

## 二连盆地芒来铀矿床镭氡平衡系数研究

熊 攀

(核工业二〇八大队, 内蒙古 包头 014010)

**摘要:** 在可地浸砂岩型铀矿地质勘查中, 矿体的镭氡原始平衡状态被破坏, 造成  $\gamma$  测井解释得到的矿层铀含量偏低, 影响铀资源量估算的准确度。通过施工物探参数孔, 对  $\gamma$  测井解释的铀含量进行镭氡平衡系数修正。以二连盆地芒来铀矿床普查阶段施工的物探参数孔观测数据为例, 对参数孔内遭受破坏的矿段进行多次  $\gamma$  测井状态观测, 绘制相应的镭氡观测曲线, 并对采用平均值法和拟合法计算得到的镭氡平衡系数进行了对比分析。结果表明, 2 种计算方法得到的镭氡平衡系数相对误差均在  $\pm 3\%$  以内, 且采用拟合法计算的结果比平均值法计算的结果小, 采用拟合法有利于降低估算漏矿的可能性。通过建立数学非线性回归模型, 基于 MATLAB 软件运行编程语言实现对观测数据的曲线拟合, 得到可求极限的数学拟合公式。通过拟合法得到的曲线更符合理论上镭氡平衡破坏后的恢复情况, 求得的氡饱和状态观测值唯一且确定, 有效避免了因观测数据波动带来的不可控误差, 计算得到的镭氡平衡系数更为科学和准确。研究结果为该矿床铀资源储量的准确估算提供了客观可靠的修正系数, 也为铀矿山生产能力的预测提供了指导。

**关键词:** 芒来铀矿床; 物探参数孔; 镭氡平衡系数; 曲线拟合;  $\gamma$  测井

**中图分类号:** P619.14; TL2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2024)01-0012-08

**DOI:** 10.13426/j.cnki.uky.2023.03.02

伽马测井是地浸砂岩型铀矿勘查中必不可少的找矿手段之一。通过伽马测井可以快速有效定位铀矿体的空间位置及其平米铀量<sup>[1]</sup>, 从而进行铀资源储量估算。镭氡平衡系数是地浸砂岩型铀矿储量计算的重要修正参数之一<sup>[2]</sup>。在对岩层钻进时, 矿层的镭氡平衡自然状态遭受暂时破坏, 而镭氡平衡系数的准确计算是保证伽马测井定量解释准确性的必要条件之一。所以在进行铀资源储量估算时, 除了进行铀镭平衡系数修正<sup>[3-4]</sup>、湿度修正、井液吸收系数修正<sup>[5]</sup>外, 还须对伽马测井解释的铀含量进行镭氡平衡系数修正<sup>[6-8]</sup>。通过上述各项参数修正后的测井铀含量才能客观评价矿层的铀含量和矿体空间位置, 才能确保储量估算的准确性。

据最新铀矿工作规范的规定, 镭氡平衡系数计算方法可采用样品分析结果对比法(简称对比法)和物探参数孔观测法<sup>[9]</sup>, 这 2 种方法在实际工作中应用广泛, 但也存在一些问题。用对比法求得的单矿段镭氡平衡系数变化范围通常较大, 部分矿

段的镭氡平衡系数大于 1<sup>[10]</sup>, 这与疏松铀矿层钻进中存在的“压氡效应”现象相悖, 其计算值可信度不高。而物探参数孔观测法用  $\gamma$  探管实测物探参数孔氡气恢复过程中的放射性增长情况, 覆盖了整个矿段, 准确度高、人为干扰因素少, 求得的镭氡平衡系数更加可信。

依据物探参数孔观测数据计算镭氡平衡系数的方法有平均值法和拟合法。目前常采用平均值法求取镭氡平衡系数, 通常将最后 3 次氡状态观测值的平均值作为镭氡恢复平衡时的氡饱和值, 然而受观测时间、钻孔结构等因素的限制, 该值可能并不代表镭氡平衡后的饱和值, 其准确性不可控。针对镭氡平衡系数计算方法, 余冠军提出利用  $\gamma$  能谱测量方法求取镭氡平衡系数<sup>[11]</sup>, 这种方法较化学分析法具有快速、简单且经济的优点, 但目前砂岩型铀矿测井很少使用  $\gamma$  能谱测量方法; 武永利等采用幂函数对物探参数孔实测数据进行拟合求取镭氡平衡系数<sup>[12]</sup>, 阐述了幂函数的拟合原理, 但未表明如何实现幂函数的运行; 洪昆等利用氡浓度计算

