

# 核地球物理的理论与实践

主 编 贾文懿  
编 者 方 方 苗 放

四川大学出版社

责任编辑:周兴泰  
封面设计:卢奇勋  
责任印刷:李 平

---

图书在版编目(CIP)数据

核地球物理的理论与实践/贾文懿主编. —成都:四川  
大学出版社,2001.8  
ISBN 7-5614-2196-6

I. 核… II. 贾… III. 核技术应用—地球物理学  
IV. P3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)和 051190 号

---

书 名:核地球物理的理论与实践

---

主 编:贾文懿  
出 版:四川大学出版社  
地 址:成都市一环路南一段 24 号(610065)  
印 刷:西南冶金地质印刷厂  
发 行:四川大学出版社  
开 本:787mm×1092mm 1/16  
印 张:18.25  
字 数:425 千字  
版 次:2001 年 8 月第 1 版  
印 次:2001 年 8 月第 1 次印刷  
印 数:001~400 册  
定 价:30.00 元

---

◇读者邮购本书,请与本社发行科  
联系。电话:5412526/5414115/  
5412212 邮编:610064  
◇本社图书如有印装质量问题,请  
寄回印刷厂调换。

版权所有◇侵权必究

# 序

---

这是一本内容以核地球物理或放射性地球物理为主的论文集。它编辑了成都理工大学的部分同志们在这个领域从事教学或科研工作时撰写的代表性论著(现未在成都理工大学工作的,已在文章中加注),涉及核地球物理的基础理论、仪器设备、方法技术和实际应用等方面。它既有对过去的回顾,也有对现在的论述。这些内容或许能从一个侧面反映我国核地球物理的发展历史与现实状况,还能反映有些同志目前从事的工作新展望。

出版时,我们将有关论文大致按照:基础理论、仪器设备(含硬、软件)、方法及应用、综述及其他四个部分作了分类,并按发表时间先后作了安排,以期对论文的查阅、参考有所帮助。

以往,论文的作者们为发展我国的核地球物理或放射性地球物理事业做出了许多贡献,希望在这本论文集中可以得到部分反映。可以说,从理论深度、技术高度、应用广度上来衡量,这些成果也都有一定的代表意义。至少,它能显示出我国核地球物理发展的一个过程或一个侧面。虽然有些同志由于工作需要,他们现在从事的工作与核地球物理有些差异,甚至相距甚远,但他们有过的努力与贡献,在核地球物理学科的发展中无疑也应镌刻下印迹的。

回忆美好的过去,展望未来的发展一定能激发起我们的无穷力量!

谨此为序,以志纪念。

---

编者

2001年6月

于成都理工大学

# 目 录

## 【基础理论】

- 地面 $\gamma$ 能谱测量中连续测量的理论基础和实验结果 ..... 贾文懿,葛君伟(1)
- 理想条件下氡及其子体运移规律研究  
..... 贾文懿,方 方,周蓉生,马英杰,邱元德,侯新生,吴允平,祖秀兰,王小琴(4)
- 氡及其子体向上运移的内因与团簇现象  
..... 贾文懿,方 方,周蓉生,马英杰,邱元德,侯新生,吴允平,祖秀兰,王小琴(9)
- 氡释放的实验研究与机理探讨 ..... 贾文懿,方 方,周蓉生,马英杰,乐仁昌,王小琴(15)
- 不同介质中氡运移的异常现象与 $\alpha$ 衰变  
..... 贾文懿,方 方,周蓉生,马英杰,乐仁昌,王小琴(22)
- 氡及其子体运移规律与机理的实验研究 ..... 刘鸿福,贾文懿(28)
- 氡及其子体的释放和运移规律及机理探讨 ..... 乐仁昌,贾文懿(34)

## 【仪器设备(含软件及硬件)】

- 野外用便携式半导体定标器 ..... 贾文懿(39)
- 袖珍计算机放射性总量测量系统 ..... 贾文懿,苗 放(46)
- 便携式常压空气脉冲电离室 $\alpha$ 辐射仪的研制 ..... 贾文懿,许必文,苗 放,方 方(51)
- 地面放射性测量工作站的建立与应用 ..... 苗 放,贾文懿(56)
- 微机化地面 $\gamma$ 能谱仪及其初步应用 ..... 贾文懿,唐 红(60)
- CD-4 微机化 X 射线荧光仪研制 ..... 毛本将,周蓉生,贾文懿,苗 放,唐 红(65)
- 便携式 X 射线荧光仪稳谱技术 ..... 毛本将,周蓉生,贾文懿(72)
- 轻便型微机化多道 $\gamma$ 能谱测井仪的研制 ..... 魏 彪,贾文懿(75)
- X 射线激发的光释光测年技术实验研究 ..... 贾文懿,魏 彪(83)
- 轻便型 X 射线荧光仪测量系统基础研究  
..... 李国栋,贾文懿,周蓉生,唐 红,方 方,马英杰(87)
- 轻便型 X 荧光仪多道脉冲幅度分析器的研制 ..... 杨兴繁,贾文懿,周蓉生(95)
- 基于微机打印接口的多道分析系统的研制 ..... 周建斌,方 方,贾文懿(100)
- 便携式能量色散 X 荧光分析仪的研制 ..... 吴允平,贾文懿,周蓉生,方 方,乐仁昌(105)
- 现场 X 荧光全谱测量仪 ..... 马英杰,贾文懿,周蓉生,方 方,侯新生(110)
- 野外地面伽玛射线全谱测量研究 ..... 方 方,贾文懿(114)
- 微机化便携式 $\gamma$ 全谱仪应用软件的几个关键问题讨论  
..... 吴允平,贾文懿,方 方,周蓉生,乐仁昌(118)

电子束辐照烟气脱硫脱硝工业化试验装置

- ..... 毛本将,王保健,姜一鸣,彭杰,丁伯南(123)
- 高工作比、热阴极  $4 + \frac{1}{2}$  腔微波电子枪研究 ..... 杨兴繁(126)
- OOP 技术在  $\gamma$  全谱仪软件设计中的应用 ..... 王小琴,贾文懿,方方,吴允平(133)

