

CNIC-01688
BRIUG-0061

铀尾矿氡析出率监测新方法试验研究
**EXPERIMENTAL STUDY ON NEW MONITORING
METHOD OF RADON RELEASE RATE FROM
URANIUM TAILINGS**
(In Chinese)

中 国 核 情 报 中 心
China Nuclear Information Centre

CNIC-01688
BRIUG-0061

铀尾矿氡析出率监测新方法试验研究

付 锦 韩耀照 张 彪 蔡振民 何文星
(核工业北京地质研究院, 100029)

摘 要

介绍了一种铀尾矿表面氡析出率测量新方法——活性炭吸附法和 γ 能谱法。同时介绍了活性炭吸附法采样器和仪器的研制及性能、特点, 采样器和仪器的刻度, 条件试验以及与局部静态法的对比测量。通过用该方法对铀尾矿库现场连续一年的监测, 观测了铀尾矿库年氡析出率的变化规律, 总结出年平均氡析出率的最佳测量季节和测量条件。给出了 γ 能谱法参数测量、计算方法及试验的结果。

关键词: 活性炭吸附法 γ 能谱 铀尾矿库 氡析出率 采样器 仪器

Experimental Study on New Monitoring Method of Radon Release Rate from Uranium Tailings

(In Chinese)

FU Jin HAN Yaozhao ZHANG Biao CAI Zhenmin HE Wenxing
(Beijing Research Institute of Uranium Geology, 100029)

ABSTRACT

Two new monitoring methods of radon release rate from uranium tailings are introduced. They are the active carbon absorption and γ energy spectrum method. The instrument and sampler of active carbon absorption is presented with the manufacture, function, performance and calibration, the conditional test of the method and its measuring contrast to that of local static method. One-year continuous in-site monitoring of radon release rate of uranium tailings was done. The annual change regularity of radon release rate from uranium tailings was observed. The optimum season and condition of monitoring the annual average radon release rate are summarized. The parameter monitoring, calculating method and experimentation of γ energy spectrum method is discussed.

Key words: Active carbon absorption, γ energy spectrum, Uranium tailings, Radon release rate, Instruments, Sampler

1 活性炭吸附法

活性炭吸附法是利用活性炭的强吸附性能采集氡气，然后测量氡及子体的辐射来确定氡的析出率。为了满足我国尾矿氡析出率监测的实际需求，主要从以下几方面建立方法。

1.1 采样器的设计

活性炭吸附法的关键之一是采样器的设计，它直接关系到方法的性能和抗干扰性，为此，我们在调研的基础上，首先用地质找矿用的采样器和仪器进行了试验。这种采样器口径 4 cm，深度 6 cm，相对于偏小的采样器口径，炭床较深，不利于氡的扩散吸附，15 g 的活性炭量也显著偏少，采样器易于饱和，不利于提高测量的稳定性。

另外，采样器设计时，也考虑到与仪器的匹配，因为本项目的另一种方法同样应用于尾矿，如果两种方法能采用同一台仪器，可大大节省生产单位购置仪器的费用，使用起来也方便，所以，确定了活性炭吸附法采用测量氡及子体的 γ 射线，这样也省去了作 α 测量需对吸附了氡的活性炭进行转移处理的麻烦，大大简化了测量。因此，选取性能优良的四道 γ 能谱仪进行改造，探测器和采样器的直径与之相匹配。

采样器采用铝质结构，轻便、抗腐蚀。采样器大小恰好与新测量仪器探头的尺寸匹配。新采样器分为上下两部分，有螺纹可以衔接。上部分为活性炭室。炭床表面放置一金属网，用以固定活性炭，网眼尺寸与活性炭粒度相匹配，装填活性炭时金属网可取下。下部为储气室，呈管状，与上部内径相同。由于钍的半衰期很短，选择的储气室高度足以使钍射气衰减掉。在上下两部分之间放置一烧结金属过滤器，烧结金属过滤器可取下，测量时过滤器由采样器内侧车床车出的 1.5 mm 的沿托住，起到过滤湿气的作用，防止活性炭吸潮后吸附效率降低，图 1 为该采样器示意图。

表 1 采样器一致性

探测器号	单位氡析出率净计数 $s^{-1}/Bq/(m^2 \cdot s)$	相对百分 误差/%	探测器号	单位氡析出率净计数 $s^{-1}/Bq/(m^2 \cdot s)$	相对百分 误差/%
1	3.38	0	1	3.56	6
2	3.14	-7	2	3.37	0
3	3.99	18	3	3.43	2
4	3.24	-4	4	2.79	-17
5	3.45	-2	5	3.48	3
6	3.47	3	6	3.27	-3
7	3.30	-2	7	3.16	-6
8	3.47	3	8	3.22	-4
9	3.36	0	9	3.18	-6
10	3.66	7	10	3.57	6
均值	3.37				