**收稿日期:** 2023-03-02

**基金项目:** 中国核工业地质局“内蒙古二连盆地及周边铀矿资源调查评价与勘查”项目(202202)。

**第一作者简介:** 熊攀(1988—), 男, 陕西安康人, 学士, 工程师, 主要从事铀矿地球物理工作。

镭氡平衡系数<sup>[13]</sup>,此数值模拟方法应用较复杂,难以掌握;金永吉就某铀矿床个别物探参数孔镭氡平衡出现非正常恢复进行了探讨<sup>[14]</sup>,通过延长观测时间可降低异常因素对镭氡平衡系数计算结果可靠性的干扰。

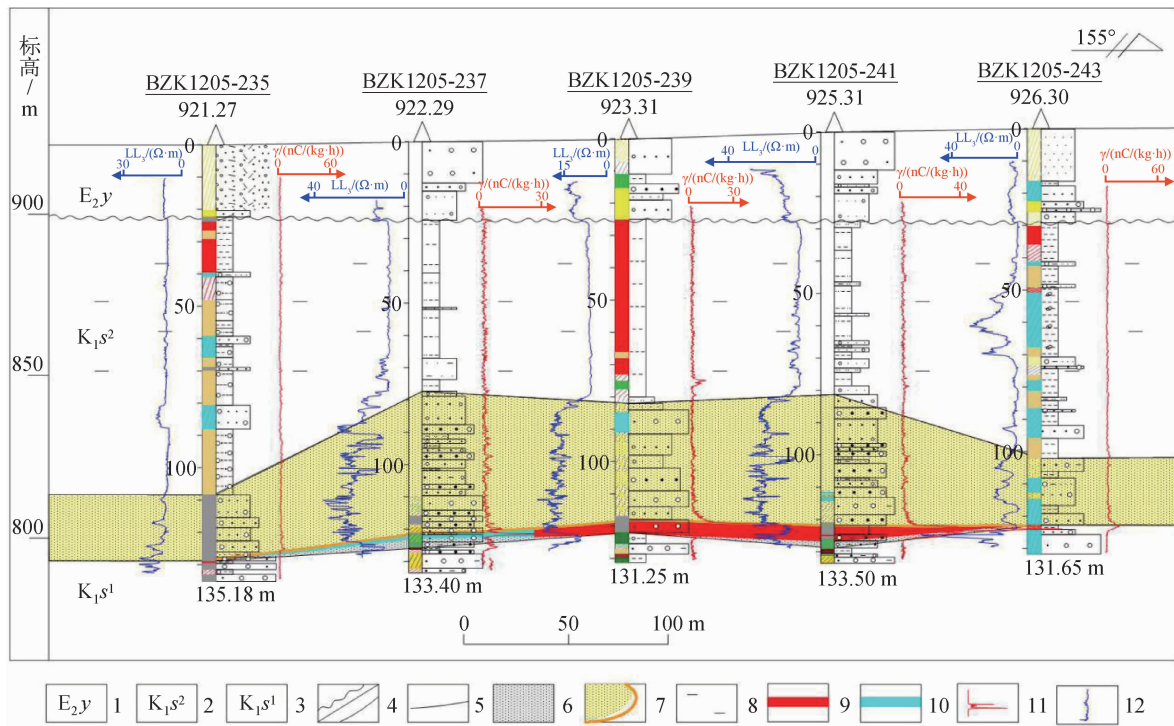
前人对镭氡平衡系数进行了诸多探讨和创新,但部分方法存在应用较复杂、适用性不强、不易操作等问题。鉴于此,有必要开展使用拟合法准确计算镭氡平衡系数的研究,这符合当下砂岩型铀矿勘查野外工作的实际需要。笔者以二连盆地芒来铀矿床普查阶段施工的物探参数孔镭氡观测数据为例,建立数学非线性回归模型,并基于 MATLAB 软件实现对镭氡观测数据的曲线拟合,得到可求极限的数学拟合公式,进而求得镭氡平衡系数,旨在为芒来铀矿床铀资源储量计算提供更准确、科学的参数。

### 1 矿区地质概况

二连盆地位于内蒙古自治区的中北部,是中国重要的产铀陆相盆地,由川井坳陷、乌兰察布坳陷、马尼特坳陷、腾格尔坳陷、乌尼特坳陷和苏尼特中

央隆起 6 个二级构造单元组成,其内部又分割为多个次级凹陷和次级凸起。马尼特坳陷夹持在巴音宝力格隆起和苏尼特隆起之间,呈北东向展布,由多个次级凹陷和凸起组成,基底形态复杂,凸凹相间格局非常明显。