### 【方法及应用】

- 静电  $\alpha$  卡法及其应用 ..... 贾文懿,方方,唐红,邹力,葛君伟(136)
- 测定  $\gamma$  辐射仪自然底数的方法 ..... 贾文懿,方方,唐红,邹力(146)
- 氦气测量及其在寻找基岩地下水、地热和工程地质中的应用  
..... 贾文懿,唐红,葛君伟,方方(154)
- 电阻率测量中多电极系统数据集的完备性研究 ..... 许必文,马克·诺尔(162)
- 寻找油气藏的放射性方法技术及应用  
..... 葛君伟,贾文懿,聂勋碧,方方,唐红,苗放,周蓉生(171)
- 地热田氦的特征与  $\alpha$  测量方法及其效果 ..... 贾文懿,唐红,方方,葛君伟,邹力(179)
- 低能自然  $\gamma$  能谱测量的初步研究 ..... 唐红,贾文懿(198)
- 中子活化分析在水文地质研究中的应用 ..... 侯新生(205)
- 天然  $\gamma$ - $\gamma$  能谱测量的理论及其初步应用 ..... 贾文懿,魏彪,唐红(210)
- 地面伽玛能谱测量在我国地质填图中的初步应用  
..... 贾文懿,魏彪,唐红,苗放,周蓉生(216)
- X-X 方法 ..... 白春明,周蓉生,贾文懿(220)
- 伽玛能谱测量在侵入体岩石谱系单位填图中的应用  
..... 邱元德,周蓉生,侯新生,贾文懿(226)
- 航空伽玛能谱测量在岩性填图中的应用研究——以新疆康古尔塔格沙漠和  
戈壁地区岩性填图为例 ..... 吴其埜,张天阁,周伟(231)
- 雨水的  $\gamma$  辐射及其环境意义 ..... 乐仁昌(237)
- 一种新的死时间的计算方法及其实现 ..... 乐仁昌,贾文懿,吴允平,方方,王仁波(244)
- 氦的多参数测量在地质填图中寻找蓄水构造的应用 ..... 吴其埜,贾文懿,方方(247)

### 【综述及其他】

- 放射性勘探的科技进展 ..... 贾文懿(253)
- 放射性勘探的现状与展望 ..... 贾文懿(258)
- 核成像技术(CT)在地球科学中的应用及展望 ..... 魏彪(263)
- 电子束辐照烟气脱硫脱硝技术的历史和现状 ..... 毛本将(270)
- 数据仓库技术在本地网综合网管系统中的应用 ..... 唐红,张世璐(276)

# 地面 $\gamma$ 能谱测量中连续测量的理论 基础和实验结果

贾文懿 葛君伟

## 摘 要

理论计算和实验结果表明,在步行连续测量与定点测量之间,相对误差小于 8%,但前者提高工效 40% 以上,能明显反映岩性变化特征,可达到 1:5 万地质填图等目的。

在物探和化探方法中,地面  $\gamma$  能谱测量过去主要用于大比例尺异常检查,采用的是定点测量方式<sup>[1]</sup>。理论分析表明,如果将其应用于 1:5 万地质填图,这种测量方式取样代表性差,工效较低,不能满足地质工作的要求。为了解决这一问题,充分发挥地面  $\gamma$  能谱测量的作用,本文提出了步行连续测量方式。

步行连续测量就是将探测器提在手上或背在身上,沿测线以一定速度边走边测的工作方式。

## 1 步行连续测量的理论基础

对于能量为  $E$  的  $\gamma$  射线,假设探测器测得的计数率为  $N$ ,则<sup>[2]</sup>

$$N = \frac{\lambda n A_D}{4\pi} \iiint_{V} \frac{1}{r^2} e^{-\mu_r \rho_r \gamma_r - \mu_a \rho_a \gamma_a} dV. \quad (1)$$

式中, $V$  为被测对象体积; $n$  为单位体积中的放射性核素; $\lambda$  为衰变常数; $A_D$  为探测器的有效探测面积; $\mu_r$ 、 $\mu_a$  分别为被测物体和空气的质量吸收系数; $\rho_r$ 、 $\rho_a$  分别为它们的密度; $\gamma_r$ 、 $\gamma_a$  为  $\gamma$  射线在被测物体和空气中穿过的距离, $\gamma = \gamma_r + \gamma_a$ 。

假设探测器位于地面上,当地表面积无限大时,计数率为 1。当地表面积有限时,根据级数展开理论,可从(1)式获得相对计数率为

$$N_0 = 1 - \frac{\beta}{\alpha} \frac{e^{-\alpha} + \alpha(\ln\alpha + \gamma - \frac{\alpha}{1 \times 1!} + \frac{\alpha^2}{2 \times 2!} - \frac{\alpha^3}{3 \times 3!} + \dots)}{e^{-\beta} + \beta(\ln\beta + \gamma - \frac{\beta}{1 \times 1!} + \frac{\beta^2}{2 \times 2!} - \frac{\beta^3}{3 \times 3!} + \dots)}. \quad (2)$$

其中, $\alpha = \mu_a \rho_a \sqrt{h^2 + R^2}$ ,  $\beta = \mu_a \rho_a h$ ,  $h$  为探测器高度,  $R$  为表面半径,尤拉常数  $\gamma = 0.5772157\dots$

因此,相对计数率  $N_0$  主要取决于  $h$  与  $R$  两个因素。在  $h$  一定时,随  $R$  增大,  $N_0$  增高。当  $N_0$  为 0.9 时,所对应的  $R$  称为有效取样半径,其面积则称为有效取样面积。

表 1 给出了铀(1.76MeV)、钍(2.62MeV)、钾(1.46MeV)在不同的高度上的有效取样

半径。从表中可见,随  $h$  增高,  $R$  相应增大。因此,在地面  $\gamma$  能谱测量中,通过提高探测器高度,可以获得更大的有效取样范围。

表 1 探测器高度和有效取样半径的关系

$h(\text{cm})$		5	10	20	30	50	100	200	400
$R$ (cm)	钍	49.1	97	190	281	456	865	1592	2830
	铀	48.9	96.7	189	278	450	846	1542	2723
	钾	48.9	96.3	188	277	447	837	1518	2659

