

偏镭矿段对伽马测井解释和铀镭平衡修正结果的影响

姚益轩, 吴童盼, 杜志明, 邹玉涵, 胥国龙, 李星浩

(核工业北京化工冶金研究院, 北京 101149)

摘要: 伽马测井是在钻孔中定量确定矿段铀含量的基本方法。某砂岩型铀矿铀镭平衡被破坏, 为研究偏镭矿段(即镭的当量铀质量分数 $\geq 0.010\ 0\%$, 而铀质量分数 $< 0.010\ 0\%$ 的矿化段)对测井解释及其铀镭平衡修正结果的影响, 系统研究了可渗透矿样的铀、镭含量。结果显示: 对于铀质量分数 $\geq 0.010\ 0\%$ 的样品, 加权平均铀质量分数为 $0.042\ 7\%$, 铀镭平衡系数加权平均值为 0.615 , 离散系数为 1.041 ; 对于镭的当量铀质量分数 $\geq 0.010\ 0\%$ 的样品, 加权平均铀质量分数为 $0.029\ 5\%$, 铀镭平衡系数加权平均值为 0.890 , 离散系数为 3.785 。研究表明, 偏镭矿段的存在会显著提高矿床的铀镭平衡系数、增大矿体厚度, 并降低矿床铀品位。伽马测井无法识别并剔除偏镭矿段, 测井解释和铀镭平衡修正结果均不能客观反映矿体的空间位置、品位和厚度, 估算的资源量也不准确。

关键词: 砂岩型铀矿; 原地浸出; 伽马测井; 偏镭矿段; 铀镭平衡; 统计学

中图分类号: TD868; TL212 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2026)01-0058-10

DOI: 10.13426/j.cnki.yky.2025.03.08

2021 年, 全球 63.3% 的天然铀产量来自地浸开采^[1], 而中国的地浸采铀量占比高达 90% ^[2]。目前, 中国适宜于地浸开采的砂岩型铀矿主要分布在伊犁盆地、吐哈盆地、鄂尔多斯盆地、松辽盆地和二连盆地等区域^[3-5]。在铀矿地质勘查工作中, 伽马能谱测井、瞬发裂变中子测井等技术可用于测定钻孔中矿段的铀含量^[6-12]; 但伽马测井(伽马总量测井或定量伽马测井)依然是测定矿段铀含量, 确定铀矿体空间位置、品位和厚度的常用方法^[13]。在伽马测井中, γ 射线强度指示的是镭含量, 测井解释结果一般需通过井径、冲洗液密度、矿石湿度和密度、套管吸收等参数修正, 经 γ 照射量率换算系数计算得到铀含量。在铀镭平衡条件下, 镭的当量铀质量分数需经过钍和钾元素干扰校正及铀镭、镭氢平衡修正, 才能获得矿段的真实铀质量分数。

铀和镭的化学性质不同, 当地球化学及水文地质条件不同时, 含矿层中可能出现铀镭平衡被破坏、铀与镭空间分离现象。当平衡显著偏镭时, γ 射线强度可能较高, 但铀含量可能较低, 甚至出现“有镭无铀”的现象; 当平衡显著偏铀时, γ 射线强度可能较低, 而铀含量可能较高。铀矿体位置、

品位、厚度、资源量是地质勘查工作的重要成果, 也是地浸采铀试验和矿山设计、抽注液井过滤器定位安装^[14]、采区原地浸出率计算的重要依据。铀镭平衡系数和空间分离现象关系到铀矿体上述参数和资源量估算结果的可靠性, 也与铀成矿机理和控矿因素等有关^[15-18]。

在 M 铀矿床 20 条勘探线剖面、72 个钻孔中取样约 3 500 个并进行分析。铀质量分数 $\geq 0.010\ 0\%$ 的矿石样, 铀镭平衡系数普遍较小; 而镭的当量铀质量分数 $\geq 0.010\ 0\%$ 且铀质量分数 $< 0.010\ 0\%$ 的偏镭样较多, 铀镭平衡系数大。笔者根据普查地质报告, 研究偏镭矿段的空间发育特征, 分别计算边界铀质量分数和镭的边界当量铀质量分数以上的可渗透样品的平均铀含量、铀镭平衡系数及其离散系数等, 旨在探讨偏镭矿段对测井解释和铀镭平衡修正结果的影响。

1 铀镭平衡系数计算与修正方法

在放射性系列中, 任意两种核素的放射性平衡系数表示任意两种核素在岩(矿)石中的质量比与他们处于平衡状态时的质量比的比值。铀镭平

衡系数表示岩(矿)石中铀、镭的质量比与铀镭处于平衡时二者质量比的比值。铀镭平衡系数的计算公式为

$$K_P = w_{Ra} / (w_U \times 3.4 \times 10^{-7}),$$

式中: K_P 为铀镭平衡系数,无量纲; w_{Ra} 为样品中镭的质量分数,%; w_U 为样品中铀的质量分数,%; 3.4×10^{-7} 为铀镭处于平衡时铀和镭质量的比值,无量纲。在样品的铀、镭含量分析中,通常把镭的分析结果直接换算成铀镭处于平衡时镭的当量铀质量分数。当 $K_P < 1$ 时,表示样品偏铀;当 $K_P = 1$ 时,表示样品中铀、镭处于平衡状态;当 $K_P > 1$ 时,表示样品偏镭。

矿段、矿层、单工程、矿体或矿床铀镭平衡系数通常采用加权平均值($\overline{K_P}$),即对参与计算的每个单样的铀镭平衡系数进行铀质量分数和长度的加权平均。

$$\overline{K_P} = \frac{\sum_{i=1}^n (L_i w_U^i K_P^i)}{\sum_{i=1}^n (L_i w_U^i)},$$

