

文章编号:1672-6561(2014)04-0127-07

投稿网址:<http://jese.chd.edu.cn/>

射气-闪烁法测定地下热水的镭-226 和氡-222 浓度

李 婷^{1,2}, 周 训^{1,3}, 龙 汨¹, 王晓翠¹, 陈 婷¹, 李婧玮¹, 杨苗林¹

(1. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083; 2. 云南地质工程第二勘察院, 云南 昆明 650208;
3. 中国地质大学(北京)地下水循环与环境演化教育部重点实验室, 北京 100083)

摘 要:地下热水中放射性浓度较高的²²⁶Ra 和²²²Rn 对于研究地下热水的形成和循环具有重要的意义。阐明了实验室测定地下热水²²⁶Ra 和²²²Rn 放射性浓度的射气-闪烁法的仪器组成、测试原理、测试步骤、水样前处理和结果换算, 讨论了在测试过程中各仪器和试验方法所需参数的选取及确定的具体操作。结果表明:在本试验中,所用放射性测试仪器 FD-125 型氡钍分析仪的最佳阈电压为 2 V, 对应的最佳工作高压为 450 V;所采用的 3 个闪烁室的校正因子分别为 0.005 428、0.005 567 和 0.005 060;进行前处理提取水样²²⁶Ra 时, pH 值应控制在 2.5~3.0 之间, 可确保方法回收率最大。

关键词:地下热水;镭;氡;氡钍分析仪;阈电压;校正因子;回收率

中图分类号:P641.3 **文献标志码:**A

Concentrations of Ra-226 and Rn-222 in Thermal Groundwater Measured by Emanation-scintillation Method

LI Ting^{1,2}, ZHOU Xun^{1,3}, LONG Mi¹, WANG Xiao-cui¹, CHEN Ting¹,
LI Jing-wei¹, YANG Miao-lin¹

(1. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;
2. The Second Exploration Institute of Geological Engineering of Yunnan, Kunming 650208, Yunnan, China;
3. Key Laboratory of Groundwater Circulation and Environmental Evolution of Ministry of Education,
China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: High radioactive concentrations of ²²⁶Ra and ²²²Rn in thermal groundwater are of important significance in studying formation and circulation of thermal groundwater. The experimental apparatus, measurement principle and steps, pre-treatment of water samples and result calculations of the emanation-scintillation method to measure the radioactive concentrations of ²²⁶Ra and ²²²Rn in thermal groundwater in laboratory were described, and the determination of parameters used in the experimental devices and the measuring methods were discussed. The results show that the optimal threshold electric pressure for the radioactive FD-125 radon/thorium analyzer used in the experiment is 2 V, and the corresponding optimal working high electric pressure is 450 V; the collection factors for the three scintillation chambers used are 0.005 428, 0.005 567 and 0.005 060, respectively; when ²²⁶Ra is extracted from water sample in the pre-treatment, the pH values are controlled in the range of 2.5-3.0 in order to obtain the maximum method recovery rate.

收稿日期:2014-01-17

基金项目:国家自然科学基金项目(40972163);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2652014089, 2652013085)

作者简介:李 婷(1988-),女,云南梁河人,工学硕士, E-mail: fanciny@163.com。

通讯作者:周 训(1963-),男,广西兴业人,教授,博士研究生导师,工学博士, E-mail: zhouxun@cugb.edu.cn。

Key words: geothermal water; Ra; Rn; radon-thorium analyzer; threshold electric pressure; collection factor; recovery rate

0 引 言

地下热水通常有放射性浓度较高的²²⁶Ra 和²²²Rn, 它们可以用来估算地下热水的年龄^[1-2], 有助于开展地下热水形成和循环的研究^[3-4], 也有利于了解温泉的医疗保健功效^[5]和进行地下水放射性评价^[6]。地下热水中元素²²⁶Ra、²²²Rn 放射性浓度测定分析已是地下热水开发利用中不可或缺的重要环节。目前, 国内外较常见的测定方法有 γ 能谱法、射气-闪烁法、 α 放射性测量法、核乳胶法、化学方法等。其中, 射气-闪烁法是分析镭、氡的经典方法, 也是迄今为止分析镭的最可靠、运用最广泛的方法, 即利用硫酸钡镭沉淀法浓缩, 提取水样中的镭, 再采用镭射气衰变产生氡气, 将产生的氡气积累后送入闪烁室内, 通过测量氡气的放射性活度来测算水样中镭的放射性浓度。但是对于该方法的操作和运用在以往文献资料中往往只有一些简短而笼统的介绍, 实际操作性较差。笔者在实际工作中摸索和总结了射气-闪烁法的实际操作步骤, 阐述了射气-闪烁法测定地下热水中元素²²⁶Ra、²²²Rn 放射性浓度的原理和步骤, 探讨了确定仪器参数的方法, 以期提高测定地下热水中²²⁶Ra、²²²Rn 放射性浓度的效率。