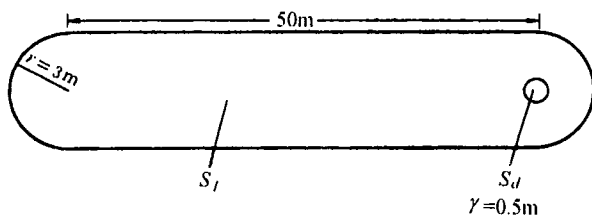


图 1 1:5 万地质工作中步行连续测量和定点测量取样范围示意图

$S_c$  连续测量作用面积;  $S_d$  定点测量作用面积;

$$S_c : S_d = 400 : 1$$

0.5m。若采用连续测量方式,点距 50m,  $h$  为 30cm,则有效取样面积约提高 400 倍,是一个两端为半圆形的长条形面积。因此,连续测量具有更好的取样代表性,更符合地质工作的要求。

## 2 探测器高度变化造成的测量误差问题

在步行连续测量中,探测器的高度变化可能会对测量结果产生一定的影响。

假设地表面面积为无限大,探测器高度为 0 时测得的计数率为 1,则当高度为  $h$  时,由(1)式可导出相对计数率  $N_h$  为

$$N_h = e^{-\beta} + \beta(\ln\beta + \gamma - \frac{\beta}{1 \times 1!} + \frac{\beta^2}{2 \times 2!} - \frac{\beta^3}{3 \times 3!} + \dots) \quad (3)$$

表 2 是铀、钍、钾在不同高度上  $N_h$  的近似计算值。在步行连续测量中,高度误差一般不超过 100cm。因此,当  $h$  从 0 增大到 100cm 时,钍、铀、钾的计数率最多下降了 3.6%,在测量精度(假设为 10%\*)允许的范围內。

表 2 铀、钍、钾的  $\gamma$  射线在不同高度上的相对计数率

$h(\text{cm})$	0	10	20	30	50	100	200	400
钍	1	0.996	0.993	0.990	0.984	0.972	0.950	0.914
铀	1	0.995	0.991	0.988	0.981	0.966	0.941	0.898
钾	1	0.995	0.991	0.987	0.978	0.964	0.936	0.891

在空旷地带(半径大于 50m)的不同高度上,实测了各道计数。将探测器从地面提高到 100cm,铀道(1.66~1.86MeV)、钍道(2.42~2.82MeV)和钾道(1.36~1.56MeV)的相对误差均小于 8%。

\* 核工业部地质局,铀矿找矿工作规范(试行),15~16,1986。

### 3 野外试验结果

使用自行研制的微机化地面四道 $\gamma$ 能谱仪,在野外一些剖面上对步行连续测量和定点测量结果进行了对比。图2是在山东某区域变质岩中的1:5万地质填图试验剖面,点距100m,测量时间5min。从试验中获得了以下一些初步认识:

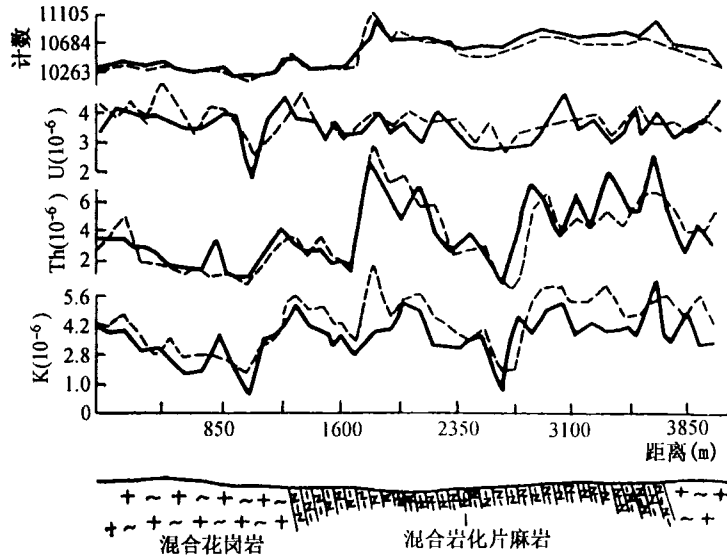


图2 山东某地步行连续测量和定点测量对比剖面

—— 定点测量; ····· 步行连续测量。

(1) 根据整条测线的计算结果,在步行连续测量和定点测量之间,各参数的平均相对误差较小,均低于8%。

(2) 步行连续测量曲线可以明显反映岩性变化特征,达到了地质填图的目的。

(3) 与定点测量相比,步行连续测量曲线变化较平缓。这说明增大取样面积后,减小了测量几何条件、放射性元素分布不均匀等因素影响,提高了取样代表性。

(4) 步行连续测量速度快,成本低,比定点测量提高工效40%以上,效益更好。

在野外工作中,曾得到唐红同志的大力帮助。另外,还得到本院八七届大学毕业生和地质矿产部第一综合物探大队的帮助,在此一并致谢。

#### 参 考 文 献

- 1 北京第三研究所. 野外 $\gamma$ 能谱测量. 原子能出版社, 1977, 168~169.
- 2 William Marsh Rice University. The natural radiation environment. The University of Chicago Press, 1964, 747~756.

# 理想条件下氡及其子体运移规律研究\*

贾文懿 方方 周蓉生 马英杰 邱元德  
侯新生 吴允平 祖秀兰 王小琴

## 摘 要

从实验入手,应用高灵敏度、高精度、静态、易于重复观测的 CD-1 $\alpha$  杯测氡方法,在室内较理想条件下,研究了氡及其子体自身固有的运移规律。主要发现是:氡及其子体比重很大;但在理想空气中,它向上运移能力与向下运移能力相似,甚至上升能力超过向下运移的能力,而远远大于横向运移能力。其规律是,氡及其子体向上运移的贡献大于 45%,向下运移不及 45%,扩散作用小于 10%。

近年来,人们对氡的研究兴趣倍增,一是其应用领域广泛<sup>[1~9]</sup>,更重要的是,它对公众健康的危害受到密切关注<sup>[10~13]</sup>,促使人们从不同的角度加以研究。此中,氡及其子体的运移规律研究,是颇感兴趣的基础问题之一。

本研究是在实验室理想条件(无对流、无压力差、无温差、无电位差等的封闭环境)下进行的,获得了氡及其子体运移规律的新发现和认识:

(1)氡及其子体的纵向运移能力很强,大于 90%;横向扩散作用小于 10%。

(2)氡及其子体比重均很大,但其上升能力与下沉能力相当,甚至上升能力超过下沉能力。前者大于 45%,后者不及 45%。

## 1 实验技术、仪器设备和模型装置

众所周知,氡及其子体的运移受许多因素影响,在此情况下进行理论计算、计算机模拟或现场模拟研究,都难以认识其“自身”的运移规律。

为了排除外界因素的影响,在一定时间内得到较理想的条件,纯化或简化研究对象,以便系统观测氡及其子体的运移规律。根据其运移的独特性和复杂性,安排了室内较理想的实验,经过多套实验反复对比,逐步发现了有关规律。