式中: i 为样品序号; n 为样品总数,个; L_i 为第 i 个样品的长度,m; w_U^i 为第 i 个样品的铀质量分数,%; K_P^i 为第 i 个样品的铀镭平衡系数,无量纲。

铀镭平衡修正需利用铀、镭含量分析结果计算得到铀镭平衡系数($\overline{K_P}$),将伽马测井解释得到的矿段镭的当量铀含量(C_{Ra})修正成铀镭平衡遭到破坏时矿段的铀含量(C_U),修正公式为: $C_U = C_{Ra} / \overline{K_P}$ 。在实践中,若铀镭平衡系数为 $0.90 \sim 1.10$,伽马测井解释的当量铀含量一般不予修正;若铀镭平衡系数超出该范围,则必须修正。

2 偏镭矿段的空间发育特征

在 M 铀矿床的多数钻孔含矿层中均存在偏镭矿段,甚至在个别钻孔中仅存在偏镭矿段。偏镭矿段在点、线、面上的广泛发育,会影响铀矿体参数和资源量估算结果的可靠性。

2.1 单工程样品铀镭平衡特征

在砂岩型铀矿床样品铀、镭含量分析结果中,铀镭平衡系数一般小于 2.5,最大值为 $5^{[19-21]}$,偏镭样品较少。为充分展示 M 铀矿床铀镭平衡特征,分别选取 M 矿床 37-17 钻孔 749.69~761.02 m 孔深和 H 矿床 0811 钻孔 605.10~608.29 m 孔深样品共 16 个进行分析,结果见表 1。

表 1 单工程样品铀、镭含量分析结果比较

Table 1 Comparison of uranium and radium content analysis results for single engineering samples

M 矿床 37-17 钻孔						H 矿床 0811 钻孔					
取样位置/m		样长/m	$w_U/\%$	$w_{Ra}/\%$	K_P /无量纲	取样位置/m		样长/m	$w_U/\%$	$w_{Ra}/\%$	K_P /无量纲
自	至					自	至				
749.69	750.09	0.40	0.024 1	0.018 7	0.776	605.10	605.40	0.30	0.012	0.015	1.250
750.09	750.69	0.60	0.017 7	0.017 5	0.989	605.40	605.60	0.20	0.023	0.032	1.391
750.69	750.89	0.20	0.003 2	0.011 0	3.438	605.60	605.80	0.20	0.137	0.100	0.730
750.89	751.29	0.40	0.015 2	0.014 0	0.921	605.80	606.00	0.20	0.011	0.032	2.909
751.29	752.29	1.00	0.033 2	0.022 8	0.687	606.00	606.20	0.20	0.010	0.021	2.100
752.29	752.49	0.20	0.002 1	0.042 6	20.290	606.20	606.39	0.19	0.016	0.015	0.938
752.49	753.09	0.60	0.020 4	0.038 6	1.892	606.39	606.69	0.30	0.020	0.014	0.700
753.09	753.29	0.20	0.000 4	0.029 9	74.750	606.69	606.99	0.30	0.009	0.011	1.222
753.29	754.29	1.00	0.000 1	0.024 7	247.000	606.99	607.19	0.20	0.012	0.012	1.000
754.29	755.19	0.90	0.000 8	0.030 2	37.750	607.19	607.39	0.20	0.012	0.028	2.333
756.62	757.62	1.00	0.019 8	0.028 1	1.419	607.39	607.49	0.10	0.181	0.118	0.652
757.62	758.62	1.00	0.065 4	0.033 9	0.518	607.49	607.69	0.20	0.016	0.022	1.375
758.62	759.62	1.00	0.075 2	0.032 6	0.434	607.69	607.89	0.20	0.006	0.014	2.333
759.62	760.02	0.40	0.086 1	0.034 9	0.405	607.89	608.09	0.20	0.012	0.013	1.083
760.02	761.02	1.00	0.059 2	0.025 9	0.438	608.09	608.29	0.20	0.011	0.012	1.091
761.02	761.82	0.80	0.083 3	0.030 1	0.361	608.29	608.49	0.20	0.010	0.020	2.000

由表 1 可知,M 铀矿床单工程样品的铀镭平衡具有以下特征:1)偏镭样多、累计长度大,取样区间内偏镭样 5 个,累计长度为 2.50 m;2)偏镭样铀镭平衡系数大,取样区间铀镭平衡系数最大值为 247;3)多数矿石样铀镭平衡系数<1.000,紧邻偏镭样的矿石样铀镭平衡系数稍大。

2.2 沿层间氧化带发育方向偏镭矿段的发育特征

勘探线大致沿层间氧化带发育方向布置。

普查地段勘探线基本间距为 200 m,勘探线上钻孔基本间距为 200 m,加密勘探区钻孔间距为 100 m,沿层间氧化带发育方向钻孔从大到小编号。表 2 中 21、39 号勘探线大致处于普查地段中部,相距约 1 800 m。其中 21 号勘探线上 21-27 钻孔与 21-19 钻孔相距约 400 m,其他相邻钻孔间距约 200 m;39 号勘探线上相邻钻孔间距约 100 m。

表 2 沿层间氧化带发育方向偏镭样统计

Table 2 Statistics of Ra-rich samples along the direction of interlayer oxidation zone development

勘探线编号	钻孔编号	样品数量/个	累计长度/m	平均铀质量分数/%	平均当量铀质量分数/%	偏镭样 $\overline{K_p}$	单工程 $\overline{K_p}$
21	21-27	26	17.20	0.000 5	0.027 3	50.021	1.270
	21-19	30	18.31	0.001 9	0.016 8	8.690	1.036
	21-15	16	7.91	0.003 1	0.022 4	7.108	0.898
	21-11	4	3.40	0.000 7	0.023 0	32.542	0.939
39	39-23	35	20.10	0.001 0	0.014 3	14.422	2.025
	39-21	30	14.17	0.000 5	0.013 7	27.366	1.277
	39-19	15	8.71	0.000 9	0.015 9	16.841	0.739
	39-17	34	22.51	0.002 6	0.013 4	5.090	0.687
	39-15	27	—	—	—	—	0.640