1 试验仪器

射气-闪烁法用到的主要仪器设备有 FD-125 型氡钍分析仪、定标器、真空泵、扩散器、干燥管等(图 1), 它们的具体功能及详情见表 1。这些仪器设备可以分别购置, 然后在实验室进行组装。

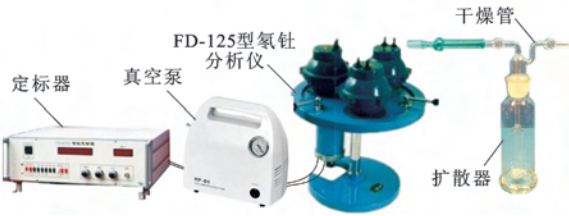


图 1 主要试验仪器
Fig. 1 Main Experimental Devices

2 测试原理

因为²²⁶Ra(半衰期为 1 620 年)衰变产生²²²Rn(半衰期为 3. 825 d), 所以可以通过测量水中²²²Rn 放射性活度来确定²²⁶Ra 放射性活度。因为²²²Rn 的

表 1 试验仪器设备
Tab. 1 Experimental Devices

仪器设备	型号	主要功能	生产厂商
定标器	FH463B	用于 α 、 β 、 γ 、 χ 射线等放射性测量和能谱分析	中核(北京)核仪器厂
真空泵	HP-01	用于试验仪器抽真空、真空浓缩、真空过滤等	天津恒奥科技发展有限公司
氡钍分析仪	FD-125	测定水样品及坑道中微量氡气放射性浓度	中核(北京)核仪器厂
扩散器	250 mL 洗气瓶	用于水样品中氡气的积累, 型号大小可任意选取	
干燥管	CaCl ₂ 干燥管	吸附积累的氡气中的水蒸汽	
	活性炭管	吸附空气中的氡气和水蒸汽	

半衰期比²²⁶Ra 短, 所以当经过 N 个²²²Rn 的衰变周期以后, 可以认为在一定时间之后水中²²²Rn 的放射性活度近似等于²²⁶Ra 的放射性活度。²²⁶Ra 及其子体核素²²²Rn 放射性活度达到平衡的时间可以通过²²²Rn 的半衰期计算得到^[7]。²²²Rn 的放射性活度可用射气-闪烁法测定, 从而估算²²⁶Ra 的放射性活度。

利用镭与钡能形成硫酸钡镭同晶共沉淀的性质, 以硫酸钡为载体, 共沉淀水样中的镭, 使其得以富集; 再以碱性 EDTA 溶解沉淀, 封闭于扩散器中积累²²²Rn, 使其衰变达到平衡后, 将积累的²²²Rn 转入闪烁室内; 闪烁室内壁涂有硫化锌荧光体(图 2), ²²²Rn 在蜕变过程中产生的 α 粒子冲击到硫化锌晶体上, α 粒子的能量转移给硫化锌晶体, 引起硫化锌原子激发而闪光放出光子, 光子被光电倍增管接收, 在其光电阴极上产生光电子, 在光电倍增管的倍增作用下电子被加速放大成电子流, 形成脉冲电流后输出, 在定标器上显示数据。

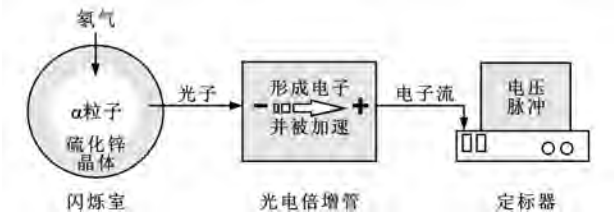


图 2 试验测量原理
Fig. 2 Measurement Principle of the Experiment

测试²²⁶Ra 和²²²Rn 的地下热水水样可以直接在温泉泉口或地热井井口采集。用热水将水样瓶洗涤 3 次后, 把水样瓶灌满热水, 拧紧瓶盖密封瓶口。一般需采集 2. 5 L 水样。

3 试验步骤

3.1 ^{226}Ra 放射性测量

取2 L澄清水样于烧杯中,加热至沸腾;加入1~2 mL氯化钡溶液,在不断搅拌下,滴入大约5 mL硫酸溶液;加热至沸腾1~2 min后,取下静置5 h以上;吸去上层清液,沿烧杯壁加入30 mL左右碱性EDTA溶液(实际用量依样品而定),再加热溶解沉淀,使之成为透明液体;蒸发至30~50 mL(依扩散器容量大小而定),移入扩散器;用少量水洗涤烧杯,洗涤液并入扩散器内;控制溶液体积约为扩散器的1/3,用真空泵将扩散器内的空气抽干后封闭3~20 d积累氡气^[8];氡气积累完成后,将扩散器连接到FD-125型氡钍分析仪上的闪烁室(图3)。