芒来铀矿床位于该盆地中部的马尼特坳陷西部塔北凹陷的南西缘,该区自下而上钻遇的主要地层有下白垩统赛汉组下段、下白垩统赛汉组上段、古近系伊尔丁曼哈组。下白垩统赛汉组上段为研究区重要的含矿目的层。矿床矿带呈南北向带状展布,主矿体呈东西向展布,矿体埋深浅、形态简单,由北西、南西向北东缓倾;平面上,矿体厚度由南向北变小,品位由南西向北东变小。铀矿化受“古河谷”潜水—层间氧化带界面和赛汉组上段底板形态控制<sup>[15]</sup>,剖面上于含水层中氧化界面下部近底板的残留还原性砂体中近水平板状产出(图 1),以单层为主。岩性主要为灰色砂岩、含砾砂岩、砂质砾岩夹泥岩薄层,岩石固结较松散,富含炭屑与细分散黄铁矿等还原介质,主要发育辫状河沉积。矿石是以砂质砾岩、粗粒、中粒砂岩为主的含铀碎屑岩;矿石中铀以吸附态为主,铀矿物是芒



1—伊尔丁曼哈组;2—赛汉组上段;3—赛汉组下段;4—地层角度不整合/地层整合接触界线;5—岩性界线;6—灰色砂体;  
7—氧化砂体及氧化带前锋线;8—泥岩层;9—铀矿体;10—矿化体;11—定量伽马测井曲线;12—三侧向视电阻率测井曲线。

图 1 芒来勘查区南部 B1205 勘探线地质剖面图

Fig. 1 Geological profile of exploration line B1205 in the south of Manglai exploration area

来勘查区主要的铀存在形式,铀矿物以磷酸盐矿物和沥青铀矿为主,见少量铀石、钍石,多呈分散吸附态分布于泥质、有机质及黄铁矿周边;高品位矿石以四价铀为主;芒来铀矿床的成矿作用具有多期性,矿石的成矿年龄为 $(58.5 \pm 8.7)\text{Ma}$ 、 $(48.3 \pm 5.1)\text{Ma}$ ,成矿时代约为古近纪古新世和始新世;矿石总体偏铀。

## 2 镭氡平衡破坏检查

### 2.1 镭氡平衡破坏分析

$\gamma$ 测井是一种通过伽马测井仪沿井身测量岩层中放射性物质的伽马射线强度,进而计算铀矿品位、厚度和平米铀量的地球物理测井方法。当铀-镭-氡处于放射性平衡时, $\gamma$ 测井解释的铀含量就能真实客观地代表矿层的铀含量。而当铀矿层的天然状态被外界改变后,铀-镭-氡放射性平衡也随之遭到破坏,须对 $\gamma$ 测井计算的铀含量做相应的平衡系数修正。氡是一种能溶于水和有机溶剂的放射性气体,很容易被各种活性物质吸附在表面。当地应力、温度等外界环境条件发生变化时,会增强氡的扩散作用,导致镭氡放射性平衡状态被破坏<sup>[16]</sup>。

可地浸砂岩型铀矿层通常具有较好的渗透性和较高的孔隙度,其镭氡一直处于动态平衡的天然状态。当铀矿层遭遇钻进后,钻井液循环会对井壁产

生持续的压力,促使井液侵入围岩和含矿层,井液的侵入和气体扩散作用使得矿层水及溶解于其中的氡( $^{222}\text{Rn}$ )被挤压而离开孔壁,形成“压氡效应”<sup>[17]</sup>,造成铀矿层出现局部的镭氡不平衡现象,从而导致终孔后 $\gamma$ 测井照射量率数值偏低,不能客观准确解释铀矿层的空间位置和品位。

### 2.2 镭氡平衡破坏试验

芒来矿区内沿古河谷蕴藏着丰富的赛汉组碎屑岩孔隙水,承压水头较强,渗透性好,涌水量大,单孔涌水量可达 $500\text{ m}^3/\text{d}$ ;其含矿含水层由辫状河沉积的砂岩、砂质砾岩夹泥岩、泥质粉砂岩等组成,属软弱岩层和松散夹层,易于钻进。钻进过程易破坏含矿层的镭氡平衡状态。

在该地区水文地质孔进行了镭氡平衡破坏检查,结果见表1。现场试验时,先进行第1次 $\gamma$ 测井,然后向孔内注入 $6\text{ m}^3$ 清水,注水时间不小于 $6\text{ h}$ ;注水结束,待钻孔中的注水液面与注水前钻孔中的静水水位相同时,进行第2次 $\gamma$ 测井。根据注水前后 $\gamma$ 测井数据,绘制注水前后 $\gamma$ 测井曲线(图2)。可以看出,注水后矿段处的 $\gamma$ 测井照射量率之和( $S_2$ )明显小于注水前的 $\gamma$ 测井照射量率之和( $S_1$ ),且 $S_2/S_1$ 为 $0.87$ ,小于 $0.90$ <sup>[18]</sup>,该试验结果表明镭氡平衡遭到了严重的破坏。因此在进行铀资源储量估算时,须对伽马测井原始解释结果进行镭氡平衡系数修正。

表1 芒来铀矿床镭氡平衡破坏检查结果

Table 1 Inspection result of radium radon balance destruction in Manglai uranium deposit