据此,本研究采用了图 1 所示的模型装置,用  $\alpha$  杯(卡)法<sup>[7,14,15]</sup>进行观测。 $\alpha$  杯(卡)法的特点是:灵敏度高,本底低,观测精度高;测量方式灵活,既可长时间累积测量,也能短时间观测;能在静态条件下收集信息,不扰动氡及其子体的分布状态;操作方便,可及时给出数据,易于重复观测,成本低廉等。 $\alpha$  杯(卡)法能完成其他方法难以进行的实验工作。

需要说明的是,采用低本底的  $\alpha$  测量,虽能容易地发现放射性异常,但欲可靠地显示出这种差异,其相应计数还必须达到一定数值。设若异常值为  $N_{\max}$ ,背景值为  $N_{\min}$ ,  $N_{\max}/N_{\min} = R$ 。由于放射性统计涨落规律,两者出现的最大范围分别为:

\* 国家自然科学基金(批准号:49674238,类别:A;D0409)和国家及地质矿产部科技攻关项目。

注:本文原载《成都理工学院学报》1999年1月第26卷第1期。

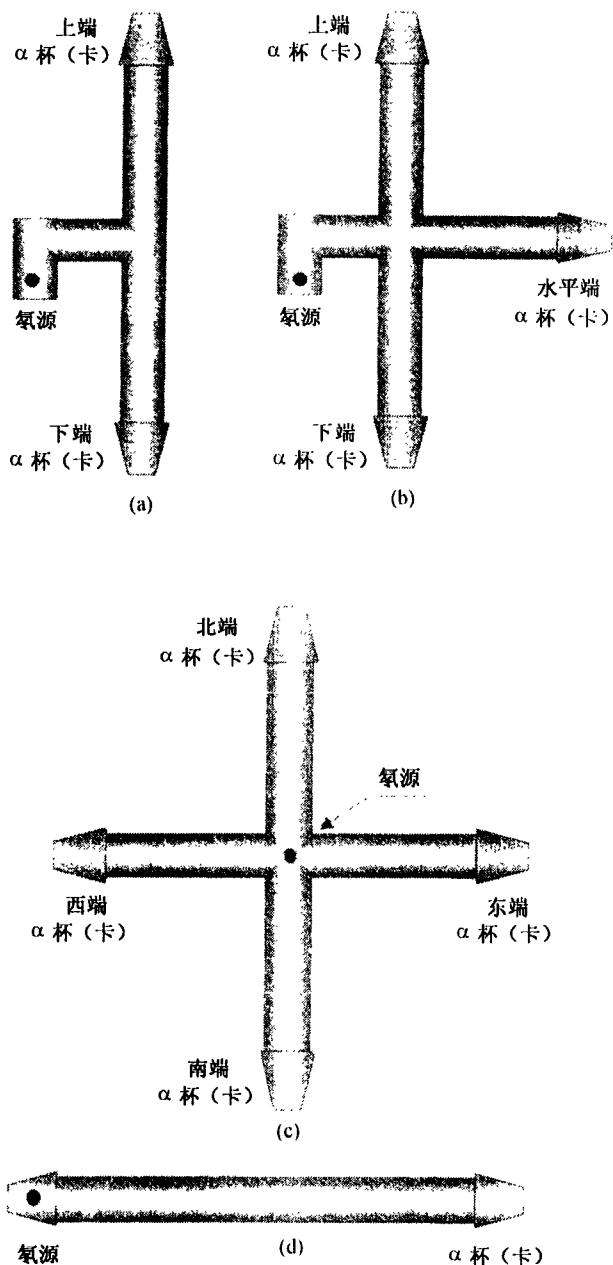


图1 实验模型装置示意图

同  $\alpha$  杯收集氦及其子体的能力也是一致的。

为了减小气候、温度等外部因素的影响，实验装置安装在室内，选择在城市雨量充沛、天气潮湿、日温差变化小的季节工作，以利消除影响。

实验模型有多种规格、多套装置，可以进行氦及其子体的横向、纵向、向上、向下运移的系统观测和对比实验。它们由 PVC 塑料管及铁管（直径为 4~8cm）、氦源和  $\alpha$  杯（卡）等组

$$N_{\max} \pm 3 \sqrt{N_{\max}} = N_{\max} \pm 3\sigma_{\max}$$

$$N_{\min} \pm 3 \sqrt{N_{\min}} = N_{\min} \pm 3\sigma_{\min}$$

为显现两者的差异，应有：

$$N_{\max} - 3\sigma_{\max} > N_{\min} + 3\sigma_{\min}$$

为可靠起见，应保证：

$$N_{\max} - 4\sigma_{\max} > N_{\min} + 4\sigma_{\min}$$

$$\text{即：}(M_{\min} + 4\sigma_{\min}) / (N_{\max} - 4\sigma_{\max}) < 1$$

将不等式两边各乘以：

$$(M_{\max} - 4\sigma_{\max}) / (N_{\min} - 4\sigma_{\min}) \approx R$$

则有：

$$(M_{\min} + 4\sigma_{\min}) / (N_{\min} - 4\sigma_{\min}) < R$$

关系式说明，要发现比值为 R 的异常，背景值的最小计数  $N_{\min}$  应满足上述条件才具有一定意义。异常幅度愈小，即  $N_{\max}$  与  $N_{\min}$  相差越少，欲可靠探测出该异常所需之总计数目应予增大。表 1 是一批理论估算值，可见，要发现 10%~20% 的异常，计数值应很高。

表 1 异常幅度与放射性测量原始数据的关系

异常值与背景值之比 R (峰值/背景值)	异常幅度的增量/%	最小背景值 $N_{\min}$ (计数)	最大异常值 $N_{\max}$ (计数)
10.0	900	24	240
5.0	400	36	180
3.0	200	64	192
2.0	100	144	288
1.1	10	7056	7762

为此，实验中采用了灵敏的 CD-1 $\alpha$  杯仪<sup>[14,15]</sup>，它由空气脉冲电离室及有关电路组成，能方便有效地测量  $\alpha$  杯（卡）收集到的氦子体放出的  $\alpha$  射线，可获得高精度的测量结果，满足有关要求。实验中，仪器的性能良好，不