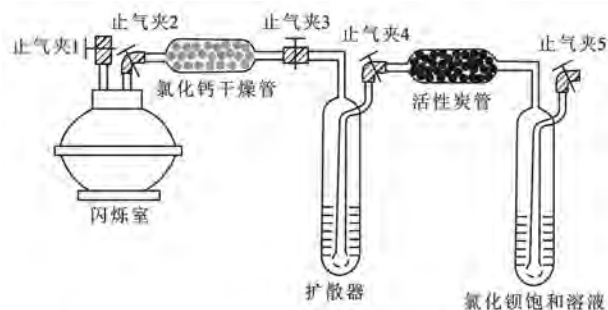


图3 进气系统

Fig. 3 Air-in System

进气系统操作步骤:打开止气夹1、2,用真空泵将闪烁室和氯化钙干燥管抽成真空;关闭止气夹1,打开止气夹3、4,向闪烁室通气,使扩散器里的氡气及其子体进入闪烁室;缓缓打开止气夹5,进气速度控制在每分钟100个气泡;持续进气10 min后,加快进气速度直到扩散器不再冒泡;进气完毕后,关闭止气夹2,记录进气时间(氡气的积累时间为封闭时起至进气结束时的时间间隔);静置2 h后,开始计数,每次计数时间为5~10 min,连续计数5次,取其平均值。

^{226}Ra 放射性浓度计算公式为

$$C_{\text{Ra}} = \frac{1}{V} \left[\frac{k(N_s - N_0)}{R(1 - e^{-\lambda t})} - C_b \right] \quad (1)$$

式中: C_{Ra} 为样品中 ^{226}Ra 放射性浓度; k 为闪烁室的校正因子; N_s 为样品加本底的计数率; N_0 为闪烁室的本底计数率; C_b 为试剂空白的 ^{226}Ra 放射性浓度; R 为方法回收率; $1 - e^{-\lambda t}$ 为氡的衰变函数; V 为水样体积; λ 为氡的衰变常数; t 为氡的积累时间。

式(1)中, N_s 和 N_0 为实际测量值, k 、 C_b 和 R 为测试仪器和试验方法参数,需在测量前选定,1—

$e^{-\lambda t}$ 可以根据氡的积累时间查表得到。

3.2 ^{222}Rn 放射性测量

水样中 ^{222}Rn 放射性测量不需要对水样进行过多的前处理,可直接取适量的水样置于扩散器中,约100~500 mL(依扩散器容积而定);用真空泵将扩散器抽成真空后封存积累氡气1~2 d;积累完成后,同 ^{226}Ra 放射性测量一样通入闪烁室内进行测量。

^{222}Rn 放射性浓度(C_{Rn})计算公式为

$$C_{\text{Rn}} = \frac{k(N_s - N_0)}{V e^{-\lambda t}} \quad (2)$$

式(2)中, N_s 和 N_0 为实际测量值, k 为测试仪器参数,需在测量前选定, $e^{-\lambda t}$ 可以根据氡的积累时间查表得到。

4 参数的确定

放射性核素分析测量的仪器设备一般都需要进行一系列的测试试验,用于选取一些适用的参数。将仪器设备调到最佳工作状态,有利于得到比较准确可靠的数据^[9]。

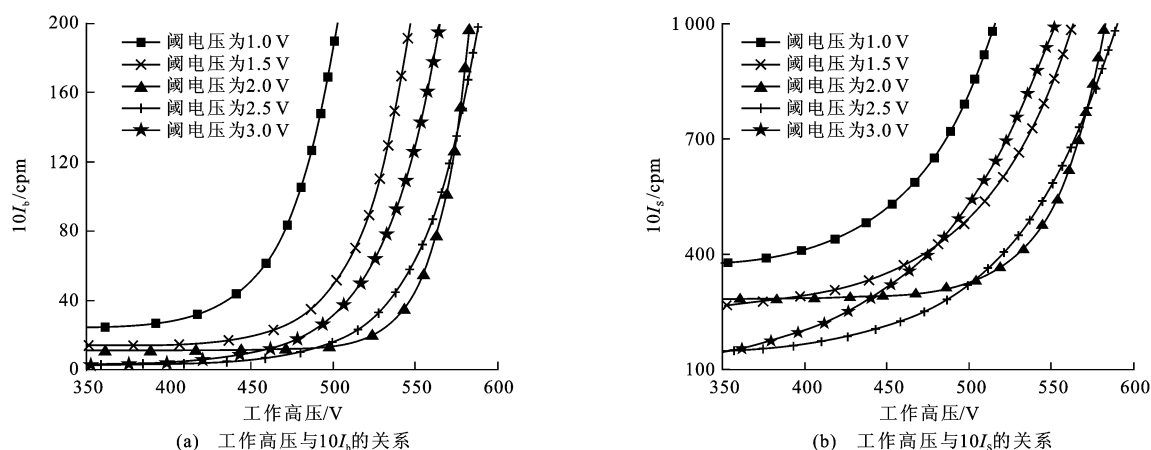
试验中用到的FD-125型氡钍分析仪需要选定的参数有最佳阈电压、工作高压、闪烁室本底系数和闪烁室的校正因子;在硫酸钡镭共沉淀法中,需要确定其化学回收率及放射性回收率。