由表 2 可知,21-27、39-23、39-21 钻孔单工程铀镭平衡系数 ≥ 1.27 ,平面上单工程所在区域视为偏镭区,其中 39-23 钻孔含矿层中分布 35 个偏镭样,累计长度达 20.10 m;21-19、21-15、21-11 钻孔单工程铀镭平衡系数为 0.898~1.036,平面上单工程所在区域视为铀镭平衡区,其中 21-19 钻孔含矿层中分布 30 个偏镭样,累计长度达 18.31 m;39-19、39-17、39-15 钻孔单工程铀镭平衡系数 ≤ 0.74 ,平面上单工程所在区域视为偏铀区,其中 39-17 钻孔含矿层中分布 34 个偏镭样,累计长度达 22.51 m。另外,39-15 钻孔含矿层中没有偏镭样。沿层间氧化带发育方向,单工程偏镭样品数量和累计长度总体有降低趋势,但变化规律未出现一致性;在偏镭、平衡和偏铀区域也呈现类似变化特征。

2.3 普查区内偏镭矿段的总体发育特征

通过取样分析发现,氧化带临近区的个别钻孔仅有偏镭样,如在 33-29 钻孔 719.64~735.35 m 孔深取样 23 个,累计长度为 12.85 m,加权平均铀质量分数仅为 0.000 2%,加权平均当

量铀质量分数为 0.015 3%,加权平均铀镭平衡系数为 67.655;还原带临近区的个别钻孔无偏镭样,如在 39-15 钻孔 744.10~762.70 m 孔深取样 27 个,累计长度为 15.04 m,加权平均铀质量分数为 0.026 0%,加权平均当量铀质量分数为 0.016 7%,加权平均铀镭平衡系数为 0.640。分析结果中偏镭样共 842 个,累计长度 497.90 m,加权平均铀质量分数为 0.001 3%;单样最高镭的当量铀质量分数为 0.365 0%,加权平均当量铀质量分数为 0.022 2%,铀镭平衡系数最大值为 2 607.127,最小值为 1.084,加权平均值为 17.459。不同当量铀质量分数区间内均有偏镭样分布,以当量铀质量分数的低值区间为主,当量铀质量分数<0.030 0%的样品占全部偏镭样的 85.15%。随着当量铀质量分数的提高,加权平均铀镭平衡系数不断增大,最大值为 250.866。当量铀质量分数 $\geq 0.070 0\%$ 后,加权平均铀镭平衡系数呈现跳跃式变化(表 3)。偏镭样铀镭平衡系数的算术平均值为 55.532,标准差为 118.040,离散系数为 2.156。

表 3 不同当量铀质量分数区间偏镭样统计

Table 3 Statistics of Ra-rich samples in different equivalent uranium grade intervals

镭的当量铀质量分数区间/%	样品数量/个	累计长度/m	当量铀质量分数/%		铀镭平衡系数	
			算术平均	加权平均	算术平均	加权平均
0.010 0≤w(eU)<0.020 0	539	323.35	0.014 1	0.014 0	40.121	11.405
0.020 0≤w(eU)<0.030 0	178	105.77	0.024 0	0.023 9	52.173	15.763
0.030 0≤w(eU)<0.040 0	50	28.51	0.034 2	0.034 2	79.623	30.173
0.040 0≤w(eU)<0.050 0	29	18.15	0.043 8	0.043 5	80.295	40.265
0.050 0≤w(eU)<0.060 0	18	10.07	0.054 0	0.054 6	82.124	66.289
0.060 0≤w(eU)<0.070 0	6	3.00	0.065 0	0.065 2	124.350	67.414
0.070 0≤w(eU)<0.080 0	1	0.20	0.075 6	0.075 6	250.866	250.866
0.080 0≤w(eU)<0.090 0	4	2.14	0.085 5	0.085 5	693.989	35.173
0.090 0≤w(eU)<0.100 0	1	0.20	0.092 3	0.092 3	27.830	27.830
w(eU)≥0.100 0	16	6.51	0.186 9	0.198 4	266.052	165.551
w(eU)≥0.010 0	842	497.90	0.023 5	0.022 2	55.532	17.459

为清晰展示样品的总体分布特征,去掉铀镭平衡系数>800.000[$w(eU)=0.083\ 3\%$, $K_p=2\ 607.127$; $w(eU)=0.195\ 8\%$, $K_p=856.374$]的 2 个偏镭样后,样品共 840 个(图 1),样品点主要分布在当量铀质量分数的小值区,铀镭平衡系数的算术平均值为 51.541,标准差为 73.776,离散系数为 1.431。

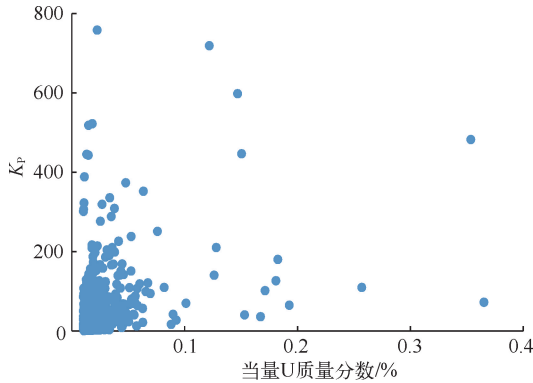


图 1 偏镭样当量铀质量分数与 K_p 关系散点图

Fig. 1 Scatter plot of equivalent uranium content versus K_p for Ra-rich halo samples