钻孔类型	矿层位置/m	厚度/m	与矿段对应的 $\gamma$ 测井照射量率之和 $[(\text{nC}/(\text{kg} \cdot \text{h}))]$		$S_2/S_1$	备注
			注水前( $S_1$ )	注水后( $S_2$ )		
水文地质参数孔	101.60~111.20	9.60	4 292.63	3 714.05	0.87	注水 $6\text{ h}$ ,注水量 $6\text{ m}^3$

注:该水文地质参数孔仅用于观测水位,1年内未进行过其他试验,含矿含水层处已放置过滤器。

## 3 物探参数孔测量镭氡平衡系数

### 3.1 布设物探参数孔

物探参数孔是针对目的含矿含水层,为了定量确定矿床镭氡平衡系数而设置的工艺钻孔,必须布设在有代表性的工业矿块段处,依据参数孔结构设计(图3)施工。开孔后,要求含矿层一次钻进成井且不应扩孔,确保终孔测井条件与状态观测条件保持一致;含矿层矿芯采取率应大于或

等于 $85\%$ ,以满足取样分析结果与测井解释结果对比工作的要求。在裸眼孔终孔测井结束后,为了尽可能完整观察镭氡平衡恢复过程, $8\text{ h}$ 内应完成钢套管封孔,使用无缝钢管和水文地质孔止水方法(设置止水器)对目的含矿含水层进行密闭封堵;待顶板止水质量检查合格后,向钢套管底部投放填塞物,并用符合规范的清水置换套管内的冲洗液,然后进行第1次 $\gamma$ 测井。用水泥封闭止水器以上套管的外侧。水泥封孔后 $16\sim 24\text{ h}$ ,进

行固井和成井质量检查测井,检查封孔质量。

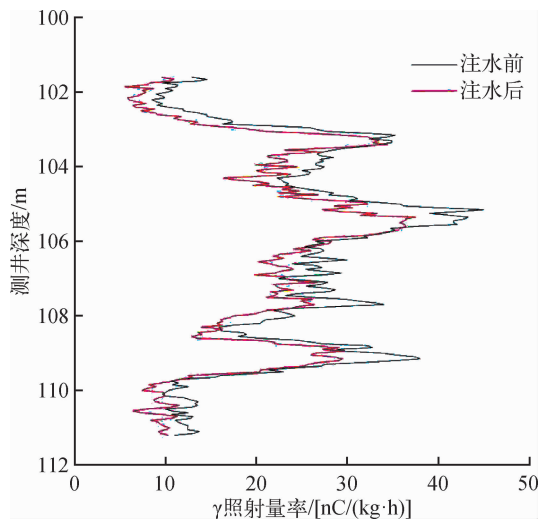


图 2 芒来铀矿床水文地质孔镭氡破坏试验曲线  
Fig. 2 Radium and radon damage test curve of hydrogeological hole in Manglai uranium deposit

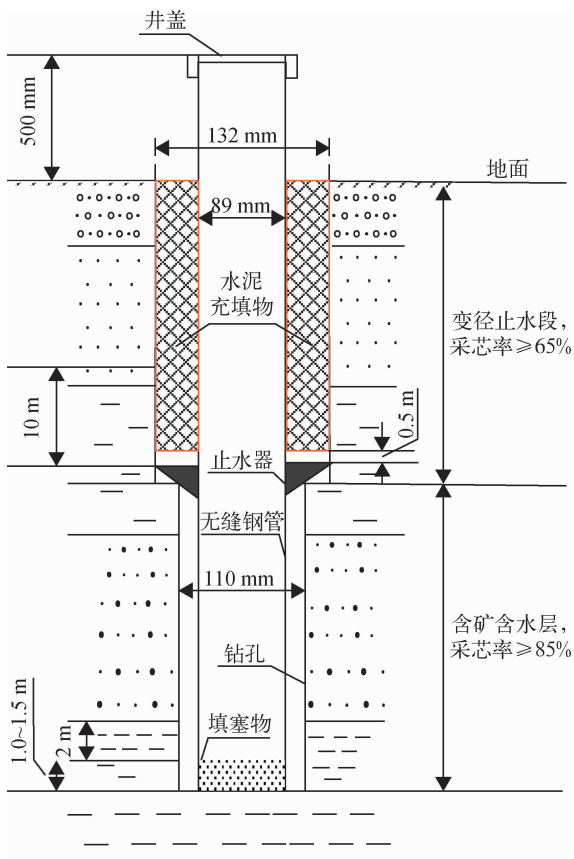


图 3 芒来铀矿床物探参数孔结构设计示意图  
Fig. 3 Structure design diagram for geophysical parameter pore of Manglai uranium deposit