成。根据需要,装置可加长或缩短;可以竖立,也可以水平放置。实验时,装置衔接处均用塑胶带密封,以免空气对流;并采用多套装置平行反复观测,以便减小误差。其内介质可为空气、砂石、砾石、粘土或水等。氡源是铀矿石或其他物质。氡源或其他样品可置于模型装置的中央或某一端部,同时还进行了三维立体模型实验。

## 2 氡及其子体的运移实验结果

下面是在室内实验装置里进行的部分研究结果<sup>[16~19]</sup>:

(1)装置水平放置,观测氡及其子体横向,即纯扩散作用的运移规律。部分实验结果见表2,可见扩散作用在不同水平方向是均匀的。

表2 氡及其子体在理想状态下横向运移实验结果

	16次观测的累计结果	
	$\alpha$ 杯计数	相对误差%
东端计数 $N_E$	50960	+0.6
西端计数 $N_W$	51197	+1.0
南端计数 $N_S$	50576	-0.2
北端计数 $N_N$	49938	-1.45
均值	50672	

说明:1. 按图1(c)装置进行的实验;2. 塑料管各长1m,水平放置,取向为东、西、南、北;3. 介质为空气

(2)装置内放有不同介质,观测其运移情况,部分结果见表3。可见其向上运移的速率大于横向运移速率,比值约为5:1,常有规律性变化。距离为12m时,比值增为20:1。

(3)装置竖立,研究氡及其子体向上、向下及横向运移规律。部分结果见表4。为了讨论的方便,假定氡及其子体有三个运移方向,即横向、向下、向上。

若设: $N_H, N_U, N_D$ 分别为实验装置横向末端、上端、下端测得的氡及其子体产生的 $\alpha$ 射线计数; $N_Z$ 为实验装置上、下、横向测得的氡及其子体产生的 $\alpha$ 射线计数之和; $N'_H$ 为实验装置横向末端测得的氡及其子体横向(因扩散)运移产生的 $\alpha$ 射线计数; $N'_U$ 为实验装置上端测得的氡及其子体纯向上(因上浮)产生的 $\alpha$ 射线计数; $N'_D$ 为实验装置下端测得的氡及其子体纯向下(因重力)产生的 $\alpha$ 射线计数; $P_H$ 为氡及其子体横向运移产生的计数所占的概率; $P_U$ 为氡及其子体向上运移产生的计数所占的概率; $P_D$ 为氡及其子体向下运移产生的计数所占的概率; $P'_H$ 为氡及其子体横向扩散运移产生的计数所占的概率; $P'_D$ 为氡及其子体纯下沉运移产生的计数所占的概率。

表3 氡及其子体在不同介质中的运移情况

铁管型号	1	2	3	4	5	6
管内介质	砂	水	砾石	空气	空气	空气
放置状态	竖立	竖立	竖立	竖立	竖立	水平
装置上端氡及其子体变化情况	变化幅度相对较小	变化幅度大,有规律	变化幅度大,规律明显	变化幅度大,规律明显	变化幅度大,规律明显	稳定后,变化小
运移速率/ $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$	~10	~30	~30	~50	~50	~10

说明:采用图1(d)的装置,铁管长约7m

解方程可得:

$$P_H = N_H/N_Z = N_H/(N_H + N_U + N_D)$$

$$P_U = N_U/N_Z = N_U/(N_H + N_U + N_D)$$

$$P_D = N_D/N_Z = N_D/(N_H + N_U + N_D)$$

$$P'_H = N'_H/N'_Z = N_H(N_H + N_U + N_D)$$

$$P'_U = N'_U/N'_Z = (N_U - N_H)/(N_H + N_U + N_D)$$

$$P'_D = N'_D/N'_Z = (N_D - N_H)/(N_H + N_U + N_D)$$

表 4 自然和干燥状态下,氡及其子体向上、向下、横向运移对比实验结果

	9 次观测累计值	
	自然状态	干燥状态
向上运移时 $\alpha$ 杯计数 $N_U$	19931	15551
向下运移时 $\alpha$ 杯计数 $N_D$	19526	10496
横向运移时 $\alpha$ 杯计数 $N_H$	3801	1905
$N_U/N_D$	1.03	1.66
$N_U/N_H$	6.14	10.41
$N_D/N_H$	6.17	6.44
$(N_U+N_D)/N_H$	12.31	16.85

表 5 理想状态下氡及其子体向上、向下、横向运移的概率

	自然状态	干燥状态
横向运移概率 $P_H/\%$	9	7
扩散运移概率 $P'_H/\%$	9	7
向下运移概率 $P_D/\%$	45	37
下沉运移概率 $P'_D/\%$	36	30
向上运移概率 $P_U/\%$	46	56
上浮运移概率 $P'_U/\%$	37	49
纵向运移概率 $(P_D+P_U)/\%$	91	93

说明:1. 实验为 2 个图 1(b)的装置,紧靠、竖直放置在一起;2. 塑料管,各长 2m;3. 介质为空气

根据表 4 数据,经计算得表 5 之结果,可见:

(1)氡及其子体纵向运移概率比横向大得多;扩散作用贡献很小,不及 10%。

(2)氡及其子体的比重远大于空气,但它们向上运移概率明显大于横向扩散概率而与向下运移概率相当,甚至超过。实验处于室内密封状态,无对流,这表明氡及其子体“自身”具有很强的向上运移能力。

### 3 结论

实验研究表明:

(1)采用  $\alpha$  杯(卡)法,利用多套实验装置,对氡及其子体运移进行实验研究,能够发现一些新的现象,并揭示其运移规律和内在机制。

(2)实验条件较理想,无对流等作用存在时,氡及其子体凭借“自身”机制,在空气中运移的规律是:扩散作用小,不及 10%;地球引力等导致的下沉小于 45%;它们形成的团簇向上运移的贡献大于 45%,并随运移距离及空气干燥程度增加而增加。

本研究是在承担国家及部委多项科研任务中,历时十余年获得的初步成果。先后参加本职工作的还有:葛君伟、吴其反、唐红、许必文、苗放、李国栋、林怀威、刘鸿福、王广忠、段鸿杰、郑世雄、黄景清、陈冒固、高少卿等同志,在此特向他们一并致谢。

研究工作中,还要感谢与金景福、王德荫、汪云亮、许祖润、赵庆昌、吴茂良等教授以及圣彼得堡大学 П. А. Ваганов 教授,加州大学柏克利分校 W. W. Nazaroff 教授等所进行的有益讨论。

### 参 考 文 献

1 Новиков Г Ф. Радиометрическая разведка. Ленинград: Издательство Недр, 1989, 277.  
 2 Gingrich J E. Radon as a geochemical exploration tool. Journal of Geochemical Exploration, 1984, 21: 15.