3 矿床铀品位和铀镭平衡系数计算

在铀矿测井解释中,当量铀质量分数 0.010 0%被定义为铀矿段的边界品位,而铀质量分数 0.010 0%则是砂岩型铀矿的边界品位^[22]。在计算铀镭平衡系数时,通常仅选取铀质量分数

≥0.010 0%的砂岩型铀矿样品进行分析,以确保数据的有效性和代表性。

3.1 铀质量分数≥0.010 0%的样品

铀质量分数≥0.010 0%的样品共 1 829 个,累计长度为 992.19 m。其中,单样铀质量分数最高为 1.562 7%,加权平均铀质量分数为 0.042 7%,加权平均当量铀质量分数为 0.026 3%;铀镭平衡系数最大值为 23.478,最小值为 0.102,加权平均值为 0.615,矿床整体严重偏铀(表 4)。铀镭平衡系数的算术平均值为 0.656,标准差为 0.683,离散系数为 1.041。随着铀质量分数的提高,铀镭平衡系数逐渐减小,铀质量分数<0.020 0%的样品铀镭平衡系数加权平均值最大为 0.878,最小为 0.541。当铀质量分数≥0.060 0%后,铀镭平衡系数呈现跳跃式变化。

去掉铀质量分数>0.900 0% [$w(U)=0.911\ 2\%$, $K_p=0.793$; $w(U)=1.562\ 7\%$, $K_p=1.108$]和铀镭平衡系数>10.000 [$w(U)=0.013\ 5\%$, $K_p=23.478$; $w(U)=0.013\ 3\%$, $K_p=10.718$]的各 2 个样品后,样品铀质量分数≥0.010 0样品总数为 1 825 个(图 2),铀镭平衡系数的算术平均值为 0.638,标准差为 0.355,离散系数为 0.556。大多数样品铀镭平衡系数<1.00;仅有少部分样品,特别是铀质量分数<0.100 0%的部分样品,铀镭平衡系数>1.00。

表 4 不同铀质量分数区间铀镭平衡系数

Table 4 Uranium-radium equilibrium coefficients for different uranium content intervals

铀质量分数区间/%	样品数量/个	累计长度/m	铀质量分数/%		铀镭平衡系数	
			算术平均	加权平均	算术平均	加权平均
0.010 0≤w(U)<0.020 0	263	140.38	0.015 3	0.015 3	0.962	0.878
0.020 0≤w(U)<0.030 0	394	229.87	0.025 4	0.025 5	0.640	0.624
0.030 0≤w(U)<0.040 0	432	234.52	0.034 4	0.034 4	0.593	0.585
0.040 0≤w(U)<0.050 0	313	176.85	0.044 5	0.044 5	0.574	0.559
0.050 0≤w(U)<0.060 0	153	84.75	0.054 2	0.054 0	0.559	0.541
0.060 0≤w(U)<0.070 0	84	40.71	0.064 2	0.064 1	0.623	0.630
0.070 0≤w(U)<0.080 0	46	20.26	0.074 3	0.074 3	0.572	0.575
0.080 0≤w(U)<0.090 0	28	12.52	0.084 8	0.084 6	0.672	0.624
0.090 0≤w(U)<0.100 0	22	9.39	0.096 1	0.096 9	0.612	0.557
w(U)≥0.100 0	94	42.94	0.201 4	0.181 6	0.672	0.680
w(U)≥0.010 0	1 829	992.19	0.045 6	0.042 7	0.656	0.615

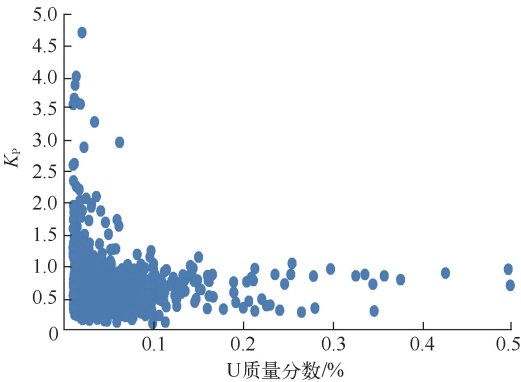


图 2 单样铀质量分数与 K_p 关系散点图
Fig. 2 Scatter plot of single-sample uranium content versus K_p

3.2 当量铀质量分数≥0.010 0%的样品

当量铀质量分数≥0.010 0%的样品共 2 450 个,累计长度为 1 381.42 m。单样当量铀质量分数最高为 1.731 7%,加权平均当量铀质量分数为 0.026 3%,加权平均铀质量分数为 0.029 5%;铀镭平衡系数最大值为 2 607.127,最小值为0.102,加权平均值为 0.890,矿床整体小幅偏铀(表 5)。铀镭平衡系数的算术平均值为 19.537,标准差为73.941,离散系数为3.785。当量铀质量分数≥0.040 0%且<0.060 0%的样品和当量铀质量分数≥0.100 0%的样品仅占全部样品的 9.02%,铀镭平衡系数加权平均值为1.052~1.191,基本平衡或稍偏镭,其他样品均偏铀,铀镭平衡系数加权平均最小值为 0.663。

表 5 不同当量铀质量分数区间铀镭平衡系数

Table 5 Uranium-radium equilibrium coefficients for different equivalent uranium content intervals