### 3.2 采集观测数据

将物探参数孔封孔后,在钢套管内通过多次连续伽马测井对矿层中镭氡平衡恢复情况进行观测。氡的半衰期为 3.82 d,10 个半衰期后镭氡基本处于平衡状态。因此,γ 测井状态观测时间不得少于 38 d。第 1 个 4 d,氡气积累较快,每 8 h 进行 1 次 γ 测井观测;第 2 个 4 d,每 24 h 观测 1 次;然后每 2~5 d 测量 1 次,直到镭氡恢复平衡状态。为保证观测数据的可比性、减少误差,本测井与裸眼孔测井时使用的测井仪和测井车电缆均相同,观测 40 d 左右。

### 4 物探参数孔确定镭氡平衡系数

根据下套管前的 γ 测井结果,找出延伸到围岩且处于渗透性岩石中的铀矿段,计算出矿段内各测点 γ 照射量率之和( $\dot{X}_0$ );根据状态观测结果计算铀矿段内各测点经过铁套管和冲洗液吸收修正后的 γ 照射量率之和( $\dot{X}$ ),以( $\dot{X}$ )为纵坐标,以测量时间( $t$ )为横坐标绘制  $\dot{X}-t$  关系图。把各点用平滑曲线连接起来得到一条曲线,形成镭氡平衡状态观测曲线图<sup>[19]</sup>。据此,绘制了芒来铀矿床物探参数孔的镭氡状态观测曲线(图 4)。在渗透性铀矿段中若存在压氡效应,则镭氡平衡系数为

$$P_{Rn} = \frac{\dot{X}_0}{\dot{X}_\infty}, \quad (1)$$

式中: $P_{Rn}$ —镭氡平衡系数; $\dot{X}_0$ —下套管前的铀矿段各测点 γ 照射量率测量值之和, $nC/(kg \cdot h)$ ; $\dot{X}_\infty$ —镭氡平衡时铀矿段各测点 γ 照射量率测量值之和, $nC/(kg \cdot h)$ 。

#### 4.1 平均值法求镭氡平衡系数

目前通常将最后 3 次氡状态观测的 γ 测井照射量率的平均值作为镭氡恢复平衡时的氡饱和平均值<sup>[20]665</sup>。将该值与裸眼孔 γ 测井照射量率相比,可求得芒来铀矿床镭氡平衡系数(表 2)。该方法简易可行。

#### 4.2 拟合法求镭氡平衡系数

在实际应用中,测井速度和放射性本身的强弱等均会造成数据波动,采用最后几次观测数据的平均值作为饱和值与起始数据进行对比,不能完全反映氡气的恢复情况。因此,对参数孔的观测数据进行拟合以最大限度地接近参数孔中氡气的恢复情况。

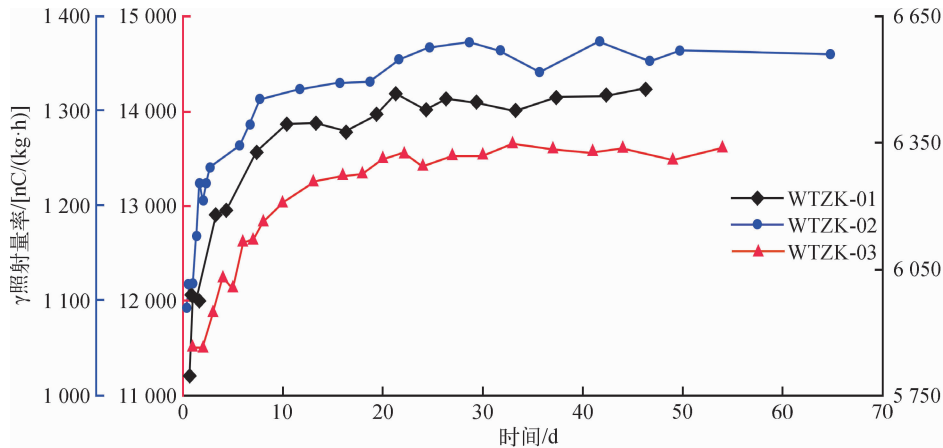


图 4 不同物探参数孔镭氡状态观测曲线

Fig. 4 Observation curves of different geophysical parameters hole for radium and radon states

表 2 平均值法求镭氡平衡系数

Table 2 Results of radium radon equilibrium coefficients by average method

物探参数孔孔号	$\dot{X}/[(nC/(kg \cdot h))]$					镭氡平衡系数
	裸眼井数据		最后 3 次观测值		最后 3 次观测值平均	
WTZK-01	5 720.70	6 464.43	6 467.95	6 485.72	6 472.70	0.88
WTZK-02	1 157.80	1 355.46	1 366.32	1 362.69	1 361.49	0.85
WTZK-03	12 148.34	13 631.40	13 507.71	13 637.26	13 592.12	0.89