4.1 阈电压、工作高压

为了使仪器达到最佳工作状态,需要对其阈电压及工作高压进行选取。首先,选用放射性活度为 $27.9 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ 的GBW04315a碳酸钡镭中 ^{226}Ra 放射性源制成液体标准镭源,取适量液体标准镭源注入扩散器中封闭积累氡气;再用FD-125型氡钍分析仪测定不同阈电压、不同工作高压下的仪器本底计数率(I_b)和样品计数率(I_s)。根据不同阈电压下工作高压与 I_s 的关系曲线、相应阈电压下工作高压与 I_b 的关系曲线^[8]和工作高压与平均计数率比(I_s^2/I_b)的关系曲线、阈电压与 I_s^2/I_b 的关系曲线^[9]来确定仪器的最佳工作阈电压和工作高压。

根据FD-125型氡钍分析仪输出脉冲要求及相关资料^[9],将阈电压选为1、1.5、2、2.5、3 V,工作高压范围为300~600 V,以50 V为一个频率依次递增。固定阈电压,调节工作高压,记录每次变换工作高压时的 I_b 、 I_s ,绘制相应的关系曲线,并选取最佳阈电压和工作高压。将测量所得数据绘制成不同阈电压下工作高压与 I_b 的关系曲线和工作高压与 I_s 的关系曲线(图4)。

凡采用光电倍增管构成的闪烁脉冲探测器,都

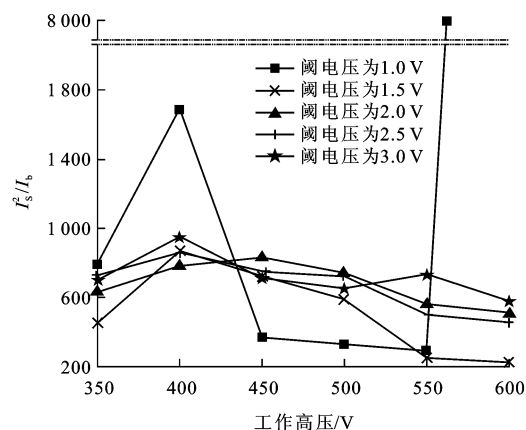
图 4 不同阈电压下工作高压与 $10I_b$ 、 $10I_s$ 的关系Fig. 4 Relationships Between Working High Pressures and $10I_b$, $10I_s$ Under Different Threshold Electric Pressures

有一个重要特征:当其他工作条件不变(闪烁室中的 α 射线强度、前置放大器放大倍数和定标器甄别闭值均固定)时,只改变光电倍增管所加负高压,可得到计数率与高压的关系曲线,且在该曲线中部会出现一平坦区。该平坦区称为高压“坪”曲线,由此可以正确选定光电倍增管的工作高压,并能保证仪器稳定工作,使测量值不受外界条件变化的影响^[10]。根据国家标准 GB 11214—1989,本底计数率较低,“坪”长大于 60 V 以及“坪”斜小于 10% 的曲线阈电压和相应的工作高压即为仪器的最佳阈电压和工作高压^[8,11]。

从图 4(a)可以看出:当阈电压为 1.5、2、2.5、3 V 时,曲线的“坪”长都大于 60 V,且“坪”斜都小于 10%;当阈电压为 1 V 时,曲线“坪”长不够 60 V。从图 4(b)可以看出,当阈电压为 3 V 时,曲线的“坪”斜大于 10%,且“坪”长小于 60 V,但当阈电压为 1.5 V 和 2.5 V 时,虽然“坪”长都大于 60 V,且“坪”斜小于 10%,但是“坪”斜起伏略微有点大。因此,当阈电压为 1.5、2.5 V 时,工作高压应在 350~450 V 之间选取,而当阈电压为 2 V 时,工作高压应在 350~500 V 之间选取。具体应该选定哪个为最佳阈电压和工作高压,还需要进一步讨论。

