

连续、自动测量地下水氡的一种 α 方法

翟兴耀 徐伟南

(西安交通大学)

摘 要

本文介绍了一种利用气—水相平衡原理实现连续、自动监测地下水氡浓度的新方法。推导出了该方法的数学表达式, 对该方法的灵敏度、时间响应等特性作了讨论, 并与利用该原理研制的水氡测量仪的测量结果进行比较。结果表明, 这个新方法能够满足地震预报和地质领域测氡的要求。

本文对利用气、水相氡平衡原理设计、制造的一种连续自动测氡装置及其特性作了探讨。该方法的优点是测量装置体积小, 工作可靠, 能连续自动观测, 仪器操作简便。避免了某些绝对测量方法中的脱气效率、子体积累等问题及其他测量误差因素。

一、工 作 原 理

测量装置如图1所示。主要由探头装置和电子仪器两部分组成。探头装置包括“气—水”近密封容器系统和闪烁传感器系统, 它们的输出经由电缆与电子仪器和记录仪相连接。

地下水用泵打入测量装置的入水口, 自下而上进入“上容器”, 当水位达到AA'水平面时, 沿付套筒壁槽经主套筒内壁落入“下容器”。当下容器水位达到BB'水平面时, 由出水口流出。下容器的BB'平面将使容器构成一个气体近密封体系。在水流量及水温一定时, 体系内的气、水相氡将达到平衡。气相氡将按平衡分配系数 ϵ 进行分配。通过上容器顶部的大面积ZnS(Ag)闪烁计数器, 将氡及其子体衰变放出的 α 粒子能量转变为电信号, 供电子仪器部分分析、记录。仪器刻度经过定标以后即可反映水氡浓

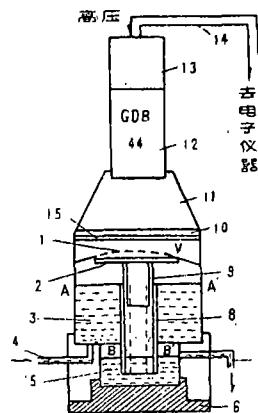


图1 测量装置图

1. 凝水屏 2. 反射板 3. 上容器 4. 入水口 5. 下容器
6. 支座 7. 出水口 8. 主套筒 9. 付套筒 10. ZnS(Ag)
11. 光导 12. 光电倍增管 13. 前置放大器 14. 电缆
15. 加温器

Fig. 1 A sketch of measuring apparatus.

度。

根据克拉珀龙气态方程, 在平衡后系统中气相氦浓度 $m = \mu P(RT)^{-1}$ 。水相氦平均浓度 $\bar{M} = KP$ (K 为单位分压力、单位体积水中溶解的氦量, P 为系统中氦的平衡分压力) (2)。

定义氦的平衡分配系数为系统内气相氦量与总氦量之比, 即:

$$\xi = \frac{mV}{mV + \bar{M}V_0} = \frac{1}{1 + \frac{\alpha V_0}{V}} \quad (1)$$

式中的 α 为折合一大气压下, 温度为 T 的一升水中所溶解的氦气体积 (2), $\alpha = KRT\mu^{-1}$; V 、 V_0 分别为系统气、水的容积 (1)。由此可见, 对于确定的装置, 氦的平衡分配系数 ξ 是只与水温 T 有关的量, T 一定, 则 ξ 为常数。

当地下水以一定流量 v (l/mi) 流入容器时, 忽略水满位的时间, 则系统动态方程为,

$$dm/dt = \frac{\xi V(M_0 - M_0)}{V} [1 - e^{-\sigma t}] - bm(t) \quad (2)$$

其中 $b = \lambda + H - \sigma$, 称为等效衰减常数, λ 是 ^{222}Rn 的衰变常数 (1.26×10^{-4} 分 $^{-1}$); H 是近密封系统的气体泄漏常数; σ 是气、水相氦平衡常数, 其量纲均为 $[m_i^{-1}]$ 。其中 M_0 、 M_0 分别为容器进、出水口的水氦浓度 (方程中忽略了氦子体 α 粒子的贡献)。由 (1) 式求得系统内水相氦平均浓度为:

$$\bar{M} = \frac{mV}{V_0} \left(\frac{1 - \xi}{\xi} \right) = \frac{M_0 + M_0}{2} \quad (3)$$