注:据核工业二〇八大队实测。

通过使用 MATLAB 数学软件,可以对物探参数孔观测数据进行非线性拟合。选取恰当的数学模型,编写相应程序代码,然后导入观测数据,经 MATLAB 软件运行程序求得对应的数学公式,用于对该观测数据进行拟合求极限值。

对镭氡观测数据拟合可采用非线性拟合数学模型:

$$\dot{X}_t = a \times \dot{X}^{b/t} + c, \quad (2)$$

式中: $\dot{X}_t$ —镭氡平衡观测数据(观测数据指的是某个测量时间下,矿段处各测点的  $\gamma$  测井照射量率测量值之和)拟合值,  $nC/(kg \cdot h)$ ;  $\dot{X}$ —镭氡平衡观测数据,  $nC/(kg \cdot h)$ ;  $t$ —镭氡平衡观测测量时间,  $d$ ;  $a, b, c$  为拟合公式待定系数。

当观测时间  $t$  趋近于无穷大时,  $\dot{X}_t = a + c$ , 即得到镭氡恢复真正意义上平衡时氡饱和理论观测值。再将裸眼孔  $\gamma$  测井照射量率( $\dot{X}_0$ )与该氡饱

和理论观测值进行比较,即可求得镭氡平衡系数( $P_{Rn}$ )。

依据非线性拟合数学模型,对芒来铀矿床镭氡平衡状态观测曲线进行拟合,结果见图 5~图 7。可以看出,WTZK-01 参数孔最后 3 次观测数值与其拟合观测数值非常接近,WTZK-03 次之,WTZK-02 最次,这与各孔采用 2 种计算方法得到的镭氡平衡系数的相对误差绝对值变化规律保持一致。三者的差异可能是由钻孔内泥浆中含矿“砂”的沉降速率不同或者钻孔内井壁“泥皮”脱落的速率差异等因素造成的<sup>[20]667</sup>。其中,WTZK-01 钻孔拟合公式为  $\dot{X}_t = e^{8.7832-0.3291/t}$ , 氡饱和极限值为 6 523  $nC/(kg \cdot h)$ , 镭氡平衡系数值为 0.88; WTZK-02 钻孔的拟合公式为  $\dot{X}_t = e^{7.2377-0.9242/t}$ , 氡饱和极限值为 1 390  $nC/(kg \cdot h)$ , 镭氡平衡系数值为 0.83; WTZK-03 钻孔的拟合公式为  $\dot{X}_t = e^{9.5335-0.5625/t}$ , 氡饱和极限值为 13 870  $nC/(kg \cdot h)$ , 镭氡平衡系数值为 0.88。

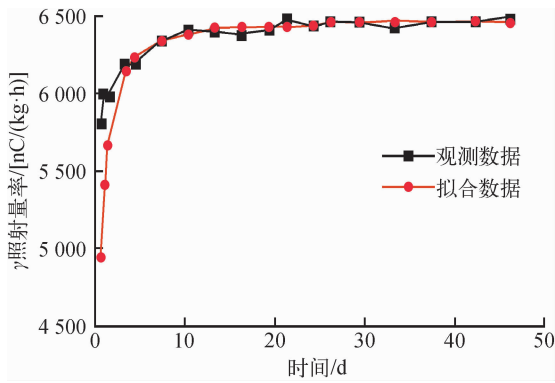


图 5 WTZK-01 钻孔镭氡观测数据拟合曲线  
Fig. 5 Fitting curve of radium and radon observation data of WTZK-01 borehole

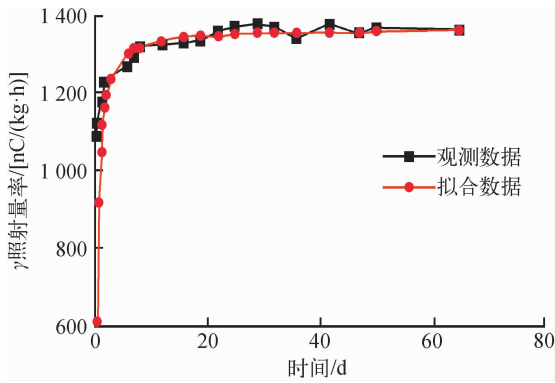


图 6 WTZK-02 钻孔镭氡观测数据拟合曲线  
Fig. 6 Fitting curve of radium and radon observation data of WTZK-02 borehole

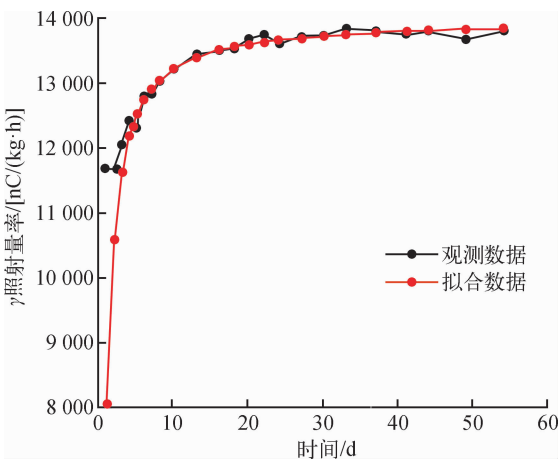


图 7 WTZK-03 钻孔镭氡观测数据拟合曲线  
Fig. 7 Fitting curve of radium and radon observation data of WTZK-03 borehole