将所得 I_b 、 I_s 数据进行比较,得到平均计数率比(I_s^2/I_b),该平坦区再绘制不同阈电压下工作高压与 I_s^2/I_b 的关系曲线(图 5)。从图 5 可以看出,当阈电压为 1 V 或 3 V 时,曲线波动较大,在所选的工作高压范围内都出现了两个峰值,平均计数率比分布情况不是很稳定。这可能是由于阈电压选取过低,较容易受外界干扰,而阈电压选取较大时,仪器灵敏度不够;也可能是因为所设工作高压范围较小,在此范围内未能满足所有阈电压所需的工作高压。从图

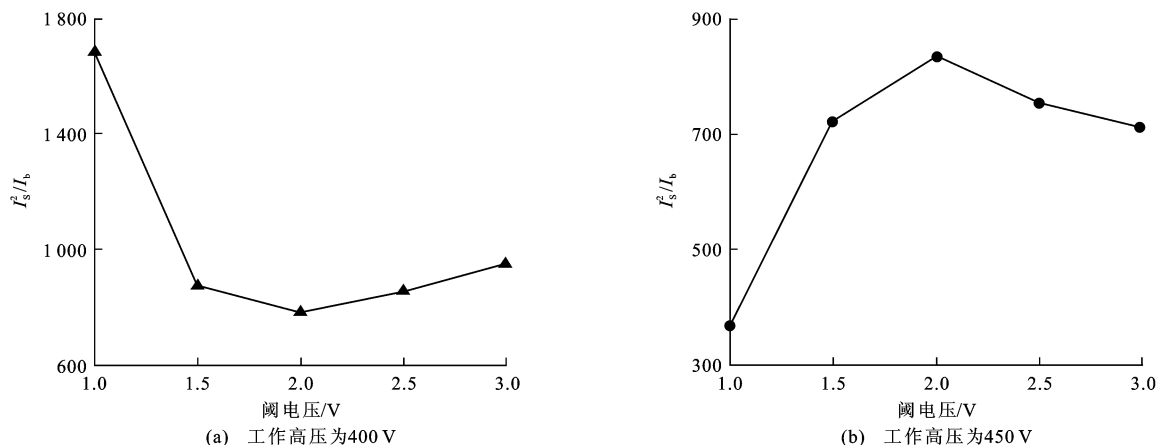
5 还可以看出:当阈电压为 1.5 V 时,最大工作高压为 400 V;当阈电压为 2 V 时,最大工作高压为 450 V;当阈电压为 2.5 V 时,最大工作高压为 400 V。

图 5 不同阈电压下工作高压与 I_s^2/I_b 的关系Fig. 5 Relationship Between Working High Pressure and I_s^2/I_b Under Different Threshold Electric Pressures

在可选取的工作高压下,阈电压应取 I_s^2/I_b 为最大值时的阈值^[9],因此,用选定的工作高压 400、450 V 分别作出阈电压与 I_s^2/I_b 的关系曲线(图 6)来确定最终阈电压和工作高压。从图 6 可以看出:当工作高压为 400 V 时, I_s^2/I_b 最大值所对应的阈电压为 1 V,与以上分析不符;当工作高压为 450 V 时, I_s^2/I_b 最大值所对应的阈电压为 2 V,与以上分析相符。因此,本试验的 FD-125 型氡钍分析仪最佳阈电压和工作高压应分别选取 2 V 和 450 V。

4.2 闪烁室的校正因子

闪烁室的校正因子用来确保水氡观测值更加准确、可靠,并可以不断纠正测量中出现的偏差。由于氡气的残留和空气的不断冲洗,闪烁室在使用过程中本身性能会逐渐降低以致观测值偏离正常水平,

图6 不同工作高压下阈电压与 I_s/I_0 的关系Fig. 6 Relationships Between Threshold Electric Pressure and I_s/I_0 Under Different Working High Pressures

所以闪烁室的校正因子标定就是检查闪烁室性能发生变化及时调整偏差的过程^[12-14]。利用放射性活度为 $27.9 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ 的 GBW04315a 碳酸钡镭中 ^{226}Ra 放射性源作为标准镭源液,按测定正常水样的方法进行测量后,求解闪烁室的校正因子

$$k = \frac{a(1 - e^{-kt})}{I_s - I_0} \quad (3)$$

式中: a 为镭标准源的放射性活度,其与所选标准源有关,本次测试取值 $27.9 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$; I_0 为闪烁室本底平均计数率。