表 1 是采样器一致性试验结果。除两个相对百分误差在 -17% 和 18% 外，其余均在 7% 以内，具有良好的一致性。

1.2 烧结金属过滤器

烧结金属过滤器是一种多孔型扩散控制器，最初是由 A. C. George 等人在氡采样器上采用的。它的原理是采用适当的微孔孔径，让气体分子有效透过，而将水气阻隔。它的作用是在湿度较大时，防止过多的水气进入采样器而被活性炭吸收，有效地控制湿度对活性炭吸附效率的降低。带烧结金属过滤器的采样器的灵敏度较不带烧结金属过滤器的采样器为低，这是由于该烧结金属过滤器使氡的扩散速度降低的缘故，但在铀尾矿高浓度氡测量条件下，带烧结金属过滤器的采样器灵敏度已足够，而湿度的影响倒是一个相对突出的问题。

1.3 活性炭的装填量

活性炭的装填量多少直接关系到方法的性能，采样器在已知析出率的标准氡析出率装置上进行了活性炭装填量的试验，采用 20 g、100 g 和 125 g 三种装填量，在条件一致情况下累积三天，以判断活性炭装填量对计数率的影响。表 2 为试验结果。活性炭装填量过少，计数率明显偏低，但 100 g 与 125 g 装填量的计数率差别不大，125 g 时计数率已不增加，并且还有减少，这是由于活性炭装填过满，亦不利于氡的扩散，所以最终选用 100 g 装填量，这时探测室内留有少量空间，以利于氡的扩散。

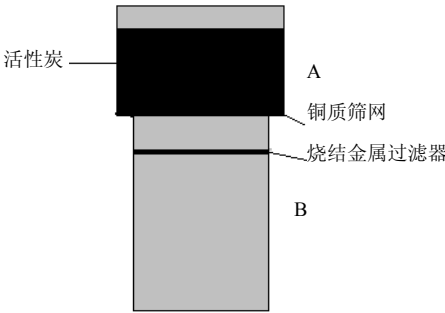
通过在核工业矿冶放射性计量站标准氡析出率装置上的试验，这个装填量可保持饱和累积时间 10 天以上。

表 2 活性炭装填量的多少对氡的计数率的影响

活性炭装填量/g	单位氡析出率净计数/s ⁻¹
20	2.50
100	6.65
125	6.13

1.4 探测仪器

确定了活性炭吸附法采用测量氡及子体的 γ 射线，所以，新测量仪器是在核工业地质研究院自行设计研制的 H—90A 四道 γ 能谱仪基础上改制而成的，方法是把 H—90A 四道 γ 能谱仪的总计数率测量道改为氡测量道，调整总道能量阈。所以，该仪器保持了 H—90A 四道 γ 能谱仪的优良性能，同时还可兼测镭、钍、钾的当量含量。因此，仪器将环境辐射测量和铀尾矿氡析出率测量合二为一，实现了一机多个用途。仪器稳定，性能优良。同时，节省了全部重新开发仪器的费用和周期。另外，也满足了本项目另一任务—— γ 能谱法的要求。在铀尾矿评价和治理中，既可测量氡析出率，也可测量镭比活度（进而



A: 活性炭室; B: 储气室

图 1 活性炭采样器示意图

计算氡析出率)，这样两种氡析出率的方法可由一机测量。该仪器还可作为能谱仪使用，测量环境放射性辐射参数，测量简便，降低了购买多台仪器的成本。

1.5 仪器性能指标监测

仪器在刻度前，对其长、短期稳定性和统计涨落进行了检验，检验结果各项指标均优于规范标准。

1.6 仪器最小可检出限

仪器最小检出限（LLD）是衡量仪器和方法的重要指标，本项目的设计目标是最低检出限要小于尾矿治理最低限值，本次测量平均本底计数为 11/s，测量的采样时间为 300 s，在置信度水平为 95% 时，检测 30 次，则最小可探测的氡析出率为：

$$LLD=3 \times 0.119 \times \sqrt{11/300} = 0.068 \text{ Bq/(m}^2 \cdot \text{s)}$$

式中 0.119 为累积三天的换算系数，(单位为：(Bq/m²·s)/s)，最小检测的氡析出率值为 0.068 Bq/(m²·s)。完全达到设计要求。如果延长测量时间，最小检出限还可降低。

1.7 仪器刻度与条件实验

该方法为相对测量，需对仪器进行刻度，同时，还进行了多项条件试验，以选择最佳的测量参数和条件。

1.8 对比测量

最后与局部静态法进行了对比测量，为了减少湿度的干扰，选择了合适的测量天气，对比结果表明，两种方法的相对误差均在 11% 以内（见表 3）。

表 3 活性炭吸附法与局部静态法测量氡析出率对比

点号	净计数/s ⁻¹	活性炭法氡析出率 F_h Bq/(m ² ·s)	局部静态法氡析出率 F_j Bq/(m ² ·s)	两者相对误差 ($F_j - F_h$)/ $F_h \times 100\%$
1	14.67	1.75	1.96	-11
2	13.73	1.63	1.73	-6
3	19.93	2.37	2.67	-11
4	22.57	2.69	2.59	4
5	22.40	2.66	2.54	5
6	13.10	1.56	1.52	3
7	19.15	2.28	2.40	-5
8	15.05	1.79	2.00	-11
均值		2.09	2.18	-4