所以, 出水口氦浓度 $M_e = \frac{2mV}{V_0} \left(\frac{1 - \xi}{\xi} \right) - M_0$, 代入 (2) 式后, 解微分方程, 得到系统内

气相氦浓度 m 随时间 t 的变化关系为:

$$m(t) = \frac{\xi UM_0}{\frac{UV}{V_0}(1 - \xi) + b} [1 - e^{-bt}] - \frac{\xi UM_0(e^{-\sigma t} - e^{-bt})}{\frac{UV}{V_0}(1 - \xi) + b - \sigma} \quad (4)$$

式中的常数 b 可通过实验测出的读数与时间的函数曲线求出, σ 可由在已知流量下, 给定 t 时测出的读数值, 解方程 (4) 来求出。本装置求得的 $b = 0.026 \text{ mi}^{-1}$, $\sigma = 0.25 \text{ mi}^{-1}$ 。

测量装置的计数率

$$n(t) = \frac{\lambda \Omega \eta V_0}{4\pi} m(t) \quad (5)$$

式中的 Ω 为有效空间 V_0 对闪烁体所张的立体角, $\Omega = 2\pi$, $V_0 = 0.45 \text{ l}$, $V = 1.53 \text{ l}$, $V_0 = 2.285 \text{ l}$, η 为本征探测 (α 粒子的) 效率 ($\eta \approx 1$)。将各参数代入 (5) 式, 得:

$$n(t) = 0.225 \lambda m(t) \quad (6)$$

若水氦浓度 M_0 以埃曼 (1 埃曼 = $3.7/\text{S} \cdot \text{l}$) 为单位, 则 (6) 式变为:

$$n(t) = 50m(t) \quad (7)$$

实际上, 当测量时间 t (即把地下水进入容器的时刻作为零点计算是时间) $\geq 5/b$ 时, 计数率即达到饱和 $n(\infty)$ 值:

$$n(\infty) = \zeta \cdot M_0 \left[\frac{49.6}{\frac{V(1-\zeta)}{V_0} + \frac{b}{V}} + \frac{0.335}{\frac{V(1-\zeta)}{V_0} + \frac{b-\sigma}{V}} \right] \quad (8)$$

因而, 在一定水流速 V 下, 饱和计数率与水氡浓度是对应的, 测知 $n(\infty)$ 即可确定水氡浓度 M_0 。

当水流量 $v = 0.51$ 时, 水氡浓度为1埃曼, $\zeta = 0.75$ 时, 相应产生的平均饱和计数率最大值约为 $169.5/\text{mi} \cdot \text{\AA}$ 。本装置的时间常数 $RC = 120\text{S}$, 所以对基底为 $5 \text{\AA}$ 的相对标准误差

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{2nRC}} \leq 2\% \quad (9)$$

相应率表电流读数的标准误差: $\delta = \sqrt{n/2RC} \cdot q$, q 为对应一个 α 粒子所引起率表输入脉冲的电荷量, 即为定量电容与脉冲幅度的乘积, 对本装置第一挡, 定量电容为 $0.47\mu\text{f}$, 输入脉冲幅度等于 8V , $q = 3.76 \times 10^{-6}\text{C}$ (库)。所以本仪器的测量灵敏度(当基底为5埃曼时)

$$\gamma = 3\sigma_B = 3 \sqrt{\frac{5 \times 169.5}{60 \times 240}} \times 3.76 \times 10^{-6} = 2.7\mu\text{d} \quad (10)$$

因为1埃曼相当 $\frac{169.5}{60} \times 3.76 \times 10^{-6} \text{a} = 10.6\mu\text{a}$ 电流, 所以本测量装置对基底为 $5 \text{\AA}$ 的灵敏度理论值约为 $\gamma = 0.25 \text{\AA}$ 。

二、测量装置的时间响应

时间响应一般定义为计数率变化(或电流变化)超过三倍基底标准误差(3σ)所需要的时间(τ)。它与水氡基底浓度及水氡的变化率有关, 对变化率为“突变”(即不考虑浓度变化的上升时间)情况下, 计数率变化率为:

$$\frac{dn}{dt} = 50 \frac{dm}{dt} \approx \frac{50\zeta vbM_0'}{\frac{vV}{V_0}(1-\zeta)+b} e^{-b't} \quad (11)$$