本次试验中用到闪烁室 A、B、C,依照上述方法步骤对 3 个闪烁室进行校正因子选取,将测试结果代入式(3)计算后所得结果见表 2。

表2 闪烁室的校正因子

Tab. 2 Collection Factors of the Scintillation Chambers

闪烁室编号	A	B	C
校正因子/($\text{Bq} \cdot \text{cpm}^{-1}$)	0.005 428	0.005 567	0.005 060

不同闪烁室的校正因子是不同的,并且随着仪器性能的不断变化和参数的偏移,校正因子也会因时间、环境的变化而发生改变^[15]。事实证明,校正因子会随着时间的增长而不断增大,因此,每年标定的新校正因子都会比原校正因子大^[16]。校正因子越大,表明闪烁室的性能也就相对越差,因此,《水中氡测量规程》(EJ/T 1133—2001)中要求每年应定期对测氡仪器的校正因子进行标定,以检查闪烁室性能变化的程度,并规定当闪烁室的新校正因子与原校正因子相对偏差大于 $\pm 5\%$ 时,应舍弃原校正因子而启用新校正因子,以保证水氡测量值的准确、可靠^[17]。一般情况下,当一个闪烁室的校正因子大于 0.009 时,这个闪烁室就不能再使用了,应更换新闪烁室^[17-18]。

4.3 仪器本底计数率

仪器本底计数率是指在未装入样品前,所能监测到的闪烁室自身放射性能的脉冲输出率。国家标准 GB 11214—1989 中规定 FD-125 型氡钍分析仪本底计数率不应超过 10 cpm。而在闪烁室的使用过程中,由于氦气的不断冲洗,其本底计数率会随着时间的增长而不断增大,进而增加样品测量的误差,这就需要在仪器使用后及时降低仪器的本底计数率。比较直接的方法是在样品测量完成后及时将闪烁室内残留的氦气去除,刚开始时可以在 3 h 内抽排 1、2 次,往后每 5~8 h 抽排 1 次,每次抽排 5~10 min,一两天后即可恢复到原有本底^[19]。

4.4 化学回收率、放射性回收率

仪器误差和人为误差等不可避免,因此,就需要对试验方法进行回收率计算。采用质量法对水样前处理的硫酸钡镭共沉淀法进行化学回收率测定,即确定硫酸钡的回收率。以加入到水样中的氯化钡及硫酸计算出的硫酸钡载体质量作为理论值,再用烘干法将所沉淀烘干后得到的实际硫酸钡质量作为实际值,将实际值与理论值进行比较,得到化学回收率

$$R_b = \frac{M_s}{M_L} \times 100\% \quad (4)$$

式中: R_b 为化学回收率; M_s 为硫酸钡实际质量; M_L 为硫酸钡理论质量。

取 2 mL 、 $100 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的氯化钡溶液注入到 1 L 的蒸馏水中,再加入适量的 1:1 硫酸溶液生成硫酸钡沉淀,待沉淀完成后用烘干法将沉淀物烘干,取出称质量,依据式(4)进行计算。在化学回收率的选取中,化学回收率的大小受溶液的 pH 值影响很明显。从表 3 可以看出,当 pH 值为 2.5~3.0 时,化学回收率最高,可达 98.85%。

表 3 化学回收率的选取

Tab. 3 Selection of the Chemical Recovery Rate

pH 值	硫酸钡实际 质量/g	硫酸钡理论 质量/g	化学回收 率/%
1.5~2.0	0.179 5	0.2	89.75
2.0~2.5	0.185 2	0.2	92.60
2.5~3.0	0.197 7	0.2	98.85
3.0~3.5	0.195 8	0.2	97.90
3.5~4.0	0.190 4	0.2	95.20
4.0~4.5	0.193 7	0.2	96.85

放射性回收率是实际值与理论值的比值。其中,加入 ^{226}Ra 标准溶液的实际质量及其核素活度为理论值,实际测得的硫酸钡(Ra)源 ^{226}Ra 核素活度为实际值^[20-21]。放射性回收率计算公式为

$$R_c = \frac{C_s}{C_L} \times 100\% \quad (5)$$

式中: R_c 为放射性回收率; C_s 为实测硫酸钡(Ra)源 ^{226}Ra 核素活度; C_L 为标准硫酸钡(Ra)源液质量与标准源 ^{226}Ra 放射性活度的乘积。

