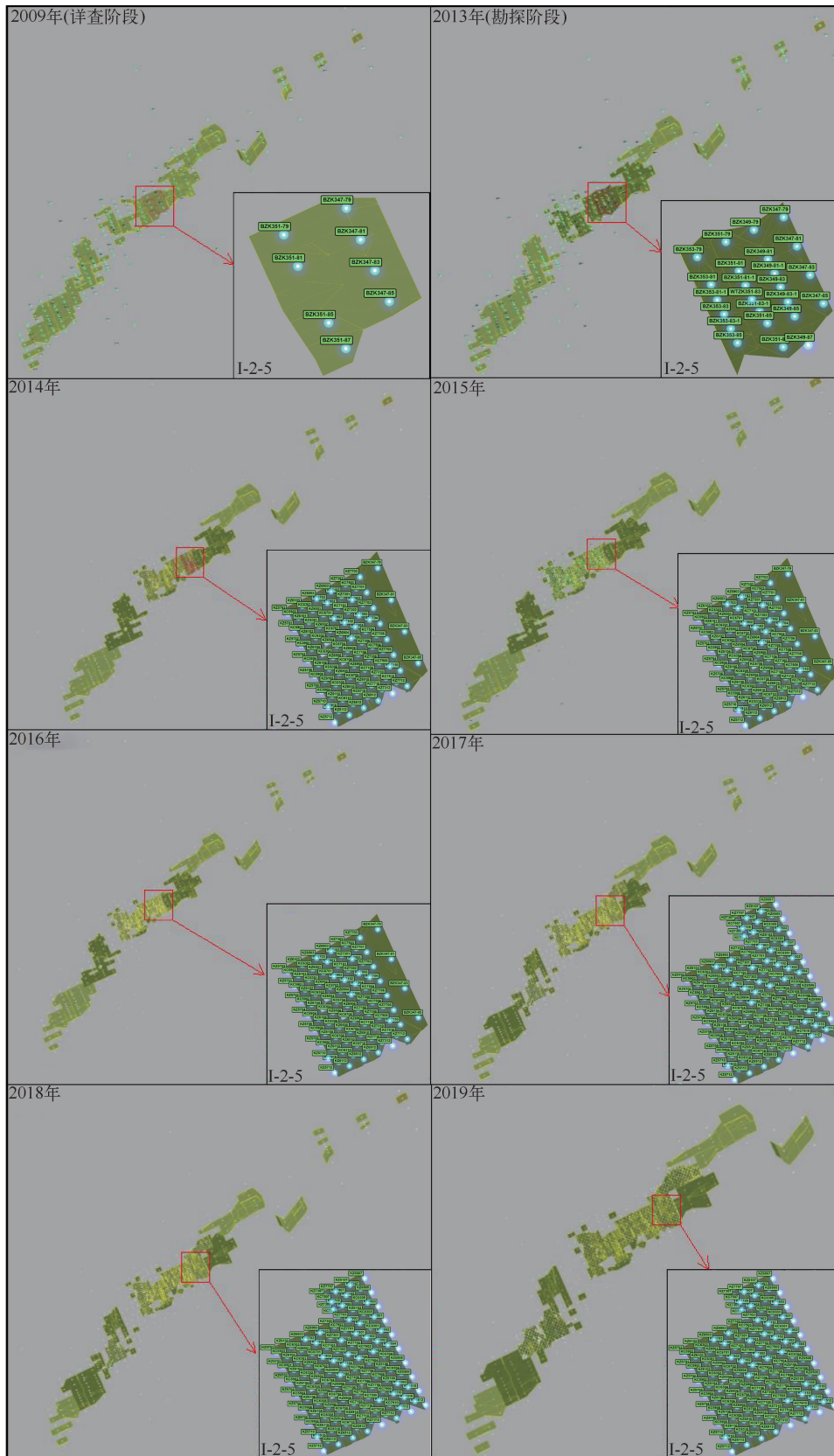


图 9 矿床不同时期变化特征

Fig. 9 Characteristics of changes of deposit during different periods

表5 生产期各块段资源储量动态监测

Table 5 Dynamic monitoring of resources and reserves in each block during the production period

