

# 地气测量和射气测量的探测机理对比研究<sup>\*</sup>

马志飞, 刘鸿福, 张新军

(太原理工大学矿业工程学院, 山西 太原 030024)

摘要: 通过对地气测量和射气测量原理的对比研究, 分析其异同, 总结地气测量在理论认识和实际工作中存在的问题, 提出借鉴射气测量的理论和实践经验, 促进地气测量方法的发展。

关键词: 地气测量; 射气测量; 氡气

中图分类号: P315.72 文献标识码: A

## 0 引言

自19世纪初人们开始研究放射性勘探技术以来, 射气测量技术得到了长足的发展, 该技术是一种建立在射气作用(含放射性惰性气体)基础上的勘探方法。由于含有镭或其他某些元素的固体物质能向外部自发地或人为地排放放射性气体(即射气作用), 人们便可以通过各种手段检测以达到找矿等目的。通常所研究的射气测量是狭义的概念, 仅指以氡射气作用为基础的氡气测量方法。近年来, 随着对隐伏矿床勘探方法的不断研究, 一种新的勘探方法越来越引起人们的重视, 即地气测量, 它是通过探测运移到地表的各种痕量金属和非金属元素来寻找隐伏矿床或地下隐伏断裂带。由于地气测量和射气测量在探测机理、工作方法等方面有很多相似之处, 因此可以借助射气测量的某些理论对地气测量进行研究, 并可以借鉴其工作方法开展地气测量工作。

## 1 地气测量和射气测量的工作程序对比

虽然地气测量技术还存在很多问题没有解决, 但国内外已经有不少学者从事过野外勘探工作的尝试, 获得了一定的应用效果。射气测量在理论上相对成熟一些, 工作方法较多, 迄今已广泛应用于实际工作中。二者工作程序基本相同, 可简单表示为图1。

测线布置 → 野外采样 → 室内分析 → 反演解释

图1 地气测量和射气测量的工作程序图

对比二者, 其主要区别有两点:

(1) 野外采样方法和装置不同。地气测量的采样方式分为主动累积法(抽气法)和被动累积法(埋置法), 捕集材料有经过特定化学处理后的聚氨酯泡沫、硝酸等, 由于地气测量影响因素较多, 样品重现性差, 常常需要重复采样; 射气测量的方法可以分为瞬时法和累积法两类, 后者发展更为迅速, 常用的有 $\alpha$ 径迹测量、活性炭法、Po-210法、热释光法、 $\alpha$ 卡法、 $\alpha$ 杯法等。

(2) 室内分析不同。地气测量主要是用等离子体质谱法、原子荧光光谱法、中子活化分析法等。射气测量室内分析多是通过测量氡子体衰变的 $\alpha$ 、 $\beta$ 或者 $\gamma$ 射线的照射量率来达到找矿等目的。

## 2 地气测量和射气测量的探测机理对比

### 2.1 地气测量的探测机理

目前对地气中异常物质的存在形式和迁移机理, 认识上还没有达成共识, 国内外存在多种观点。比较著名的几种理论有: 扩散理论、气态迁移理论、“类气相”迁移理论、“纳米效应”理论等。

元素的扩散迁移服从费克扩散定律, 即单位时间内在单位面积所扩散的物质的量与浓度的梯度成比例。按照费克扩散定律, 物质浓度会随着距离的增大而迅速减少, 而且物质是沿中心点向四周扩散。因此, 扩散范围有限, 深部的异常在地表几乎没有反映, 扩散理论已经无法解释深部元素是如何迁移到地表的。

\* 收稿日期: 2007-12-25

作者简介: 马志飞(1984-), 男(汉族), 河南郸城人, 太原理工大学地球探测与信息技术硕士研究生。

有些学者认为地气异常物质是以“分子形式”或“金属气相”存在。Norry认为,金和汞有相似的电子层结构,既然汞可以以蒸气形式存在,金亦可通过共价键单键生成  $Au_2$  气态分子,加入到气相之中<sup>[1]</sup>。因此,一些金属在自然界中可以呈气态分子迁移,只是数量多少而已。

“离子晕法”是前苏联学者 C·B·格里戈良和 E·M·科平研制出来的一种寻找隐伏矿床的新方法<sup>[2]</sup>。这种方法既类似地电化学方法,即用化学势差的原理捕捉活动态的金属离子,又类似于气体地球化学方法。他们认为,离子晕中指示元素的主要存在形式是离子(起码不是气溶胶形式),即认为被检测到的是比气溶胶粒径更小的物质。关于迁移机制,他认为这些元素的迁移都是被动的,主要从水动力作用(渗滤、毛细上升、蒸发、蒸腾等)和地电化学作用等方面进行探讨。