铀的当量铀质量分数区间/%	样品数量/个	累计长度/m	当量铀质量分数/%		铀镭平衡系数	
			算术平均	加权平均	算术平均	加权平均
0.010 0≤w(eU)<0.020 0	1 225	730.73	0.014 8	0.014 7	17.974	0.854
0.020 0≤w(eU)<0.030 0	671	378.99	0.024 1	0.024 1	14.314	0.803
0.030 0≤w(eU)<0.040 0	236	123.83	0.034 1	0.034 1	17.475	0.872
0.040 0≤w(eU)<0.050 0	95	47.24	0.044 1	0.043 8	25.093	1.166
0.050 0≤w(eU)<0.060 0	60	32.37	0.054 0	0.054 3	25.308	1.052
0.060 0≤w(eU)<0.070 0	34	15.31	0.064 7	0.064 7	22.734	0.844
0.070 0≤w(eU)<0.080 0	24	8.95	0.074 6	0.074 4	11.383	0.663
0.080 0≤w(eU)<0.090 0	25	11.42	0.085 1	0.084 8	111.652	0.790
0.090 0≤w(eU)<0.100 0	14	4.82	0.094 4	0.093 9	2.938	0.666
w(eU)≥0.100 0	66	27.76	0.212 7	0.188 6	65.733	1.191
w(eU)≥0.010 0	2 450	1 381.42	0.029 1	0.026 3	19.537	0.890

去掉当量铀质量分数 $>0.400\ 0\%$ [$w(eU)=0.476\ 1\%$, $K_p=0.960$; $w(eU)=0.722\ 9\%$, $K_p=0.793$; $w(eU)=1.731\ 7\%$, $K_p=1.108$] 的 3 个样品和铀镭平衡系数 >800.000 [$w(eU)=0.083\ 3\%$, $K_p=2607.127$; $w(eU)=0.195\ 8\%$, $K_p=856.374$] 的 2 个样品后,样品总数 2 445 个(图 3)。铀镭平衡系数的算术平均值为 18.160, 标准差为 49.510, 离散系数为 2.726。样品点主要分布在当量铀质量分数和铀镭平衡系数的小值区。

在当量铀质量分数 $\geq 0.010\ 0\%$ 的样品中包含了全部偏镭样,偏镭样品量占全部样品量的 34.37%, 累计长度占全部样品累计长度的 36.04%。在各当量铀质量分数区间均存在偏镭样,偏镭样占当量铀质量分数区间样品数的 4.17%~44.00%(表 6)。与图 1 对比可知,图 3 中除

了贴近水平轴的铀镭平衡系数低值点和左下角密集点区外,其他点位与图 1 完全重叠,表明绝大部分铀镭平衡系数高值点均为偏镭样。

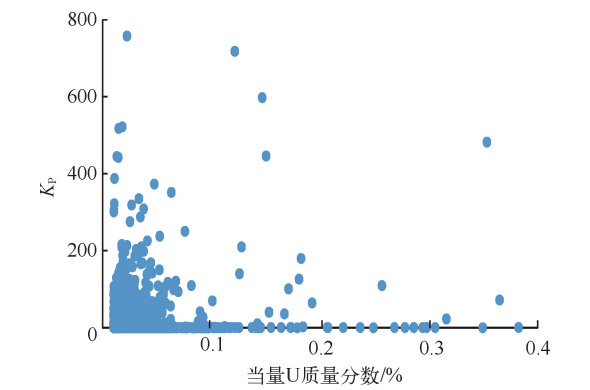


图 3 单样当量铀质量分数与 K_p 关系散点图
Fig. 3 Scatter plot of single-sample equivalent uranium content versus K_p

表 6 当量铀质量分数区间偏镭样数量和长度所占百分比 Table 6 Percentage of quantity and length of Ra-rich samples by equivalent uranium grade interval						
当量铀质量分数区间/%	样品数量			累计长度		
	当量铀样/个	偏镭样/个	占比/%	当量铀样/m	偏镭样/m	占比/%
$0.010\ 0\leq w(eU)<0.020\ 0$	1 225	539	44.00	730.73	323.35	44.25
$0.020\ 0\leq w(eU)<0.030\ 0$	671	178	26.53	378.99	105.77	27.91
$0.030\ 0\leq w(eU)<0.040\ 0$	236	50	21.19	123.83	28.51	23.02
$0.040\ 0\leq w(eU)<0.050\ 0$	95	29	30.53	47.24	18.15	38.42
$0.050\ 0\leq w(eU)<0.060\ 0$	60	18	30.00	32.37	10.07	31.11
$0.060\ 0\leq w(eU)<0.070\ 0$	34	6	17.65	15.31	3.00	19.60
$0.070\ 0\leq w(eU)<0.080\ 0$	24	1	4.17	8.95	0.20	2.23
$0.080\ 0\leq w(eU)<0.090\ 0$	25	4	16.00	11.42	2.14	18.74
$0.090\ 0\leq w(eU)<0.100\ 0$	14	1	7.14	4.82	0.20	4.15
$w(eU)\geq 0.100\ 0$	66	16	24.24	27.76	6.51	23.45
$w(eU)\geq 0.010\ 0$	2 450	842	34.37	1 381.42	497.90	36.04

4 单工程测井解释及其铀镭平衡修正

在普查地质报告中,采用当量铀质量分数 $\geq 0.010\ 0\%$ 的样品计算得出矿床的铀镭平衡系数为 0.89。根据单工程铀镭平衡系数的差异,将单工程所在区划分为偏镭区、平衡区和偏铀区。其中以偏铀区为主,各区域的平均铀镭平衡系数分别为 1.50、1.00、0.67。单工程测井解释结果修正参数为:分区采用相应的铀镭平衡系数、镭氢平衡系数为 0.88、钍和钾元素的干扰不需要修