- 3 Durance E M. Radioactivity in Geology. Ellis Horwood Limited, 1986, 209.
- 4 崔林沛. 对美国物探的几点认识. 国外地质勘探技术, 1989, (7):43.
- 5 贾文懿. 放射性勘探的科技进展. 物探与化探, 1989, 13(5):381.
- 6 汪成民等. 断层气测量在地震学中的应用. 北京:地震出版社, 1991.
- 7 贾文懿, 唐红, 方方, 苗放, 葛君伟. 放射性勘查工作手册. 北京:地质出版社, 1993.
- 8 周蓉生, 瓦冈诺夫 П А. 核方法原理及应用. 北京:地质出版社, 1994, 53:138.
- 9 吴惠山, 林玉飞, 白云生. 氡测量方法及应用. 北京:原子能出版社, 1995, 142.
- 10 EPA discovers radon. Nature, 1986, 332:28.
- 11 Oladt M, Sinnaeve J. Radon research programmer of the Commission of the European Communities. Proceeding of a Conference on Radon 2000, 1995.
- 12 赵亚民等. 环境中氡来源及危害. 北京:中国环境科学出版社, 1990.
- 13 Reimer G M. The occurrence and transport of radon in the natural environment. Geophysical Research Letters, 1990, 17(6):779.
- 14 贾文懿, 许必文, 苗放, 方方. 便携式常压空气脉冲电离室  $\alpha$  辐射仪的研制. 地球物理学报, 1990, 33(3):356.
- 15 贾文懿, 许必文. 壤中氡及其子体探测装置及工作方法. 中国发明专利, 1310. 1988.
- 16 吴其反. 利用静电  $\alpha$  卡法测定  $^{222}\text{Rn} + ^{220}\text{Rn}, ^{222}\text{Rn}, ^{220}\text{Rn}, ^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$  子体的原理及其应用[硕士学位论文]. 成都:成都理工学院三系, 1988.
- 17 葛君伟. 放射性方法找寻油气藏的理论、方法及应用[博士学位论文]. 成都:成都理工学院三系, 1991.
- 18 刘鸿福. 氡及其子体运移的实验研究与机理探讨[博士学位论文]. 成都:成都理工学院三系, 1997.
- 19 Jia Wenyi, Liu Hongfu, Wang Guanzhong, Fang Fang *et al.* Radon migration experiments and mechanism study. In: Proceedings of ISEEG'97, International Symposium on Engineering and Environmental Geophysics. Chengdu; Sichuan Publishing House of Science and Technology, 1997, 350.

# 氡及其子体向上运移的内因与团簇现象\*

贾文懿 方 方 周蓉生 马英杰 邱元德  
侯新生 吴允平 祖秀兰 王小琴

## 摘 要

氡及其子体密度很大,但在理想空气中具有明显向上运移能力,这不是用外因可以阐述的现象,而有其固有的内因。其机理是:氡及其子体和母体多为 $\alpha$ 辐射体,它们放出的 $\alpha$ 粒子减速后成为 ${}^4\text{He}$ ,能与氡及其子体和母体形成复合团簇。氡很轻,当其复合团簇浮力大于重力时,团簇便会自行上升,成为氡及其子体向上运移的内因。据此,不能只以氡的半衰期最长不过3.825d来计算氡及其子体的运移距离,而应从团簇的总效应来考虑其效果。而且氡及其子体与氦能形成复合团簇的认识,对其他重金属微粒组成的地气和气溶胶运移研究是有意义的,它们有相似属性。

大家知道,氡及其子体都比空气重得多,且均为放射性元素;而氡的半衰期最长只有3.825d,但人们发现在地层中其运移距离远远超过扩散作用给出的数米范围<sup>[1]</sup>。为此,不同学者在理论上提出了众多见解,如:对流作用、渗流作用、泵吸作用、地热作用、地应力作用、接力传递作用等<sup>[2~5]</sup>来阐述有关问题。与此同时,不同学者还借助现场模拟、计算机模拟、实验室模拟<sup>[6~16]</sup>进行深入研究,发现了一些重要的新现象,获得了新的认识。但由于种种原因,研究多从外部因素考虑问题,很少从内因解决其疑难。

本研究从氡及其子体固有的内因上探索其向上运移机理,有以下新的认识:

(1)氡及其子体远较空气为重,之所以有很强的向上运移能力,是由于它们衰变时放出的 $\alpha$ 粒子成为 ${}^4\text{He}$ 核,能与氡及其子体或母体形成团簇。 ${}^4\text{He}$ 很轻,当团簇密度比空气小时,能自行上浮。这是氡及其子体“自身”能向上运移的内在原因。

(2)氡的运移距离应根据其子体和母体按团簇运移后的总效应来衡量。即氡及其子体运移时,可视为长寿放射性元素,故其在地壳中上升距离可远远超过数十米至数百米。

(3)氡及其子体主要来自地下,它是一种地气,广泛存在于自然界中。因此研究氡及其子体,对研究地气等问题也有裨益。其他种类的地气运移规律也可用上述观点加以论述。

## 1 氡及其子体向上运移的机理初探

在我们的实验中发现<sup>[6,14,15,16,20]</sup>,氡及其子体密度虽大,但其“自身”确实具有向上运移的能力。对其内部机制初步认识如下:

我们知道,氡及其子体和母体,多为 $\alpha$ 衰变体,会辐射出 $\alpha$ 粒子。 $\alpha$ 粒子减速后,将成为带有两个正电荷的 ${}^4\text{He}$ 核。正2价的 ${}^4\text{He}$ 核周围将存在电场。显然,它能使原子序数较大、外层电子多的氡及其子体和母体:Po, Bi, Pb, Tl; U, Th, Ra等中性原子极化,即出现电子云分布