1.9 活性炭吸附法的特点和效果

退役铀尾矿库覆盖治理前一个重要参数是年平均氡析出率的测定，它直接关系到铀尾矿退役治理的工作量和治理成本以及治理效果。为了进一步了解活性炭吸附法的性能和效果，用活性炭吸附法在铀尾矿库上固定点连续监测了一年的氡析出率。年氡析出率的测量

从 1998 年 11 月开始至 1999 年 10 月结束，连续监测 12 个月。测量点设在由铀尾矿堆成的初级坝上平坦的位置。采样器累积吸附时间为 3 天和 4 天，这样一星期恰好测量两次。

图 2 是年氡析出率监测点全年氡析出率月平均氡析出率变化曲线，图 3 是年氡析出率监测点季平均氡析出率变化曲线；因为单次测量有时会有起伏，不容易发现规律，所以主要以月平均氡析出率的变化来分析全年氡析出率的变化规律。

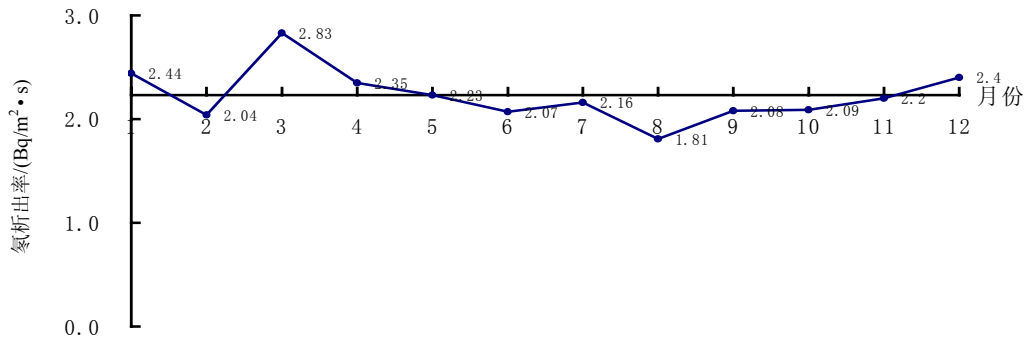


图 2 年氡析出率监测点月氡析出率变化曲线

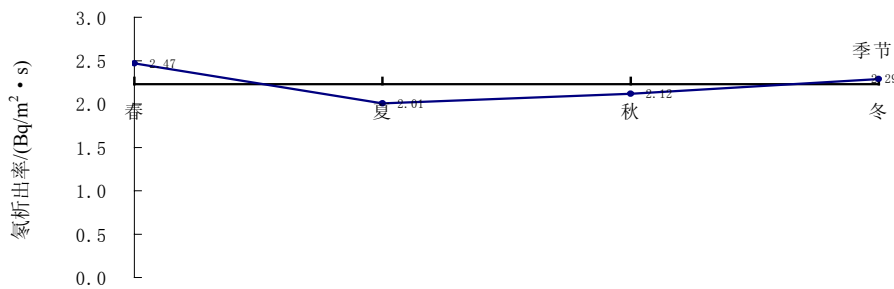


图 3 年氡析出率监测点四季氡析出率变化图

- (1) 该点年平均氡析出率为 $2.23 \text{ Bq/m}^2 \cdot \text{s}$ 。
- (2) 月平均氡析出率变化平稳。除 3 月份氡析出率高于年平均值 27%、8 月份值低于年平均值 19% 外，其它的月份变化不大，均在年平均氡析出率 9% 以内波动。5 月份数值正好出现年平均值，4 月份、6 月份、7 月份、9~11 月份的值都与年析出率平均值接近，说明月析出率变化相当平稳，充分显示了方法的稳定性。也为年析出率平均值测量月份的选择带来方便。
- (3) 年平均氡析出率值与气温的关系不大。全年月平均气温在 $7.5 \sim 27 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间变化，年平均气温为 $18.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。从图 4 可以看出，月平均氡析出率低于年平均氡析出率的月份大都出现在温度较高的月份，月平均氡析出率最高的 3 月份，温度也较低，有温度低，氡的析出率高，温度高，氡析出率低的特点，这与以往瞬时测量法测得的规律一致。但这种规律对于活性炭吸附法并不明显，平均气温最低和平均气温最高的月份测得的月平均氡析出率都极接近年析出率值，看似是氡析出率与温度的关系，实际上是由于在温度高的季节，