$\tau \cdot (dn/dt) = 3\sigma$ 的时刻 τ , 即是测量装置的时间响应, 所以

$$\frac{-50\zeta v \cdot bM_0'\tau}{\frac{vV}{V_0}(1-\zeta)+b} e^{-b'\tau} = 3 \sqrt{\frac{n_B}{2RC}} \quad (12)$$

式中的 M_0' 为水氡异常浓度, n_B 是基底计数率。将 $e^{-b't}$ 用台努级数展开, 解一元二次方程, 得出时间响应:

$$\tau = \frac{1}{2b} \left\{ 1 + \left[1 + \frac{0.24 \left(\frac{vV}{V_0}(1-\zeta)+b \right)}{\zeta v \cdot M_0'} \sqrt{\frac{n_B}{2RC}} \right]^2 \right\} \quad (13)$$

当水流量 $v = 0.51/\text{mi}$, 水氡异常浓度 $M_0' = 1 \text{\AA}$, 基底浓度为 $5 \text{\AA}$ 时, 将本装置有关参量代入(13)式后, 计算出测量装置的时间响应 $\tau \approx 39$ 分钟。当水流量为 $11/\text{mi}$ 时求出 $\tau \approx$

39分。可见,当水流量大于0.4l/mi以后,提高流量来改善时间响应的意义不大。由实验测得该装置的响应曲线见图2。

由图可见,当水氦浓度在0.5~1小时内发生30%正突变时(如图2(a)、(b)所示),该测氦装置有明显的响应峰,峰值约滞后90分钟;而对于负突变,其时间响应较差,它要比正突变峰滞后约30分钟。

三、仪器测量精确度与水流稳定度的关系

由(4)、(7)式可以看到,仪表读数和水流量 v 有一定联系,根据(7)式计算得 $n = f(v)$ 函数值与实验测到的结果表示于图3。由图可见:当水流量大于0.3l/mi后,它对仪表读数的影响不大,只要选择水流量大于0.4l/mi,在 v 变化 $\pm 25\%$ 时,而率表指示的变化小于 $\pm 4\%$ 。如果采取稳定流量措施,即可忽略流量波动对测量精度的影响。

四、测量精度与水温的关系

由(1)式可知,气、水相氦平衡分配系数 ξ 与氦在水中的溶解度 α 有关,而 α 又是和水温相关的量,其关系的近似表达式为:

$$\alpha = 0.51E \times P[-0.075(T)^{4/5}] \quad (14)$$

将(14)代入(7)式,求解水温 T 变化单位温度时计数率的相对变化为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial n(T)}{n(T_0) \partial T} &= \left[\frac{vV}{V_0} (1 - \xi(T_0) + b) \right] \frac{1}{\xi(T_0)} \frac{\partial}{\partial T} \left[b + \alpha \left(v + \frac{bV_0}{V} \right) \right]^{-1} \\ &= \left[\frac{vV(1 - \xi(T_0))}{V_0 \cdot \xi(T_0)} + \frac{b}{\xi(T_0)} \right] \frac{0.075 \times 4 T_0^{-1/5} \alpha \left(v + \frac{bV_0}{V} \right)}{5 \left(\alpha v + b + \frac{\alpha b V_0}{V} \right)^2} \\ &\approx \left[\frac{vV(1 - \xi(T_0))}{V_0 \cdot \xi(T_0)} + \frac{b}{\xi(T_0)} \right] \frac{0.11 T^{-1/5}}{V e^{-0.075 T^{4/5}}} \quad (15) \end{aligned}$$

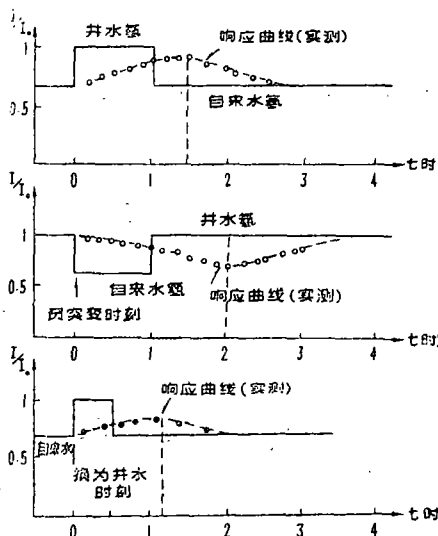


图2 时间响应曲线
Fig. 2 The curves of time response.