\* 国家自然科学基金(批准号:49674238,类别:A:D0409)和国家及地质矿产部攻关项目。

注:本文原载《成都理工学院学报》1999年4月第26卷第2期。

不均匀现象。从而在电场作用下， $^4\text{He}$  核和氡及其子体和母体之间会产生强相互作用力。即使是中性的 $^4\text{He}$  原子，由于它们之间的范德华(van der Waals)力，也能发生弱相互作用。这样， $^4\text{He}$  核及 $^4\text{He}$ ，借助与氡及其子体和母体之间的强相互作用力和弱相互作用力，将能结合在一起形成直径为纳米至微米级的团簇。成为： $\text{He-Rn}$ ， $\text{He-Po}$ ，……，甚至  $\text{He-Ra}$ ， $\text{He-Th}$ ， $\text{He-U}$  或复合团簇。由于 $^4\text{He}$  很轻，当这一团簇的重量小于空气对它的浮力时，便导致团簇自行上升。因此，氡及其子体密度虽大，却具有“自身”向上运移之能力。图 1 是 $^4\text{He}$  与 $^{222}\text{Rn}$  形成团簇的示意图。

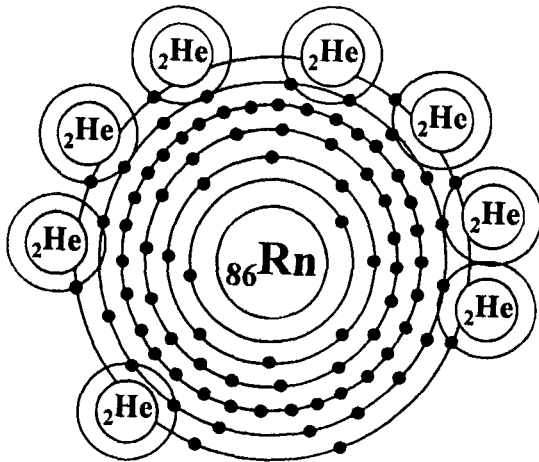


图 1  $^4\text{He}$  核与 Rn 形成团簇的示意图

金属原子中通常有一个或多个较松散的外层电子，其第一电离能都很低；因此，Po, Bi, Pb, Tl, U, Th, Ra 等金属均易于极化或授予电子，与 He 核结合成团簇。

需说明的是，文献[17]虽然没有讨论 Rn 的情况；但详细研究了 He, Ne, Ar, Kr, Xe 的物理化学性质，给出了它们的一些有关物理化学数据。由 He 至 Xe：极化率相对值依次为 0.201, 0.390, 1.62, 2.46, 3.09；范德华(van der Waals)常数依次为 0.034, 0.211, 1.345, 2.318, 4.194 等等。Rn 和它们同属零族元素，但 Rn 原子序数最大，由元素周期律不难推断出 Rn 的情况，即 Rn 的极化率相对值将为最大，不会小于 4；其范德华

(van der Waals)常数也最大，不会小于 4.2。这是有利于形成 He-Rn 团簇的。

应用近年团簇研究成果，前述现象可以得到较好的阐释。

$^4\text{He}$  为玻色子，近期研究证实<sup>[18,19]</sup>：该惰性气体组成的团簇，其间作用力较弱，主要借助范德华(van der Waals)力维持，团簇可小可大，它能由两个 $^4\text{He}$  构成，也可多至  $10^6$  个 $^4\text{He}$ ，并且 He 团簇极易掺入不同的原子和分子，包括其他惰性气体等等，即由惰性气体、金属等等多种组分相互作用，构成复合团簇。

据此，Rn 经  $\alpha$  衰变成为 Po, Bi, Pb 之后，将放出多个  $\alpha$  粒子，即多个 $^4\text{He}$ 。以 $^{222}\text{Rn}$  为例，会出现 4 次  $\alpha$  衰变，如图 2 所示。最后变成稳定的 $^{206}\text{Pb}$  而终止。 $\alpha$  衰变时，由于反冲现象的存在，能使介质中的一些物质从表面上发射出来，形成团簇。放射出的  $\alpha$  粒子与介质相互作用时，不仅使其自身减速，还会轰击介质，将有中性的和电离的原子从介质表面发射出来，出现溅射现象，形成团簇。从而在 Rn 的周围出现：Po, Bi, Pb, Tl 甚至 U, Th, Ra 等等金属原子微粒或团簇，特别是 $^4\text{He}$ 。

这样，各金属微粒与惰性气体，尤其是与 $^4\text{He}$  相互碰撞、相互作用而凝聚成团簇，且是成份不同，多种组分构成的复合团簇，并是气态与固态并存。

由于团簇具有极大的比表面积，且随团簇尺寸减小而增大，团簇的表面能增高，能使其吸附作用增强，容易吸附周围的粒子，即 $^4\text{He}$  团簇能较好地与其  $\alpha$  衰变体的母体和子体凝聚在一起，并使团簇长大。

$^4\text{He}$  很轻，当 $^4\text{He}$  团簇和 Rn, Po, Bi, Pb, 甚至 U, Th, Ra 等等凝聚成复合团簇后，若其浮

力大于重量时,它们自身即有向上运移的能力,这是它们产生向上运移的内因。

## 2 团簇现象验证

为了验证上述机理,进行了验证实验。具体做法是:在实验装置中增加<sup>4</sup>He核或使其干燥,以增加团簇的形成;反之,可在实验装置中增加电子或维持其潮湿,用以减少团簇之形成。据此,获得表1所示数据,经计算可得表2结果。实验数据表明,不同状态下,氡及其子体的运移情况是:(1)在成都潮湿气候的状态下: $P_U : P_D \approx 50\% : 50\%$ 。(2)加有少量电子(<sup>90</sup>Sr  $\beta$ 源)时: $P_U : P_D \approx 48\% : 52\%$ 。(3)加有少量He核(<sup>241</sup>Am  $\alpha$ 源分散放置)时: $P_U : P_D \approx 52\% : 48\%$ 。(4)加有少量He气(<sup>241</sup>Am  $\alpha$ 源集中置于底部)时: $P_U : P_D \approx 50\% : 50\%$ 。(5)干燥状态下: $P_U : P_D \approx 54\% : 46\%$ 。(6)加有干燥剂和He核(<sup>241</sup>Am  $\alpha$ 源分散放置)时: $P_U : P_D \approx 58\% : 42\%$ 。