### 4.3 计算结果对比分析

平均值法与拟合法计算结果对比见表 3。2 种计算方法得到的镭氡平衡系数值相对误差均在  $\pm 3\%$  以内,说明采用拟合法计算镭氡平衡系数可信度高且方法合理可靠。WTZK-02、WTZK-03 参数孔采用拟合法计算的镭氡平衡系数值比平均值法计算的小,采用拟合法计算结果有利于矿床资源量估算结果最大化,降低了估算漏矿的可能性。在 WTZK-01 参数孔采用 2 种方法计算的镭氡平衡系数的相对误差为 0,说明该孔镭氡平衡阶段的氡气恢复情况比较符合理论情况,可能是该孔孔内矿层情况稳定,观测手段一致性好的缘故。

表 3 平均值法与拟合法镭氡平衡系数计算结果对比  
Table 3 Comparison of calculated results of radium radon equilibrium coefficients using average method and fitting method

物探参数孔 孔号	镭氡平衡系数计算结果		绝对误差	相对误差/%
	平均值法	拟合法		
WTZK-01	0.88	0.88	0	0
WTZK-02	0.85	0.83	0.02	-2.35
WTZK-03	0.89	0.88	0.01	-1.12
矿床平均值	0.87	0.86	0.01	1.15

受限于生产成本、时间、观测人员认知水平等因素,个别物探参数孔最后几次观测数据所体现的平衡趋势不够理想或者说代表性不严谨,采用平均值法求得的镭氡平衡系数不能准确反映实际。物探参数孔 WTZK-01 与 WTZK-03 的观测时间均远大于镭氡破坏恢复平衡的理论时间,就二者观测时间而言,均已达到镭氡平衡,但最后 3 次的观测数据分别出现向上扬起的趋势和向下跌落趋势(图 4),所以根据最后几次观测值求得的平均值代表氡饱和值具有一定随机性,难以确定氡的饱和值。推测造成这一现象的原因可能与仪器性能的稳定性、物探参数孔的止水效果、矿区施工扰动导致含矿层状态改变等因素有关。

根据镭氡观测数据拟合得到的曲线十分光滑,呈渐变递增态势直至趋于稳定(图 5~图 7),无限接近氡饱和值,更符合理论上镭氡恢复平衡的客观情况,拟合曲线符合指数逼近形态,可求得

氡饱和时的极限值,能最大限度地消除偶然误差;而基于最后几次观测数据的波动变化趋势来判断氡是否达到最终饱和状态,是基于有限观测次数下的人为主观判定,其准确性不可控。因此,通过拟合法计算的镭氡平衡系数的准确性和可靠性更高。

## 5 结论

基于物探孔参数观测数据,采用平均值法计算镭氡平衡系数应用较广;拟合法因复杂、不易操作,应用较少。但 2 种方法的计算结果可以起到平行验证的作用,在平衡阶段最后几次观测数据波动性较大或平衡趋势不易确定时,除了通过提高观测次数来确保计算结果的可靠性,还可选用拟合数学模型。

根据观测数据拟合得到的曲线,其形态比常规氡状态观测曲线更符合理论上镭氡平衡破坏后的恢复规律,而且基于该方法求得的氡饱和状态观测值唯一且确定,可有效避免因最后几次观测值不准确带来的误差,计算出的镭氡平衡系数更为科学和准确,从而确保资源量估算修正值更真实可靠。