雨水较多造成氡析出率相对较低的缘故。因为活性炭吸附法受降雨影响较小，所以，这种规律并不显著。

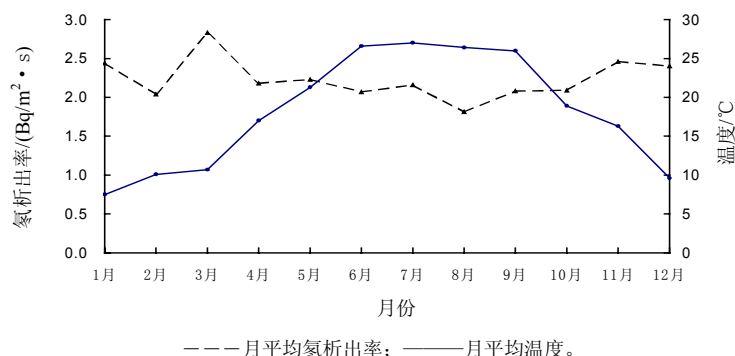


图4 年氡析出率监测点月平均温度与氡析出率变化曲线

(4) 抗降雨干扰能力强。全年 365 天中共有雨天 101 天，雨水比较集中的是春、夏两季，从测量数据看，并没有发现雨水对年氡析出率监测点测量数据有较大影响，只要测量地点没有积水，降雨又不是连续进行的，降雨对活性炭吸附法测量氡析出率的影响就不大，因为如果采样器是在雨前放上，那么，下雨尤其是大雨会使采样器外的尾砂表面的微孔堵塞，其结果使采样器内的氡气浓度略有升高。例如，全年监测的 101 个数据中，在监测期间下过雨的测量数据共有 57 个，其平均值为 $2.25 \text{ Bq/m}^2 \cdot \text{s}$ ，在监测期间没有下过雨的测量数据共有 44 个，其平均值为 $2.22 \text{ Bq/m}^2 \cdot \text{s}$ ，前者比后者略高，但也仅相差 2%，在误差允许变化范围。如果是在雨中或雨后马上放采样器，由于尾砂表面的微孔被堵，测量值会有所降低，但总的来看，除 8 月份以外，这种下雨造成的效应并不明显，8 月份测量值偏低，主要是由于雨水集中，一个月中有 15 天下雨，如果除去连续降雨造成的几个测量值特别偏低的点，8 月份的月平均氡析出率值为 2.23，与年平均值相当。因此，总的说来，活性炭吸附法测量氡析出率抗气候影响干扰的能力是很强的。

(5) 年氡析出率均值的测量时间可选范围大。从图 2 可以看出，最接近年氡析出率均值的测量月份是 4~7 月份和 9 至来年 2 月。可选的范围很大。

(6) 季氡析出率均值变化平稳。从图 3 季氡析出率变化曲线可以看出，变化最大的夏季测量值比年均析出率低 11%，春季高 9%，秋季低 6%，冬季高 1%，氡析出率季变化是很平稳的。

1.10 结论

(1) 活性炭吸附法测氡析出率采样器轻便、抗腐蚀，采样器一致性性能优良。

(2) 仪器由单片机控制，适应当今仪器设计的潮流，操作简单方便，可实现自动存储、自动计算。探测晶体较大，探测灵敏度高，对于累积三天，测量时间 300 s，置信度 95% 时，测量 30 次，最小检测的氡析出率值可达 $0.068 \text{ Bq/(m}^2 \cdot \text{s)}$ 。

(3) 仪器一机多用，可测量氡析出率、氡浓度和铀（或镭）、钍、钾当量含量；在铀尾矿环境监测和氡析出率测量方面用途广泛；还可用于核环境监测、地质找矿等其它领域。

(4) 在年平均氡析出率观测中, 该方法测得的月平均氡析出率变化稳定, 因此, 年平均氡析出率测量时间可选范围大, 抗温、湿度变化能力很强。

(5) 活性炭吸附法测量氡析出率作为一种新的铀尾矿氡析出率探测方法, 表现出测量简便、稳定、成本低、抗干扰能力强的优点, 不失为一种好的铀尾矿氡析出率监测方法, 完全可以与其它方法一道用于铀尾矿评价、治理中, 使各种监测方法扬长避短, 发挥出各种方法本身的优势。

2 γ 能谱法计算氡析出率方法

2.1 方法原理

在铀衰变系列中, 镭是铀 ($^{238}_{92}\text{U}$) 的衰变子体。镭的直接衰变子体氡 (^{222}Rn) 是放射性惰性气体, 半衰期为 3.825 天, 由于半衰期较长, 因此, 可迁移扩散较远的距离, 在自然界大气中广泛分布。

野外条件是一个敞开系统, 由于氡是气体, 它可以到处扩散迁移, 因此, 氡的浓度受迁移介质的性质、孔隙度以及气象因素等条件的影响, 很难找到镭比活度与其所产生的氡量之间简单的对应关系, 所以使实测的氡析出率与 γ 能谱法计算的氡析出率之间存在一定误差。由于在 γ 能谱法计算氡析出率的公式中包含了射气系数、扩散系数, 铀尾矿干容重等能反映和影响氡迁移性质的物理量, 因此, 这些系数的确定, 对于 γ 能谱法计算氡析出率的准确性至关重要, 也是这项工作成败的关键。

任何事物都有两面性, 虽然氡的化学性质给 γ 能谱法计算氡析出率带来一定困难, 但另一方面, 这种方法也能克服实测氡析出率受影响因素众多, 测量较难把握, 测量值不稳定的缺点, 因此, 计算所得的氡析出率在一定程度讲, 测量值相对变化较小, 这种方法在铀尾矿覆盖治理中可能发挥出它的测量简单, 测量值稳定的优势。