正。为验证修正参数的合理性,从偏镭区、平衡区和偏铀区分别选取偏镭样厚度较大、平米铀量较高的 2 个典型钻孔,对比其矿段的取样分析结果、测井解释结果及修正后的铀质量分数,见表 7。可以看出,矿石段累计厚度为 125.77 m,偏镭样累计厚度为 78.75 m,含偏镭样的取样段相对于矿石段累计厚度平均增幅为 62.61%,其中 11-1B 钻孔最大增幅达 366.72%,37-21 钻孔最小增幅为 25.63%。以厚度加权的矿石段平均铀质量分数为 0.069 2%,取样段平均铀质量分数为 0.038 6%,取

样段相对于矿石段平均铀质量分数降幅达 44.22%，其中 11-1B 钻孔最大降幅为 77.73%，37-21 钻孔最小降幅为 22.22%。带入偏镭矿段后，主矿段厚度大幅增加，铀质量分数大幅贫化。

表 7 单工程主矿段不同方法确定的铀质量分数比较
Table 7 Comparison of uranium content determined by different methods in the main mineralized interval of a single borehole

钻孔 编号	单工程 $\bar{K}_p$	取样分析结果				测井解释结果		放射性平衡修正后结果	
		取样位置/m	取样段 $w(U)/\%$	矿石段 $w(U)/\%$	偏镭样 厚度/m	测井段位置/m	$w(eU)/\%$	矿段位置/m	$w(U)/\%$
11-1B	3.404	794.68~823.15	0.015 9	0.071 4	22.37	794.40~823.10	0.042 5	794.55~822.95	0.032 4
								852.95~878.65	0.085 6
13-11	1.229	852.44~879.11	0.115 9	0.207 3	9.42	852.85~879.05	0.111 2	878.65~878.85	0.032 5*
								878.85~879.05	0.022 0
21-19	1.036	695.05~730.05	0.017 1	0.044 4	18.53	697.95~704.25	0.018 0	695.35~729.95	0.017 6
						705.65~729.95	0.017 1		
13-15	1.085	795.45~818.57	0.027 4	0.052 5	8.85	795.65~818.55	0.032 7	795.45~818.55	0.036 9
37-21	0.708	806.49~851.81	0.036 4	0.046 8	9.13	806.75~844.05	0.024 0	806.55~851.75	0.036 0
39-19	0.739	775.54~821.48	0.031 9	0.042 7	10.45	775.55~804.55	0.022 8	775.55~821.45	0.032 0

注：* 表示该矿段岩性为不可渗透的粉砂岩。

以厚度加权的测井段平均当量铀质量分数为 0.039 9%，较取样段平均铀质量分数仅提高了 3.37%，表明在铀镭基本平衡的主矿段，将偏镭矿段视为铀矿段时的测井解释结果可靠；但偏镭且偏镭矿段厚度占比高的工程，测井段当量铀质量分数相对于取样段铀质量分数大幅提高；反之，偏铀且偏镭矿段厚度占比小的工程，测井段当量铀质量分数相对于取样段铀质量分数可能会大幅降低并丢失铀矿段。如 11-1B 钻孔铀镭平衡系数为 3.404，偏镭样厚度占取样段厚度的 78.57%，测井段当量铀质量分数相对于取样段铀质量分数提高了 167.30%；而 37-21 钻孔铀镭平衡系数为 0.708，偏镭样厚度只占取样段厚度的 20.15%，测井段当量铀质量分数相对于取样段铀质量分数降低了 34.07%，同时丢失了 7.76 m 铀矿段。

放射性平衡修正后以厚度加权的矿段平均铀质量分数为 0.037 8%，相对于取样段平均铀质量分数仅降低了 2.07%；说明上述钻孔铀镭平衡修正方法基本合理，但比矿石段平均铀质量分数降低了 45.38%。偏镭和平衡区的钻孔降幅偏大，偏铀区的钻孔降幅较小，其中 21-19 钻孔铀质量分数最大降幅为 60.36%，37-21 钻孔最小降幅为 23.08%。

偏镭矿段相当于铀矿段间的夹石，应该被剔

除。带入偏镭矿段会导致矿体厚度大幅虚高，修正后单工程主矿段平均厚度增大约 61.64%。偏镭样的铀镭平衡系数特别大，其厚度占主矿段厚度的比例和所在当量铀品位区间决定了单工程铀镭平衡系数大小，导致单工程主矿段测井解释及其修正后的铀质量分数变化幅度偏大。

5 矿床测井解释及其铀镭平衡修正

本矿床铀、镭含量样品的取样方法及样品代表性均符合行业标准要求^[23]，且样品数量充足、数据可靠。基于铀质量分数≥0.010 0%的样品计算，矿床的加权平均铀质量分数为0.042 7%，可代表矿床实际平均铀品位；而基于当量铀质量分数≥0.010 0%的样品计算，矿床的加权平均铀质量分数为 0.029 5%，该结果可视为通过钻孔伽马测井解释及其修正结果计算得到的矿床平均铀品位。与矿床实际平均铀品位相比，测井解释修正后的矿床平均铀品位的贫化率达 30.91%。

在测井解释时，当量铀质量分数≥0.010 0%的偏镭矿段均被视为铀矿段，从而导致矿段厚度出现脱离实际的虚高现象。以铀、镭含量分析结果统计的铀质量分数≥0.010 0%的样品累计长度为 992.19 m，当量铀质量分数≥0.010 0%的样品累计长度为 1 381.42 m，矿段总厚度增大了

39.23%。

基于当量铀质量分数 $\geq 0.010\ 0\%$ 的样品计算得出的铀镭平衡系数的离散度过大。从表5可看出,全部样品铀镭平衡系数的算术平均值与加权平均值存在数量级差别,当量铀质量分数区间样品铀镭平衡系数的算术平均值最高达111.652。加权平均严重淡化了不同样品之间客观存在的铀镭平衡系数的巨大差异性,即使按照普查地质报告中分区采用不同的铀镭平衡系数去修正测井解释结果,计算出的铀质量分数也不能反映矿层、矿体、单工程或矿床实际的铀品位。基于铀质量分数 $\geq 0.010\ 0\%$ 的样品计算得出的铀镭平衡系数的离散度相对较小,理论上用铀镭平衡系数0.615去修正测井解释结果更合理,计算得到的矿床平均铀品位更接近实际值,但修正后偏镭矿段的铀品位会更高、厚度更大,还可能丢失铀矿段。