## 参考文献:

- [1] 核工业地质局,核工业二一六大队.  $\gamma$  测井规范: EJ/T 611—2005 [S]. 北京:核工业标准化研究所,2005.
- [2] 国家国防科技工业局. 硬岩型铀矿资源/储量估算指南: EJ/T 20015—2012 [S]. 北京:核工业标准化研究所,2012.
- [3] 陈霜,王浩锋,刘波,等. 巴音戈壁盆地塔木素铀矿床铀镭平衡系数研究及其地质意义[J]. 东华理工大学学报(自然科学版),2022,45(4):355-362.
- [4] 苗辰若. 伊犁盆地阔斯加尔地区西山窑组上段铀镭平衡系数特征及其地质意义[J]. 东华理工大学学报(自然科学版),2022,45(4):390-400.
- [5] 叶豪,井眼参数对铀裂变瞬发中子测井的影响及原位修正方法研究[D]. 南昌:东华理工大学,2023.
- [6] 黄建国. 砂岩型铀矿铀镭及镭氡平衡系数研究[D]. 南昌:东华理工大学,2017.
- [7] 黄笑,王殿学,蔡建芳,等. 地浸砂岩型铀矿勘查中物探参数孔的实施成果[C]//中国地质学会. 中国地质学会 2015 年年会论文摘要汇编. 西安:中国地质学会地质学报编辑部,2015.
- [8] 邓小卫,李继安,冯志杰,等. 可地浸砂岩型铀矿储量计算中的镭氡放射性平衡系数研究[J]. 铀矿地质,2003,19(6):356-359.
- [9] 李继安,张凯. 十红滩铀矿床北带镭氡平衡系数的计算及讨论[J]. 铀矿地质,2011,27(1):46-51.
- [10] 熊攀,王伟,黄镭俯,等. 巴彦乌拉铀矿床芒来地段镭氡平衡系数的计算及讨论[C]//中国核学会. 中国核学会 2021 年学术年会论文集. 北京:中国原子能出版社,2021.
- [11] 余冠军,刘宏章,尹旺明,等.  $\gamma$  能谱法测量铀矿石样品镭-氡平衡系数的初步探索[J]. 世界核地质科学,2009,26(4):237-240+244.
- [12] 武永利. 镭氡平衡观测数据的曲线拟合[J]. 西部资源,2017(6):120-122.
- [13] 洪昆. 某砂岩型铀矿镭氡平衡系数的数值模拟[D]. 南昌:东华理工大学,2022.
- [14] 金永吉,刘富强,王毛毛,等. 蒙其古尔铀矿床镭氡平衡恢复过程探讨[J]. 物探化探计算技术,2022,44(3):361-365.
- [15] 黄镭俯,熊攀,任晓平,等. 内蒙古苏尼特左旗巴彦乌拉铀矿床芒来地段勘查地质报告[R]. 包头:核工业二〇八大队,2018.
- [16] 何辉龙. 钻孔中氡的迁移模拟[D]. 南昌:东华理工大学,2018.
- [17] 王正其,刘庆成,管太阳,等. 钻井过程的 Ra-Rn 平衡位移效应[J]. 成都理工大学学报(自然科学版),2006,33(2):156-161.
- [18] 核工业地质局,核工业二〇三研究所. 地浸砂岩型铀矿镭氡平衡系数测量规程: EJ/T 1230—2008 [S]. 北京:核工业标准化研究所,2008.
- [19] 钟佳霖,张振强,夏毓亮. 钱家店铀矿床钱 II 块资源量估算参数特征[J]. 铀矿冶,2022,41(2):96-103.
- [20] 黄笑,王殿学,郭强,等. 宝龙山铀矿床镭氡平衡系数计算及讨论[J]. 东华理工大学学报(自然科学版),2022,38(4):662-670.

## Study on the Radium Radon Equilibrium Coefficient of the Manglai Uranium Deposit in Erlian Basin

XIONG Pan

(Geologic Party No. 208, CNNC, Baotou 014010, China)

**Abstract:** In the geological exploration of in-situ leachable sandstone type uranium deposits, the original equilibrium state of radium and radon in the ore body is disrupted, resulting in the low uranium content in the ore layer obtained from  $\gamma$  logging interpretation, which affects the accuracy of uranium resource estimation. By constructing geophysical parameter holes, the uranium content interpreted by  $\gamma$  logging is corrected for the radium radon equilibrium coefficient. Taking the observation data of geophysical parameter holes during the reconnaissance phase of the Manglai uranium deposit in the Erlian Basin as an example, multiple  $\gamma$  logging observations were conducted on the disrupted ore sections in the parameter holes, and corresponding radium and radon observation curves were drawn. The results of radium radon balance coefficients calculated using the average method and fitting method were compared and analyzed. The results show that the relative errors of the calculated values obtained by the two calculation methods are within  $\pm 3\%$ , and the results calculated using the fitting method are smaller than those calculated using the average method. Using the fitting method is beneficial for reducing the possibility of estimating leakage. By establishing an appropriate mathematical nonlinear regression model and running programming language based on MATLAB software, curve fitting of observed data is achieved, and a mathematical fitting formula that can calculate the limit is obtained. The curve obtained by the fitting method is more consistent with the recovery situation after the destruction of the radium radon balance in theory, and the radon saturation observation value obtained is unique and determined, effectively avoiding the uncontrollable error caused by the fluctuation of the observation data. The calculated radium radon balance coefficient is more scientific and accurate. The research results provide an objective and reliable correction coefficient for the accurate estimation of the uranium resource reserves of the deposit, and also provide guidance for predicting the production capacity of uranium mines.

**Key words:** Manglai uranium deposit; geophysical parameter hole; radium radon equilibrium coefficient; curve fitting;  $\gamma$  logging