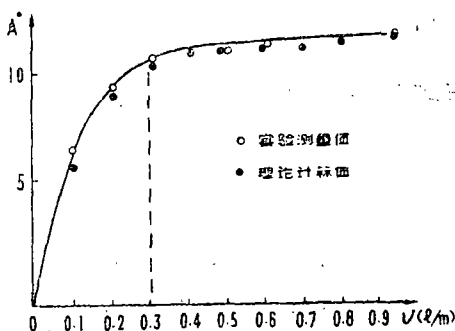


图3 仪器读数与水流量 V 的关系曲线
Fig. 3 Relation of reading on instrument to the flow of water.

对水温为 $T_0 = 20^\circ\text{C}$ 的情况,当水温变化 1°C 时,由(15)式计算得计数率的相对变化小于1.9%。若要求测量精度较高,可以对温度效应进行校正。这里要指出的是,上述温度

影响不只是由测量装置或测量方法造成的，而是地下水温度固有变化引起的，这种温度效应同样影响其他测氡方法的精确度。

结 语

利用“气—水相氡平衡原理”来连续、自动测量地下水或泉水的氡含量变化，作为预报地震的一种手段是比较新颖而先进的。该方法能够观测到延时半小时以上的氡异常突变，对捕捉震前信息提供了一种可能。其特点是：仪器装置简单、可靠，操作方便，灵敏度较高（ 0.25 A ）。利用国产FD—105射气仪与本测量装置对西安交通大学二村300米深井水氡联测两个月表明，两者的基本趋势一致。FD—105测量结果的标准偏差 $S_F = 0.65 \text{ A}$ ，本测量装置两个月测量结果的标准偏差 $S = 0.665 \text{ A}$ ，而FD—105的相对偏差 $\delta_F = 7.28\%$ ，本装置 $\delta = 6.8\%$ 。由此说明该测量装置稳定性较好。鉴于我们对该方法的研究及实际观测时间还不长，试制的仪器还存在有缺陷和不完善之处，望从事地震研究的专职人员和广大业余观测者多提宝贵意见。

（本文1984年5月30日收到）

参 考 文 献

- [1] Masayasu Noguchi, A Method for continuous measurement of radon in ground water for earthquake prediction, J.G.R., Vol.82, №8, 1977.
- [2] 卢希庭，原子核物理，原子能出版社，1981.
- [3] 北京师范大学，简明化学手册，北京出版社，1980.

A α -METHOD FOR CONTINUOUS AND AUTOMATIC MEASUREMENT OF RADON IN GROUND WATER

Zhai Xingyao and Xu Weinan
(Xian Jiaotong University)

Abstract

This paper presents a new method by which the density of radon in ground water could be continuously and automatically measured on the basis of Gas-Water phase equilibrium principle of radon. In the paper the author deduces the mathematics expression for the method, discusses its sensibility and time response etc., and compares the theory with experimental results attained by water-radon measuring apparatus based on this principle. The results show that this new method can meet with the requirments of observation of radon in earthquake prediction and geological circles.

外 事 活 动

▲1984年5月5日至15日,为执行中美地震科技合作中国数字化台网的建设项目,美国地质调查局的地震专家蒂尔格纳博士来我所兰州观象台进行安装井下地震计的现场技术指导,我所科技工作者和蒂尔格纳先生就有关技术问题进行了讨论。

▲1984年6月25日至7月2日,美国地质调查局首席科学家华莱士、地震专家巴克南姆、汉克斯以及国家地震局地质研究所科技人员和我所科技人员一起对我省高台等地的地震断层进行了考察和研究。

▲1984年8月30日至9月13日,日本东京大学副教授胁田宏先生应郭增建所长的邀请,来我所进行了为期半个月的讲学和学术交流。在此期间,国家地震局分析预报中心、国家地震局地质所、河北省地震局等单位的科技工作者也来兰听讲和进行学术交流。这次学术活动为促进我所的地震科研工作起了积极作用。