6 结论

M 铀矿床铀镭平衡被破坏,铀矿石严重偏铀,加权平均铀镭平衡系数为0.615;偏镭矿段“有镭无铀”、铀镭平衡系数高,加权平均铀质量分数仅为0.0013%,加权平均铀镭平衡系数为17.459;铀与镭空间分离,大多数钻孔含矿层中均存在偏镭矿段,个别钻孔中仅有偏镭矿段。

带入大量偏镭矿段会显著提高矿床的铀镭平衡系数、增大矿体厚度、降低矿床铀品位。铀质量分数 $\geq 0.010\ 0\%$ 的样品加权平均铀镭平衡系数总体反映了铀矿石的平衡状态,加权平均铀质量分数基本代表了矿床实际的平均铀品位。相对于铀质量分数 $\geq 0.010\ 0\%$ 的样品计算值,当量铀质量分数 $\geq 0.010\ 0\%$ 的样品加权平均铀镭平衡系数提高了44.72%,累计长度增大了39.23%,加权平均铀品位的贫化率达30.91%。单工程案例中放射性平衡修正后的主矿段平均厚度增大了61.64%,比矿石段平均铀质量分数降低了45.38%。

本矿床包含偏镭矿段在内的测井解释结果可靠,铀镭平衡修正方法基本合理。由于伽马测井无法识别偏镭矿段,测井解释和铀镭平衡修正也无法消除偏镭矿段的影响,因此,本矿床已不再适合采用伽马测井确定矿段铀品位,在当前的技术条件下,钻探岩芯取样分析或采用瞬发裂变中子测井可以减少确定矿段铀品位时的误差。

参考文献:

- [1] Nuclear Energy Agency Organisation for Economic Co-operation and Development. Uranium 2022: Resources, production and demand[M]. IAEA, 2022.
- [2] 阳奕汉, 苏学斌, 陈梅芳, 等. “数字建井”在砂岩型铀矿地浸开发中的探索与应用[J]. 中国矿业, 2022, 31(12): 64-69.
YANG Yihan, SU Xuebing, CHEN Meifang, et al. Exploration and application of “digital well construction” in in-situ leaching of sandstone uranium deposit[J]. China Mining Magazine, 2022, 31(12): 64-69.
- [3] 蔡煜琦, 张金带, 李子颖, 等. 中国铀矿成矿规律与百年勘查成果及新一轮找矿突破行动建议:《中国矿产地质志·铀矿卷》研编[J]. 地球学报, 2025, 46(1): 52-68.
CAI Yuqi, ZHANG Jindai, LI Ziyang, et al. Metallogenic regularity, centennial exploration results of uranium deposits in China, and suggestions for a new round of prospecting: Research and compilation of “Geology of Mineral Resources in China • Uranium Deposits Volume” [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2025, 46(1): 52-68.
- [4] 胡小文, 杨晓勇, 任伊苏, 等. 准噶尔盆地沉积环境-构造演化对砂岩型铀矿成矿的控制作用[J]. 大地构造与成矿学, 2020, 44(4): 725-741.
HU Xiaowen, YANG Xiaoyong, REN Yisu, et al. Sedimentary environment and tectonic evolution of Junggar Basin: Constrains on the mineralization of sandstone-type uranium deposits[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2020, 44(4): 725-741.
- [5] 焦养泉, 吴立群, 荣辉, 等. 沉积、成岩与铀成矿: 中国砂岩型铀矿研究的创新发现与认知挑战[J]. 地球科学, 2022, 47(7): 3580-3602.
JIAO Yangquan, WU Liqun, RONG Hui, et al. Sedimentation, diagenesis and uranium mineralization: innovative discoveries and cognitive challenges in study of sandstone-type uranium deposits in China [J]. Earth Science, 2022, 47(7): 3580-3602.
- [6] 焦仓文, 乔宝强, 冯延强, 等. 伽马能谱测井技术在铀资源量估算中的应用研究[J]. 铀矿地质, 2021, 37(3): 492-499.
JIAO Cangwen, QIAO Baoqiang, FENG Yanqiang, et al. Application of spectral gamma-ray well logging in uranium resource exploration[J]. Uranium Geology, 2021, 37(3): 492-499.