采用放射性活度为 $27.9\text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ 的GBW04315a碳酸钡镭中 ^{226}Ra 放射性源作为标准镭源液,调节溶液 pH 值来选定放射性回收率(表 4)。从表 4 可以看出,当 pH 值为 $2.5 \sim 3.0$ 时,放射性回收率最大为 94.6% ,与最大化学回收率的 pH 值相吻合。因此,在运用硫酸钡镭共沉淀法对水样进行前处理时,应当将水样的 pH 值控制在 $2.5 \sim 3.0$ 之间,以确保试验的化学回收率和放射性回收率都能达到最大值,使水样中 ^{226}Ra 能得到最大限度的回收。把化学回收率与放射性回收率合并,可得式(1)中的方法回收率(93.51%)。国家标准 GB 11214—1989 中规定方法回收率范围应在 $93\% \sim 98\%$ 之间,因此,本试验的方法回收率 93.51% 是符合要求并可予以采用的。

表 4 放射性回收率的选取

Tab. 4 Selection of the Radioactive Recovery Rate

pH 值	^{226}Ra 标准 源液质量/g	放射性活度/ ($\text{Bq} \cdot \text{g}^{-1}$)	实测硫酸钡(Ra) 源 ^{226}Ra 核素 活度/ Bq	放射性 回收率/%
1.5~2.0	0.01	27.9	0.218 3	78.24
2.0~2.5	0.01	27.9	0.255 7	91.68
2.5~3.0	0.01	27.9	0.264 3	94.60
3.0~3.5	0.01	27.9	0.257 1	92.15
3.5~4.0	0.01	27.9	0.260 9	93.51
4.0~4.5	0.01	27.9	0.247 0	88.53

5 结 语

(1)本试验所用放射性测试仪器 FD-125 型氡钍分析仪的最佳阈电压为 2 V ,对应的最佳工作高压为 450 V 。

(2)所采用的闪烁室 A、B、C 的校正因子分别为 $0.005\ 428$ 、 $0.005\ 567$ 、 $0.005\ 060$,并且每年应定期对测氡仪器的校正因子进行标定,以检查闪烁室性能变化的程度。

(3)样品测试前应确保仪器的本底计数率应小于 10 cpm ,这就需要在仪器后及时去除闪烁室内残留的氡气,以降低仪器的本底计数率。

(4)在进行前处理提取水样 ^{226}Ra 时,pH 值控制在 $2.5 \sim 3.0$ 之间,可确保方法回收率最大。本试验的方法回收率为 93.51% 。目前,这种方法只能测定地下热水的镭和氡放射性浓度,并且对不同样品都采用相同的步骤进行测试。

参 考 文 献 :

References :

- [1] CHERDYNTSEV V V. Uranium-234[M]. Jerusalem: Israel Program of Scientific Translations,1973.
- [2] ZHOU X,LI J,ZHOU H Y,et al. Increase in Thermal Groundwater Due to a Flowing Well near the Songshan Hot Spring in Beijing, China[J]. Environmental Geology,2008,53(7):1405-1411.
- [3] 周训,金晓媚,梁四海,等.地下水科学专论[M].北京:地质出版社,2010.
ZHOU Xun,JIN Xiao-mei,LIANG Si-hai,et al. Special Topics on Groundwater Sciences[M]. Beijing: Geological Publishing House,2010.
- [4] 郭帅,周训,吴畅,等.模拟温泉形成的一种管道渗流实验[J].现代地质,2012,26(3):620-626.
GUO Shuai,ZHOU Xun,WU Yang,et al. A Modeling Experiment of Seepage in a Pipe for the Formation of a Hot Spring[J]. Geoscience,2012,26(3):620-626.
- [5] 刘时彬.地热资源及其开发利用和保护[M].北京:化学工业出版社,2005.
LIU Shi-bin. Geothermal Resources and Their Development Utilization and Protection[M]. Beijing: Chemical Industry Press,2005.
- [6] 胡恭任,于瑞莲.泉州市地下水放射性评价[J].广州环境科学,2003,18(4):43-46.
HU Gong-ren,YU Rui-lian. Investigation of Radio-element Content in Ground Waters in Quanzhou City[J]. Guangzhou Environmental Sciences,2003,18(4):43-46.
- [7] 陈慧广.苏台德地区地下热水的水化学与放射性研究