块段	提交资源量/t	开拓资源量/t	开采年度	累计开采量/t	保有资源量/t
I-2-5	412.7	402.6	2015	0.04	402.6
			2016	36.1	366.5
			2017	80.7	321.9
			2018	131.2	271.4
			2019	165.8	236.8
I-2-4	445.3	594.7	2015	20.3	574.4
			2016	105.5	489.2
			2017	194.2	400.5
			2018	236.9	357.8
			2019	267.2	327.5

利用 RDS 系统构建的矿床时空模型不仅实现了矿床勘查阶段、开采过程资源变化情况及变化原因动态监测;还能结合矿床勘查阶段及生产阶段矿体/块段资源量、开发状态及其变化情况特征,对比分析矿体/块段详查-勘探-井场开拓至生产阶段的资源变化规律,预测整个矿床及其他类似铀矿山矿体/块段资源变化规律,指导矿山探矿和生产计划,为矿山生产提供精准基础。

4 资源利用研究

4.1 资源利用方法

资源储量动态监测可开展矿床-矿体(块段)-采区-抽注单元不同尺度的资源评价,实现铀资源的精细化管理,为矿山掌握资源变化规律、开展采掘或钻浸计划编制、合理有效利用资源等提供基础,为矿山生产计划、有效保护和充分利用资源储量提供有力支撑。具体包括:可估算与管理资源储量保有、变化情况,分析资源储量变化原因;根据年度动态更新的各矿体/块段(采区、抽注单元)资源

储量,计算当年和累计浸出率;结合矿山生产数据,预测矿体/块段可回采储量(证实储量);利用动态监测结果为矿山储量年报编制提供数据等。

目前矿山部门使用的资源利用方案存在一定差异,本研究利用 RDS 系统开展动态监测,结合其他地浸砂岩型铀矿山资源开采现状,提出地浸砂岩型铀矿山资源利用相关计算公式,进而得到符合矿山生产实际的资源利用计算方法。

常见的地浸砂岩型铀矿山资源利用计算方法主要有:1)使用浸出资源量与评审或备案资源量进行计算;2)使用浸出资源量与开拓资源量(累计查明资源)进行计算;3)使用回收金属量与补充勘探后估算资源量进行计算。由于矿山未开展系统的补充勘探工作,所以此次无法使用回收金属量与补充勘探后估算资源量进行计算。

4.2 资源利用结果

根据 RDS 系统统计的年度开采量和累计开采量,结合矿体或块段评审或备案资源量、累计查明资源量,计算资源利用率,统计结果见表 6。

表6 矿床部分矿体/块段不同方法资源利用对比

Table 6 Comparison of resource utilization using different methods for some ore bodies/blocks of the deposit

矿体 (块段)	评审备案 资源量/t	累计查明 资源量/t	开采 年度	年度 开采量/t	累计 开采量/t	依据评审备案资源量 计算资源利用率/%	依据累计查明资源量 计算资源利用率/%
I-2-5	412.7	402.6	2015	0.04	0.04	0.01	0.01
			2016	36.06	36.1	8.75	8.97
			2017	44.6	80.7	19.55	20.03
			2018	50.5	131.2	31.79	32.59
			2019	34.6	165.8	40.17	41.18
I-2-4	445.3	594.7	2015	20.3	20.3	4.56	3.41
			2016	84.7	105.5	23.69	17.74
			2017	88.7	194.2	43.61	32.66
			2018	42.7	236.9	53.20	39.84
			2019	30.3	267.2	60.00	44.93

注:数据截至 2019 年底。

从表 6 可看出,块段 I-2-5 和 I-2-4 累计查明资源量与地质提交资源量相比均有一定程度的变化;按照本研究的资源利用计算方法,分别计算了各块段不同年度资源利用率和累计资源利用率,由于矿床尚处于生产中,此次的资源利用率仅代表阶段性的结果。不同方法计算的资源利用率存在明显的差距,其根本原因在于以哪种资源量作为基准(分母)进行计算。实际中,需根据矿山生产情况合理确定资源利用率。