- [7] 陈放,胡志伟,毛广振,等.地球物理测井在准噶尔盆地车排子地区铀矿勘查中的应用[J/OL].铀矿冶,1-10[2025-07-18].<https://doi.org/10.13426/j.cnki.yky.2025.04.12>.
CHEN Fang, HU Zhiwei, MAO Guangzhen, et al. Application of geophysical logging for uranium exploration in Chepaizi area, Junggar Basin[J/OL]. Uranium Mining and Metallurgy, 1-10 [2025-07-18].<https://doi.org/10.13426/j.cnki.yky.2025.04.12>.
- [8] ZHANG Yan, LIU Chi, LIU Shiliang, et al. Prompt fission neutron uranium logging (II): Dead-time effect of the neutron time spectrum[J/OL]. Nuclear Science and Techniques, 2025, 36: 19. <https://doi.org/10.1007/s41365-024-01615-x>.
- [9] 邹玉涵,李沁慈,阙为民,等.基于不同机器学习算法的地浸测井数据岩性识别对比[J].铀矿冶,2025,44(2):9-17.
ZOU Yuhuan, LI Qinci, QUE Weimin, et al. Lithology identification comparison on geophysical logging data of in-situ leaching uranium based on multiple machine learning algorithms [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2025, 44(2):9-17.
- [10] PENNEY R, AMES C, QUINN D, et al. Determining uranium concentration in boreholes using wireline logging techniques: Comparison of gamma logging with prompt fission neutron technology (PFN) [J]. Applied Earth Science, 2012, 121(2): 89-95.
- [11] MCKAY A D, STOKER P, BAMPTON K F, et al. Resource estimates for in situ leach uranium projects and reporting under the JORC code[R]. AusIMM Bulletin, 2007(6): 58-67.
- [12] 张焱,张浩然,刘翹,等.基于伴随 α 中子管的铀裂变瞬发中子符合测井方法模拟研究[J].铀矿冶,2025,44(2):1-8.
ZHANG Yan, ZHANG Haoran, LIU Chi, et al. Simulation study on uranium fission prompt neutron coincidence logging method based on associated particle sealed-tube neutron generator[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2025, 44(2):1-8.
- [13] 王殿学,余水泉,黄笑.我国 γ 测井技术发展的回顾与展望[J].铀矿地质,2023,39(1):124-132.
WANG Dianxue, YU Shuiquan, HUANG Xiao. Review and prospect of gamma logging technology in China[J]. Uranium Geology, 2023, 39(1):124-132.
- [14] 姚益轩,王亚安,胥国龙,等.地浸采铀钻孔过滤器建造与过滤机理研究[J].铀矿冶,2023,42(3):17-23.
YAO Yixuan, WANG Ya'an, XU Guolong, et al. Study on construction and filtration mechanism of borehole filter for in-situ leaching uranium[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2023, 42(3):17-23.
- [15] 宋子升.鄂尔多斯盆地杭锦旗砂岩型铀矿成矿年代学及其地质意义[D].西安:西北大学,2013.
- [16] 黄建国.砂岩型铀矿铀镭及镭氢平衡系数研究[D].南昌:东华理工大学,2017.
- [17] GROZEVA N G, RADWAN J, BEAUCAIRE C, et al. Reactive transport modeling of U and Ra mobility in roll-front uranium deposits: Parameters influencing $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$ disequilibria[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2022, 236: 106961.
- [18] MIN Maozhong, PENG Xinjian, WANG Jinping, et al. Uranium-series disequilibria as a means to study recent migration of uranium in a sandstone-hosted uranium deposit, NW China[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2005: 115-125.
- [19] 李继安,周伟.十红滩铀矿床北带铀镭平衡系数计算及特征研究[J].铀矿地质,2013,29(5):296-300.
LI Ji'an, ZHOU Wei. Research on the calculation of uranium and radium equilibrium coefficient and its characteristics in the north belt of Shihongtan uranium deposit[J]. Uranium Geology, 2013, 29(5):296-300.
- [20] 孙潇.新疆顶山矿点铀镭平衡系数特征研究[J].世界核地质科学,2015,32(1):35-38.
SUN Xiao. Study on characteristics of uranium-radium equilibrium in Dingshan ore occurrence, Xinjiang[J]. World Nuclear Geoscience, 2015, 32(1):35-38.
- [21] 夏毓亮,修群业,韩军,等.地浸砂岩型铀矿床铀-镭平衡系数研究及其地质意义[J].铀矿地质,2013,29(2):93-98.
XIA Yuliang, XIU Qunye, HAN Jun, et al. Study on U-Ra equilibrium coefficient of in-situ leaching sandstone-type uranium deposits: A case study of Qianjiadian uranium deposit[J]. Uranium Geology, 2013, 29(2):93-98.
- [22] 中国核工业地质局.地浸砂岩型铀矿资源/储量估算指南:EJ/T 1214—2016[S].北京:国家国防科技工业局,2017:15.
- [23] 中国核工业地质局.铀镭平衡系数测定规程:EJ/T

1094—2018[S]. 北京: 国家国防科技工业局,

2018:9.

Impact of Ra-rich Section on Gamma Logging Interpretation and Uranium-Radium Equilibrium Correction Results

YAO Yixuan, WU Tongpan, DU Zhiming, ZOU Yuhan, XU Guolong, LI Xinghao

(Beijing Research Institute of Chemical Engineering and Metallurgy, CNNC, Beijing 101149, China)

Abstract: Gamma logging is the fundamental method for quantitatively determining uranium content of mineralized intervals in boreholes. The U-Ra equilibrium in a certain sandstone-hosted uranium deposit has been severely disrupted. To investigate the impact of Ra-rich sections (mineralized intervals where the equivalent uranium grade derived from radium is $\geq 0.010\%$ but the uranium grade is $< 0.010\%$) on log interpretation and U-Ra equilibrium correction results, the uranium and radium content analysis results of permeable ore samples were systematically studied. The results show that: for samples with a uranium grade $\geq 0.010\%$, the weighted average uranium grade is 0.0427% , the weighted average U-Ra equilibrium coefficient is 0.615 , and the coefficient of variation is 1.041 ; for samples with an equivalent uranium grade derived from radium $\geq 0.010\%$, the weighted average uranium grade is 0.0295% , the weighted average U-Ra equilibrium coefficient is 0.890 , and the coefficient of variation is 3.785 . Ra-rich sections will significantly increase the deposit's U-Ra equilibrium coefficient, increase the orebody thickness, and decrease the deposit's uranium grade. Gamma logging cannot identify and remove Ra-rich sections. Consequently, neither the log interpretation results nor the U-Ra equilibrium correction results objectively reflect the orebody's spatial position, grade and thickness. The estimated resource quantity is also inaccurate.

Key words: sandstone-type uranium deposit; in-situ leaching; gamma logging; Ra-rich section; uranium-radium equilibrium; statistics