在湿砂超过 2 m 和干砂超过 4 m 时可不考虑铀尾矿砂厚度的影响, 则铀尾矿的氡析出率由下式给出:

$$F=R\rho E\sqrt{\lambda D}$$

式中: F ——铀尾矿库中的氡析出率, $\text{Bq/m}^2\cdot\text{s}$;

R ——铀尾矿砂中镭的比活度, Bq/kg ;

ρ ——铀尾矿砂的干容重, kg/m^3 ;

E ——射气系数;

D ——扩散系数, m^2/s ;

λ ——氡的衰变常数, $2.10\times 10^{-6}/\text{s}$ 。

2.2 γ 能谱法计算氡析出率的可能性分析

目前在铀尾矿上测量氡析出率的方法主要是采用现场的瞬时测量方法, 而 γ 能谱法计算氡析出率的方法仅有人曾经做过试验, 并未达到实用性进展。在覆盖黄土时, 若现场测氡, 或者时间很慢, 或者测量的重现性很差, 不能现场指导施工。如果能用 γ 能谱法直接在现场测出镭比活度, 用镭比活度、以及该地段事先测得的射气系数 E , 扩散系数 D 和干容重 ρ 计算出铀尾矿上的氡析出率, 再根据铀尾矿的条件, 氡析出率高低以及覆盖

黄土的性质，可以在现场及时计算出覆土的厚度，指导现场施工。该方法比局部静态法指导现场覆盖黄土的厚度具有操作方便、快速施工的优点。下面从三个方面来分析 γ 能谱法计算氡析出率的可能性。

(1) 现场测氡析出率与 γ 能谱法计算氡析出率之间是有一定误差的。产生误差的原因，除镭比活度测量的误差之外，还与介质中放射性核素含量的不均匀性有关。因此，精确的测定镭比活度和了解其不均匀性是至关重要的，亦是有可能做到的。不均匀性的控制可通过沿水平方向用四道 γ 能谱仪快速测定镭比活度，沿深度方向（2.5 m 左右）通过取样在室内分析确定镭比活度来实现。为了精确确定镭比活度，从统计的观点，可获取大量的实测数据，取其总平均值或分地段取平均值。这样得到的镭比活度用于计算氡析出率，会大大减弱镭比活度分布不均匀的影响。

(2) 由氡析出率计算公式可以看出：计算时除所需的参数镭比活度之外，还有射气系数 E ，铀尾矿砂干容量 ρ (g/cm^3)，衰变常数 λ ($2.1 \times 10^{-6}/\text{s}$) 以及扩散系数 D ，式中 ρ ， E ， D 要进行较准确的确定是可以做到的。我们可以通过实验室和野外实测的办法，在较多数量的测点上，求出这些待测参数的平均值。 E 和 D 受许多因素如湿度、含水量、孔隙度等的影响，要测定不同条件的射气系数和扩散系数，测量的条件划分越细，测量系数越准确，计算氡析出率的误差越小。

(3) 从测量误差看，由于氡气是气体，测氡的影响因素之多，影响程度之大远远超过 γ 能谱测镭，尽管做了许多校正，测氡误差在一般气候条件下仍然在 50% 以上。测镭的误差则小得多，加上放射性不均匀的影响以及测定射气系数 E 、扩散系数 D 、干容重 ρ 的总误差估计与直接测氡的误差相当。但是 γ 能谱测量的优点是明显的：可以现场取得数据，操作简单，测量方便、快速，干扰因素易于控制。

根据以上分析，用 γ 能谱法先测出镭比活度，再利用上述参数计算氡析出率是可能的。我们已经做了进一步的验证试验。

2.3 参数测定

2.3.1 镭比活度

镭比活度采用地面 γ 能谱测量。为避免镭比活度测量不均匀影响，在地面进行米字形测量，并选了 100 个点观测其横向均匀性，深度方向也已取一定的样品观察其纵向均匀性，这些可保证测量结果的可靠性。

为了测得可靠数据，我们注意了下列测量环节：

(1) 野外测量期间，采用室内定点测底数（保证条件一致）的方法，每天检查仪器工作是否正常。

(2) 测量时，要把探头放在平坦地面上，保证测量 2π 立体角条件的一致。

(3) 湿度的影响：如果土壤水分较湿，可以吸收 γ 射线，一般强度降低 10% 左右。野外测量期间，正值雨季，土壤潮湿，使当量含量偏低。在非雨季节，地面砂含水量少，做了 5% 的修正。

(4) 大气中 ^{214}Bi 的影响：空气中氡逸散至大气中，其子体 ^{214}Bi 在下雨时被带到地面，可使其测量值增高， ^{214}Bi 在 4 h 后可衰变完，在测量时应在雨后 4 h 之后进行。

(5) 除对测得的当量铀、当量钍、钾、总道数据进行记录外，还要对测点处的地貌、环境和铀尾矿砂的情况进行详细记录。

2.3.2 射气系数

大多数铀尾矿砂湿度大于百分之几，这时平均射气系数的范围从 0.15~0.4。一般情况下，尾砂颗粒度越小，射气系数越小。射气系数较宽范围的变化主要是由于含水量、颗粒大小和铀的矿物学特性的影响造成的，这就决定了对于不同的条件，射气系数是不同的。所以，对于每一种被研究的物质必须要实测射气系数，射气系数采用现场取样，放射化学分析方法。实验证明，这样可大大降低氡析出率的确定误差。