- [D]. 北京:中国地质大学,2012.
- CHEN Hui-guang. Study on Hydrochemistry and Radioactivity of Thermal Ground Waters in Sudety Area [D]. Beijing:China University of Geosciences,2012.
- [8] GB 11214—1989,水中镭-226的分析测定[S].
GB 11214—1989, Analytical Determination of Radium-226 in Water[S].
- [9] 刘 鄂,刘建防. FD-125型室内氡钍分析仪配用自动定标器最佳工作状态的选定[J]. 干旱环境监测,1999,13(4):237-240.
LIU E,LIU Jian-fang. The Selection of Top Working Condition About the FD-125 Type Radon and Thorium Analyzer Equipped with Automatic Scaler Indoor [J]. Arid Environmental Monitoring, 1999, 13(4): 237-240.
- [10] 李正蒙. 地震水化台网常规测氡仪器的技术性能指标及其判定[J]. 地震,1993(4):38-45.
LI Zheng-meng. The Technical Performance Indexes and Their Judgment of Conventional Radon-measuring Instruments of Seismo-hydrochemistry Network [J]. Earthquake,1993(4):38-45.
- [11] 王茂枝,周剑良,邱小平,等. 调节闪烁室法测量 ^{222}Rn 、 ^{220}Rn 时仪器工作状态对探测效率的影响[J]. 核电子学与探测技术,2007,27(1):93-95.
WANG Mao-zhi,ZHOU Jian-liang,QIU Xiao-ping,et al. The Relationship Between Detection Efficiency and Setting of Instruments for ^{222}Rn , ^{220}Rn Measurements with Scintillation Cell[J]. Nuclear Electronics and Detection Technology,2007,27(1):93-95.
- [12] 张学敏,兰 陵,李艳萍. 测氡仪的标定及K值使用中存在的问题[J]. 内陆地震,2005,19(1):90-94.
ZHANG Xue-min,LAN Ling,LI Yan-ping. The Calibration of Examine Radon Apparatus and Some Questions Existing in Application of the K Value[J]. Inland Earthquake,2005,19(1):90-94.
- [13] 周青芝,肖德涛,赵桂芝,等. 一种同时测量 ^{222}Rn 、 ^{220}Rn 的单闪烁室两段法[J]. 南华大学学报:自然科学版,2013,27(4):19-22.
ZHOU Qing-zhi,XIAO De-tao,ZHAO Gui-zhi,et al. Simultaneous Measurement of Radon and Thoron Using a Scintillation Cell[J]. Journal of University of South China:Science and Technology,2013,27(4):19-22.
- [14] 谭延亮,位楠楠,单 健,等. 低压闪烁室对 ^{220}Rn 浓度参考水平定值的方法[J]. 原子能科学技术,2013,47(7):1277-1280.
TAN Yan-liang,WEI Nan-nan,SHAN Jian,et al. Method for Determination of ^{220}Rn Concentration Reference Value by Low-pressure Scintillation Cell [J]. Atomic Energy Science and Technology,2013,47(7):1277-1280.
- [15] 唐方东,何林峰. 标准氡室校准测氡仪的原理及方法[J]. 上海计量测试,2008(3):26-27.
TANG Fang-dong,HE Lin-feng. Principles and Methods of Radon Chamber Calibration Standard for Measuring Radon[J]. Shanghai Measurement and Testing, 2008(3):26-27.
- [16] 张清秀,郑小菁,黄晓华. 测氡仪器K值使用中存在的问题讨论[J]. 华南地震,2011,31(1):110-115.
ZHANG Qing-xiu,ZHENG Xiao-jing,HUANG Xiaohua. Discussion of the K-value Problems of Using the Radon Apparatus[J]. South China Journal of Seismology,2011,31(1):110-115.
- [17] 朱方保,胡 奇,张光萍. FD-125测氡仪观测中值得注意的几个问题[J]. 地震地磁观测与研究,2005,26(4):84-89.
ZHU Fang-bao,HU Qi,ZHANG Guang-ping. Some Noticeable Problems on Using FD-125 Rn Instrument [J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research,2005,26(4):84-89.
- [18] 张清秀,林国元. 试论水氡观测中仪器K值的使用[J]. 地震学刊,2002,22(2):51-53.
ZHANG Qing-xiu,LIN Guo-yuan. On the Use of the Instrument's K-value in Ground-water Radon Content Observations[J]. Journal of Seismology,2002,22(2): 51-53.
- [19] 肖拥军,丘寿康,谢菊英,等. 闪烁室本底的来源及降低方法[J]. 华南大学学报:自然科学版,2004,18(3):108-111.
XIAO Yong-jun,QIU Shou-kang,XIE Ju-ying,et al. Sources and Reducing Methods of Scintillation Cell Background[J]. Journal of Nanhua University: Science and Technology,2004,18(3):108-111.
- [20] 魏 伟,康兴伦,江雪艳,等. 地下卤水中镭的富集与测定方法研究[J]. 海洋科学,2008,32(11):1-4.
WEI Wei,KANG Xing-lun,JIANG Xue-yan,et al. A New Method for the Enrichment and Measurement of Radium in Ground Brine[J]. Marine Sciences,2008, 32(11):1-4.
- [21] 李 婷. 地下热水中天然放射性镭-226和氡-222测定及分析评价[D]. 北京:中国地质大学,2013.
LI Ting. Measurement and Analysis of Natural Radioactive Elements Ra-226 and Rn-222 in Thermal Groundwater[D]. Beijing:China University of Geosciences,2013.