4.3 资源利用率探讨

本矿床采用地浸开采方式,在开采过程中,通过溶浸液与矿物的化学反应选择性地溶解矿石中的铀,矿石不产生位移^[18-20]。研究发现,矿床从勘查阶段直至井场开拓(投产前),随着钻探工程的不断加密,对矿体的控制越来越详细,矿体随之改变形态,资源量随之改变;地浸矿山投入生产后,矿体/块段累计查明资源量已确定,在此基础上通过布设采区,形成抽注单元,开采铀资源。矿体/块段投入生产时,资源最终状态或真实资源量,应是累计查明资源量,而采取地质提交资源量作为计算基准显然是不合理的。考虑资源利用率时应以累计查明资源量和开采量作为计算依据,而矿体/块段在勘查或开采过程中累计查明资源量与评审备案资源量的比值称为资源变化率。

综合上述动态监测、资源利用计算方法及矿体/块段利用结果得出,应以累计查明资源量(矿体形态及资源量不再发生改变)为基准,并结合逐年和累计开采量(回收资源量),计算资源年度利用率和累计利用率;依据累计查明资源量与评审

或备案资源量,计算资源变化率。

4.3.1 相关计算公式

年度资源利用率计算公式为

$$\delta = P_n / T,$$

式中: δ —年度资源利用率; P_n —第 n 个开采年度的开采量; T —矿体/块段累计查明资源量。

累计资源利用率计算公式为

$$\delta_{\text{累计}} = \sum_{i=1}^n P_i / T,$$

式中: $\delta_{\text{累计}}$ —累计资源利用率; P —矿体/块段年度开采量; T —矿体/块段累计查明资源量; n —开采年度。

矿体/块段资源变化率依据下述公式推导得出:

$$P_{\text{保}} = P_{\text{评}} + P_{\text{增减}} - P_{\text{开采}} - P_{\text{损失}},$$

式中: $P_{\text{保}}$ —矿体/块段保有资源量; $P_{\text{评}}$ —矿体/块段评审或备案资源量; $P_{\text{增减}}$ —矿体/块段累计增减量(包含勘探增减和重算增减); $P_{\text{开采}}$ —矿体/块段累计开采量; $P_{\text{损失}}$ —矿体/块段累计损失量(矿床为地浸开采,本次不考虑损失量)。

设 $P_{\text{保}} + P_{\text{开采}} + P_{\text{损失}} = T$,则矿体/块段资源变化率计算公式为

$$\Delta = (T - P_{\text{评}}) / P_{\text{评}},$$

即: $\Delta = P_{\text{增减}} / P_{\text{评}}$,

4.3.2 资源利用情况

相关计算结果见表 7。表中矿体/块段累计资源利用率仅代表当前阶段的利用率,整个矿体/块段的最终资源利用率应在矿体/块段达到终采时计算;同理,整个矿床的资源利用率应在所有矿体/块段达到终采时或不再开采时计算。

表 7 部分矿体/块段资源利用情况

Table 7 Resource utilization of some ore bodies/blocks

矿体(块段)	开采年度	年度资源利用率/%	累计资源利用率/%	资源变化率/%
I-2-5	2015	0.01	0.01	-2.4
	2016	8.96	8.97	
	2017	11.08	20.03	
	2018	12.54	32.59	
	2019	8.59	41.18	
I-2-4	2016	14.33	17.74	28.6
	2017	14.92	32.66	
	2018	7.18	39.84	
	2019	5.10	44.93	