2.3.3 扩散系数

气体通过孔隙物质扩散，其扩散性质是由充满孔隙的介质的物理性质决定的。干燥物质中氡的扩散系数比通过含水饱和的物质氡的扩散系数几乎大 4 个数量级。大量的研究结果也证明，孔隙中的含水量是影响扩散系数最重要的因素，另外，尾砂孔隙度、孔隙大小、结构和扩散的温度对扩散系数也有影响。

2.3.4 干容重

干容重的数据在环评中已大量测得，因此，可以从铀尾矿的有关评价报告中获得。

2.4 测量结果

2.4.1 镭比活度测量结果

为了了解区域上的横向变化，选择 100 个测点，对每个测点进行 γ 能谱测量，经统计，100 个测点镭的平均值为 5.21 Bq/g，在 $\pm 10\%$ 范围内的测量点为 76 个，占 76%。在 100 个测点中，共选了 4 个十字剖面计算平均镭比活度，第 3 行、第 12 列共 29 个点，平均镭比活度为 5.17 Bq/g，与全部测量点的平均值 5.21 Bq/g 的误差为 0.8%；第 2 行第 14 列共 20 个点，平均镭比活度为 5.13 Bq/g，与全部测量点的平均值 5.21 Bq/g 的误差为 1.4%；第 4 行第 15 列共 24 个点，平均镭比活度为 4.98 Bq/g，与全部测量点的平均值 5.21 Bq/g 的误差为 4.3%；第 1 行第 16 列共 19 个点，平均镭比活度为 5.26 Bq/g，与全部测量点的平均值 5.21 Bq/g 的误差为 0.9%。由以上四组计算可以看出，对于一块镭比活度比较均匀的面积，实际镭比活度观测时，面积上的观测，可以简化为十字剖面的观测，其十字剖面的均值基本上可以代替面积上方格网的均值。实际操作时，在 200 m \times 100 m 的范围内，镭比活度还是比较均匀的，上述方法的观测是可行的。

2.4.2 射气系数的测量结果

在实验室内分别对采自两个试验剖面的样品进行射气测量。每个样品取自然状态样品（风干后含水很少）和加水两个状态进行射气系数分析，两次测量射气系数的结果分别列于表 4 和表 5。

由表 4、表 5 可见，自然状态下粗砂的射气系数平均值略有差别，这是由于自然状态粗砂中的含水量不同所致。尾矿坝上较湿样品中的含水量为 8% 左右，而在对比地点由于地势高，含水量相对稍低，湿度为 5.6%，因此，在进行氡析出率计算时取射气系数为 0.15。

2.4.3 扩散系数的测量结果

扩散系数是在试验剖面 1 中部两个点上进行的。根据在不同深度上测定的氡浓度值计算得到。测量结果列于表 6。

由表 6 可以看出，两点计算 0.5~1.0 m 和 1.0~1.5 m 两段深度上的扩散系数相差较大，可能是 1 m 处镭核素的不均匀所致。而 0.5~1.5 m 这段深度上，两个测量点相差不大，取

其平均值 $2.94 \times 10^{-2} \text{ (cm}^2/\text{s)}$ 。在计算氡析出率时采用了后者平均数值 $2.94 \times 10^{-2} \text{ (cm}^2/\text{s)}$ 。但三个深度的平均值相差并不大。三个深度总均值为 $2.53 \times 10^{-2} \text{ (cm}^2/\text{s)}$ 。

表 4 取自剖面 1 上不同湿度条件下室内测量粗砂的射气系数

样品编号	自然状态下样品的射气系数 $\eta_1/\%$	湿样品	
		含水量/%	射气系数 $\eta_2/\%$
1	8.9	6.3	15.8
2	9.1	7.0	12.5
3	10.1	4.9	17.2
4	8.0	3.3	14.7
平均	9.1	5.4	15.1

表 5 取自剖面 2 上不同湿度条件下室内测量粗砂的射气系数

样品编号	镭比活度/Bq/g	自然状态下样品的射气系数 $\eta_1/\%$	湿样品	
			含水量/%	射气系数 $\eta_2/\%$
5	3.90	7.0	3.91	12.7
6	4.23	10.6	5.37	25.7
7	3.46	4.7	5.66	11.0
8	3.32	4.4	5.61	12.6
9	3.54	5.9	4.71	10.7
平均	3.69	6.5	5.05	14.5

表 6 扩散系数测定结果

深度/m	第一点扩散系数 $\times 10^{-2} \text{ (cm}^2/\text{s)}$	第二点扩散系数 $\times 10^{-2} \text{ (cm}^2/\text{s)}$	两点平均值 $\times 10^{-2} \text{ (cm}^2/\text{s)}$
0.5~1.0	1.50	3.28	2.39
1.0~1.5	3.61	0.93	2.27
0.5~1.5	2.70	3.18	2.94