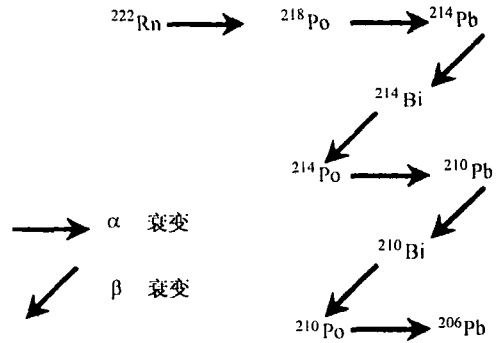


图2 <sup>222</sup>Rn和它的衰变子体

表1 验证氡及其子体团簇运移机理的有关实验数据

	16次观测累计值			另外16次观测累计值		
	$N_U$	$N_D$	$N_U/N_D$	$N_U$	$N_D$	$N_U/N_D$
自然状态	66519	66405	1.00	86348	83294	1.04
加有电子(>10 <sup>4</sup> Bq的 <sup>90</sup> Sr $\beta$ 源)	69169	75988	0.91	63839	70110	0.91
加有 <sup>4</sup> He核(<10 <sup>4</sup> Bq的 <sup>241</sup> Am $\alpha$ 源分散数量)	70073	63808	1.10	52899*	39080*	1.35*
加有He气(<10 <sup>4</sup> Bq的 <sup>241</sup> Am $\alpha$ 源集中置于底部)	62612	63793	0.98			
加有干燥剂	61374	49990	1.23	60446	51698	1.17

说明:(1)实验为5组装置,紧靠,竖直放置在一起。(2)塑料管,各长1m。(3) $N_U$ 为上 $\alpha$ 杯计数, $N_D$ 为下 $\alpha$ 杯计数。(4)带\*号数据的装置中既加有He核又加有干燥剂。

这说明,氡及其子体上浮能力随<sup>4</sup>He核增多及空气干燥而增大。从而表明,当增加<sup>4</sup>He核或环境干燥时,将促进团簇的形成,使氡及其子体向上运移概率增加。反之,增加电子或空气潮湿时,<sup>4</sup>He核与氡及其子体形成团簇概率减小,使氡及其子体向上运移概率下降。从表1和表2的数据可以得出,主要是<sup>4</sup>He核与氡及其子体形成团簇。

因为<sup>4</sup>He核带有两个正电荷,所以宏观上,可视氡及其子体多是带正电的。

上述团簇模型可以阐明氡及其子体“自身”固有向上运移的机制。它也能给出氡的母体U及一些重金属(如W, Sb, Se, Zn等)微粒“自身”向上运移的机制。为此,还研究了它们的运移情况。表3是在前述装置底部放入或取出不同矿石时,在装置顶端收集样品,测得的U, W, Sb, Se, Zn等元素浓度的比值。由于它们的数量极少,需要采用中子活化方法对这些痕量的元素进行分析。很明显,放射性元素和其他一些元素可以从岩矿石里进入空气,向上运移7m以上的距离,使空气中的这些元素的浓度增加数十倍以上。

### 3 研究意义

本研究从实验入手,在尽量排除外因影响下,系统地观测了氦及其子体“自身”的运移规律,研究了其内在运移机制。揭示出氦及其子体“自身”固有的向上运移机理,是氦及其子体和母体所产生的<sup>4</sup>He核与它们形成的团簇所致,又因为<sup>4</sup>He核带有两个正电荷,所以宏观上可视氦及其子体多是带正电的。

表2 验证氦及其子体团簇运移机理的有关统计资料

	向上运移 概率 P <sub>U</sub> /%	向下运移 概率 P <sub>D</sub> /%
自然状态	50	50
加有电子( <sup>90</sup> Sr β源)	48	52
加有 He 核( <sup>241</sup> Am α源分散放)	52	48
加有氦气( <sup>241</sup> Am α源集中置于底部)	50	50
加干燥剂	54	46
加有干燥剂和 He 核( <sup>241</sup> Am α源分散放)	58	42

表3 密封空气模型中有矿石/无矿石时  
地气测量对比表

元 素	U	W	Sb	Se	Zn
有矿石/无矿石	257	99	42	36	44

说明:(1)装置垂直放置,铁管长约7m。(2)有矿石/无矿石为模型中放有矿石和没有矿石的情况下,在顶端收集样品实测值的比值。(3)采用中子活化方法分析这些痕量的元素。

在水中,氦及其子体与<sup>4</sup>He核形成的团簇,可以气泡形式存在,并向上运移。这表明,地气以微气泡形式向上运移是有根据的。不过,氦及其子体不是附着在其他气泡上,而是附着在 He 气泡上向上运移。显然,它还可携带其他地气向上运移。

在空气中,氦及其子体与 He 形成的团簇,“自身”即具有很强的向上运移能力,这可以说明,密度比空气大得多的氦及其子体何以能出现在上千米高空的缘故。

由于地壳内广泛存在着铀、钍等放射性元素,它们的子体氦和后续子体均能辐射出 α 粒子,其减速后,就是<sup>4</sup>He核。如前所述,<sup>4</sup>He核与产生它的“母体”或“子体”,借助其间:(1)强相互作用力。(2)弱相互作用力,即范德华(van der Waals)力构成团簇。其“自身”就可能成为向上运移的气流。若再考虑到地下温差、地下压力差、地下水向上的运动、对流现象的存在等等外部因素,势将形成一股明显向上运移的气流。这就是人们普遍见到的一种现象:地下存在一股向上运移的气流。本文拟从“自身”内因上予以阐释。

值得强调的是,只用氦最长半衰期为 3.825d 来估算氦及其子体运移距离是不合适的。由前述团簇概念可知,氦的母体和子体均参与运移,铀、钍、镭、铅等元素不乏长寿放射性同位素,它们将加入团簇一并向上运移;因此,氦及其子体出现了长距离运移的现象,远远超过用氦的半衰期计算出的距离。

由于氦及其子体在地球上无处不在,是典型的地气,而且也是容易产生、容易收集、容易测量的地气和气溶胶,从氦及其子体入手研究地气和气溶胶的特点是有意义的。团簇现象,对研究其他地气和气溶胶运移是可以借鉴的。

### 4 结论

研究表明:

(1)氦及其子体的密度大于空气,但它们向上运移能力很强。这是因为,它们从产生到衰