5 结论

1) 利用资源储量四维动态评价系统(RDS系统),以勘查阶段钻孔空间轨迹为基础、剖面圈连矿层建模的方法建立三维初始模型,搭建空间模型与各类数据之间的时空架构,设置时间,根据新增钻孔工程信息、更新的矿床三维模型及估算资源储量等信息,构建矿床时空模型,从而实现矿床资源储量的动态监测。根据探采对比分析矿体/块段自详查-勘探-井场开拓直至生产阶段的变化规律,结合矿床生产数据,预测矿床可利用资源,为矿山生产、资源储量管理及计划提供基础。

2) 以资源储量动态监测为基础,结合地浸铀矿山开采方式及生产实际,研究得出地浸铀矿山资源利用率应以累计查明资源量为基准,并结合累计开采量计算。

参考文献:

- [1] 余牛奔,齐文涛,王立欢,等. 基于 3DMine 软件的三维地质建模及储量估算——以新疆巴里坤矿区某井田为例[J]. 金属矿山, 2015(3):138-142.
- [2] 徐静. 某多金属矿三维地质建模及储量估算[J]. 现代矿业, 2019, 35(11):98-101.
- [3] 张洋洋,周万蓬,吴志春,等. 三维地质建模技术发展现状及建模实例[J]. 东华理工大学学报(社会科学版), 2013, 32(3):403-409.
- [4] 刘彦奎,王欣然,李建,等. 基于 3DMine 的胶东上庄金矿体三维建模及其应用[J]. 山东国土资源, 2020, 36(12):53-54.
- [5] 邓勇,庄世勇,洪求友,等. 基于 DIMINE 软件的某铁矿地质建模及储量估算[J]. 地质学刊, 2018, 42(2):305-307.
- [6] 杨凯,刘玉龙,李新卫,等. Dimine 三维模型法在某铀矿山资源量估算的应用[J]. 西部探矿工程, 2020(12):139-141.
- [7] 刘永旭. MineSight 软件在矿山三级矿量动态管理中的应用[J]. 中国矿业, 2017, 26(12):166-170.
- [8] 杨克明,李保倩,韩光辉. 基于 Surpac 的三维地质建模及可视化应用[J]. 采矿技术, 2019, 19(2):128-129.
- [9] 尧亮亮. 东乡铜矿三维地质建模及储量估算[J]. 现代矿业, 2016, 572(12):166-167.
- [10] 张丽丽,霍晨琛. 地浸铀矿四维资源储量动态管理方法研究[J]. 铀矿冶, 2021, 40(3):180-183.
- [11] 霍晨琛,肖诗伟,张丽丽,等. 地浸开采资源储量四维动态评价系统在某铀矿山的应用[J]. 铀矿冶, 2021, 40(2):89-91.
- [12] 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.
- [13] 杨建新,梁齐端. 内蒙古苏尼特左旗巴彦乌拉铀矿床 B369—B347 线勘探地质报告[R]. 包头:核工业二〇八大队, 2013.
- [14] 陈安平,申科峰. 内蒙古二连盆地赛汉高毕—巴彦乌拉地区铀矿预查年度报告[R]. 包头:核工业二〇八大队, 2004.
- [15] 梁景利. 关于传统固体矿产资源储量估算流程及估算参数选择的探讨[J]. 有色金属(矿山部分), 2021, 73(1):53-54.
- [16] 唐攀,唐菊兴,林彬,等. 传统几何法与地质统计法在矿产资源储量估算中的对比分析[J]. 地质科技情报, 2016, 35(1):156-160.
- [17] 曹建洲,赵远由,谢环宇. 地质块段法在固体矿产资源储量估算的应用探讨[J]. 矿产勘查, 2015, 6(4):466-470.
- [18] 王海峰,谭亚辉,杜运斌,等. 原地浸出采铀井场工艺[M]. 北京:冶金出版社, 2018.
- [19] 苏学斌,张万亮,汤庆四,等. 地浸砂岩型铀矿储量关键指标技术经济分析[J]. 铀矿冶, 2015, 34(3):144-147.
- [20] 赵贺永,谭凯旋,刘绘真. 用层次分析法进行原地溶浸开采方法评价及优选[J]. 铀矿冶, 2007, 26(1):1-5.