2.5 氡析出率对比试验结果

共做了三条实验对比剖面。

表 7 列出了在剖面 1 上用地面 γ 能谱法和取样化学分析镭比活度及其计算的氡析出率值及用局部静态法和活性炭吸附法实测的氡析出率值。共做了 8 个测量点。这里所谓单点测量值是指各测量点在地表取样点的分析值。两点平均值是地表取样点及地下 0.5 m 处取样点的平均值。加权平均值是对从地表往下每 0.5 m 间隔取一个样，取到 2.0 m 共 5 个深度上的加权平均值，权的大小是根据不同深度上的镭比活度和射气系数对于氡析出率的贡献来衡量的，由于镭分布的不均匀性和射气系数的差异，其数值是经验取值。这里所取的相对权值分别为：地表为 1.00；0.5 m 深处为 0.60；1.0 m 处为 0.35；1.5 m 处为 0.20；2.0 m 处为 0.08。

由表 7 可以看出, γ 能谱法计算氡析出率采用了两种测定值。一是野外现场用地面 γ 能谱测量仪测镭比活度, 即 γ 能谱法, 并做了 5% 的湿度修正; 二是室内分析镭比活度, 这里采用了地表和 0.5 m 深处两样品的平均值和从地表至地下 2.0 m 深处的 5 个点的加权平均值。扩散系数取为 2.94×10^{-2} ($1/\text{m}^2 \cdot \text{s}$, 由表 3~6)。由上述参数计算的氡析出率与局部静态法和活性炭吸附法测得的氡析出率列于表 7 中。由于测氡的偶然误差较大, 不宜用单点值进行对比, 按剖面上 8 个测点的平均值进行对比是较合适的。由 γ 能谱法计算出的氡析出率平均值为 $2.28 \text{ Bq/m}^2 \cdot \text{s}$, 列于表 7 F_1 栏中, 由表 7 中室内分析镭比活度 R_2 和 R_3 计算出的氡析出率分别列于表 7 的 F_2 和 F_3 栏中, 其中 8 个点的平均值分别为 2.28 和 $2.29 \text{ Bq/m}^2 \cdot \text{s}$ 。上述 F_1 , F_2 和 F_3 栏中的平均值较局部静态法在对应点测得的氡析出率的平均值 $2.10 \text{ Bq/m}^2 \cdot \text{s}$ 偏高 9%, 比活性炭吸附法测得的氡析出率值 $2.09 \text{ Bq/m}^2 \cdot \text{s}$ 也偏高 9%。

表 7 试验剖面 1 室内测试和现场测量数据

测点 编号	计算的氡析出率($\text{Bq/m}^2 \cdot \text{s}$)			F_j	F_h
	F_1	F_2	F_3		
1	2.19	2.61	2.48	1.96	1.75
2	2.02	1.91	1.86	1.73	1.63
3	2.24	2.35	2.42	2.67	2.37
4	3.50	3.83	3.85	2.59	2.69
5	2.32	2.12	2.1	2.54	2.66
6	2.03	2.03	2.1	1.52	1.56
7	2.10	1.85	1.95	2.40	2.28
8	1.98	1.72	1.75	2.00	1.79
均值	2.28	2.28	2.29	2.10	2.09

F_1 : 由 γ 能谱法计算的氡析出率 (修正射气系数 0.15);

F_2 : 由室内分析地面和 0.5 m 两样品平均镭比活度与修正射气系数 0.15 计算的氡析出率;

F_3 : 由室内分析 5 个深度样品加权平均镭比活度与修正射气系数 0.15 计算的氡析出率;

F_j : 局部静态法测氡析出率, $\text{Bq/m}^2 \cdot \text{s}$;

F_h : 活性炭吸附法测氡析出率, $\text{Bq/m}^2 \cdot \text{s}$ 。

在年氡析出率监测点周围 16 个测点上用 γ 能谱法计算出的氡析出率(其它参数同上)见表 8。16 个点的平均值为 $1.96 \text{ Bq/m}^2 \cdot \text{s}$, 比局部静态法测得的 16 个点的平均值 $2.09 \text{ Bq/m}^2 \cdot \text{s}$ 偏低 6%。

剖面 2 进行了活性炭吸附法、局部静态法和 γ 能谱法的对比测量, 结果列于表 9。

表 8 在年氡析出率监测点周围由镭比活度计算和测量氡析出率的对比表

测点 位置	由镭比活度计算 氡析出率/(Bq/m ² ·s)	局部静态法测 氡析出率/(Bq/m ² ·s)	测点 位置	由镭比活度计算 氡析出率/(Bq/m ² ·s)	局部静态法测 氡析出率/(Bq/m ² ·s)
1—1	1.82	1.56	2—2	1.93	2.96
1—2	1.89	1.55	2—3	2.08	2.92
1—3	2.18	2.32	2—4	2.02	2.83
1—4	2.13	2.20	2—5	1.93	2.84
1—5	2.05	1.83	2—6	1.84	1.30
1—6	1.93	1.85	2—7	1.84	2.40
1—7	2.21	2.00	2—8	1.71	1.61
1—8	2.04	1.76	平均值	1.96	2.09
2—1	1.82	1.54			

由表 9 三种方法的对比曲线可以看出， γ 能谱法计算的氡析出率曲线变化平稳，而活性炭和局部静态法测得的氡析出率曲线相对来说变化较大。就剖面上的点的平均值来看，局部静态法测值较低，为 1.47， γ 能谱法和活性炭吸附法均值接近，分别为 1.97 和 2.09，两者仅相差 6%，三种方法相差不大。由镭比活度计算的氡析出率的曲线之所以平稳，主要是由于所采用的参数是比较平稳的，因此， γ 能谱法要比直接测氡所受的影响因素少得多。

表 9 剖面 2 γ 能谱法、活性炭吸附法和局部静态法测量氡析出率数值表

点号	氡析出率/(Bq/m ² ·s)		
	γ 能谱法	活性炭吸附法	局部静态法
1	2.04	1.83	0.98
2	2.02	1.25	0.91
3	2.05	2.03	0.92
4	1.98	1.26	1.03
5	1.85	1.65	1.63
6	1.85		1.98
7	1.91	2.19	1.08
8	2.01	0.63	0.67
9	2.23	2.93	1.09
10	2.28	2.86	2.29
11	1.95	2.18	1.37
12	1.71	0.85	0.87
13	1.81	3.56	2.96
14	1.82	3.90	2.77
均值	1.97	2.09	1.47

由以上试验数据可得:

(1) 地面 γ 能谱测镭比野外取样后进行室内分析所得的镭比活度的变化要小, 前者的变化曲线要平缓, 这是由于地面 γ 能谱测量代表了大体积的样品, 消除了局部不均匀的影响。 γ 能谱测量测得的镭比活度比地表样品的室内分析结果总体偏低, 但最大误差也只有 17%, 这与地表局部不均匀有关, 一般在 10% 以下。实际上, γ 能谱测量不能探测 0.5 m 深处以下铀尾矿砂中的镭比活度。

(2) 由 γ 能谱法计算氡析出率曲线变化比较平缓。局部静态法和活性炭吸附法测得的氡析出率变化较大, 反映了氡析出率变化的细节。

由上述测量分析可以看出, 对于粗细不同的尾砂选用不同的扩散系数和射气系数, 用 γ 能谱法计算得出的氡析出率与实测的氡析出率的平均值相当接近。

另外, 氡测量的随机误差和氡析出率水平方向的横向变化是相当大的, 在几米范围内最大可相差一倍左右。因此, 氡析出率值在水平方向上的分布是很不均匀的, 但其上覆盖的黄土厚度不可能随氡析出率的高低而起伏变化, 因此, 在实际治理时只能取一个氡析出率的平均值, 取一个平均覆土厚度。还有, 氡的射气系数和扩散系数也是随湿度不同而有所变化。当覆盖黄土后, 随着积水减少或地下潜水面的降低, 以及环境条件的变化, 可能使射气系数减小而扩散系数加大, 两者是一个相互消长的动态过程 (其中扩散系数仍起主导作用), 使氡析出率的变化关系比较复杂。从以上分析结果可以认为, 计算的方法在尾矿治理时随时确定覆土前氡析出率是完全可行的。

2.6 结论

根据试验结果, 认为用 γ 能谱法计算氡析出率的方法是可行的, 但要对 γ 能谱法中涉及到的参数, 进行更深入的测定和分析, 还应对不同铀尾矿库做一些试验, 以总结出规律性的认识以便推广。

γ 能谱法有一定的应用条件, 在需要比较严格的监测或需要实地监测以及需要了解氡析出率细节时, 不适宜用 γ 能谱法计算氡析出率, 比如, 年平均氡析出率的测定, 还是应该用现场实测氡析出率的方法 (如活性炭吸附法或局部静态法等), 发挥这些现场测量方法各自的优势。 γ 能谱法的优势在于测量简单、现场给出测量值, 测量值在较大范围内相对稳定, 给尾矿浮土治理时随时监测带来方便, 在需要半定量了解尾矿氡析出率时, 也可用 γ 能谱法随时监测。

参 考 文 献

- 1 李韧杰. 美国铀矿山和水冶厂退役工作. 铀矿冶, 1988, 7(1): 63~69
(LI Renjie. On decommissioning work of uranium mines and plants in the United States. Uranium Mining and Metallurgy, 1988, 7(1): 63~69)
- 2 魏素遐. 两种改进型氡采样器温、湿度影响试验. 辐射防护, 1993, 13(4)
(WEI Suxia. Performance of two kinds of improved passive radon samplers to resist influence of variations of temperature and humidity. Radiation Protection, 1993, 13(4))
- 3 Andreas C George. Passive Integrated Measurement of Indoor Radon Using Activated Carbon. Health Physics, 46(4)

- 4 Alter H W, Fleischer R L. Passive integrated radon monitor for environmental monitoring. Health Physics, 40: 405
- 5 Cohen B L, Cohen E S. Theory and practice of radon monitoring with carbon adsorption. Health Physics, 45: 501~508
- 6 Countess R J. Radon flux measurement with a charcoal canister. Health Physics, 31: 455
- 7 Kisieleski W E. Radon Release and Dispersion from an Open Pit Uranium Mine.