地气测量方法是检测气体中的固相微粒和指示元素含量;吴传璧、施俊法将这种以非常细小的固相微粒随地气流向上升迁移的机制称为物质的“类气相”垂向迁移机制<sup>[3]</sup>。这种迁移机制的要点包括:(1)在覆盖层和近地表大气中,存在着能够反映地下深部隐伏矿体信息的固相微粒流;(2)地幔脱气作用、大气与深部气体的交换和循环、覆盖层中的物质经细菌或氧化作用等产生的气体( $CH_4$ 、 $CO_2$ 、 $SO_2$ 等)形成的地气流极可能是这些固相微粒的动力源;(3)在隐伏矿之上几十米或几百米厚的覆盖层范围内,地气流垂向上升迁移可能是主导方向。此外,根据元素的结合能可以初步揭示金属元素的赋存状态,理论上认为,地气流中除了含有金属单质以外,还可能含有金属化合物<sup>[4]</sup>。

前苏联学者在进行金属矿床的勘探中,发现了一种新的重金属元素分布晕,称之为“射流晕”<sup>[5]</sup>。射流晕不同于普通的地球化学晕,所指的是重金属源中可迁移的金属离子所形成的元素地球化学次生晕。周子勇认为金属元素的射流分布与金属元素的气相迁移有密切关系,即金属元素以离子形式或微小的颗粒被吸附在在岩石中的微气泡表面或者在气泡里面,并随地球中的上升气流运移到地表。

当今国内外比较关注的是“纳米效应”理论。地矿部物化探研究所谢学锦、任天祥、伍宗华等<sup>[6-8]</sup>和成都理工大学童纯茵等<sup>[9]</sup>先后提出,固相微粒是呈纳米物质存在的,它们具有类气相的迁移性状和特殊的物理—化学特性,并以实验初步证实了这种可能性。主要观点是:(1)这些物质之所以从深部被

迁移至地表,与它们处于纳米级微粒而显示特殊性能,即与“纳米效应”有关;(2)地质体(矿床)周围可能形成一种纳米级的物质场,这种物质场不同于常称的地球化学场;(3)地幔去气作用、岩浆作用、变质作用等都会产生大量气体,形成地气流,上升气流在垂直向上迁移时能携带地壳内纳米级物质到地表,地气异常出现在含矿构造或矿化体向地表投影位置;(4)扩散作用在物质迁移过程中也做了贡献,但是上升气流对物质的迁移作用比物质扩散作用要强烈得多。

## 2.2 射气测量的探测机理

作为核技术勘探的重要组成部分,射气测量不仅广泛应用于寻找铀矿、测定断层、陷落柱、煤矿采空区、煤层自燃区及地热、金矿勘查等,而且已经应用于地震监测、地震区划和地震烈度评估等方面<sup>[10]</sup>取得了较好的效果。氡及其子体的比重比空气大,且其半衰期很短,<sup>222</sup>Rn的半衰期为3.825d,<sup>219</sup>Rn为3.96s,<sup>220</sup>Rn为55.65s,但氡气却能够从地下几十米甚至几百米的深度迁移到地表。国内外学者对它的迁移机理进行了大量的研究。从上世纪30年代Flügge和Zimens(1939年)提出氡气扩散迁移机制以来,至今已经存在很多氡气运移假说,如:对流作用、地下水的搬运作用、抽吸作用、地热作用、伴生气体的压力作用、大气压力的纵深效应、地震应力引起的毛细压力变化作用、镭的迁移、将各种作用综合而成的“接力传递作用”,以及其他气体流动向上的带动及微气泡的携带作用等。

扩散作用是由于浓度差异引起的氡从高浓度向低浓度的地方迁移,它是分子热运动的结果。假使认为氡射气的迁移主要或者唯一是靠扩散作用来进行的,理论上可以证明,氡射气在岩层地下水向上升迁移一般也只有几米到几十米,可见这种理论在目前已不能圆满地用来解释氡射气的迁移了。对流作用的观点认为由于压力差引起氡从压力高向压力低的地方迁移,但对流作用到底能使氡气向地表移动多大距离,目前还很难给出定量的解释。当空气温度较高时,由于土壤和空气存在温度差,在热作用下,水蒸气蒸发使得地下的氡气不断向上运移,温度差异越大,氡向上迁移也越快越多,这就是抽吸作用,但目前尚无具体的理论计算。地热作用是指由于地热梯度的关系,气体在向冷的部位(低压区)迁移时能够带动氡的迁移。由于氡能溶于水和有机质,因而它能以溶解态伴随地下水和土壤水迁移,地下流体广泛存在于岩石孔隙中,并且处于不断的运

动中,包括横向运动和纵向运动,能够带动溶解于其中的氦进行迁移。但是,以上大部分迁移机制只适宜于潜水面以上的盖层中氦的迁移,因此吴慧山等认为氦做长距离运移要依靠接力传递作用<sup>[11]</sup>,即:氦的迁移首先是氦的母体铀、镭的迁移,它可以在潜水面下借助于水压力的作用向上迁移,氦是由在潜水面附近沉淀的镭衰变而来,并经过扩散、对流等作用迁移到地表。

以上这些假说均是就外部环境对氦气运移所起的作用进行研究,即只考虑外因的作用,而从内部条件或机理上来研究多未涉及。因此,刘鸿福等设计了周密的实验<sup>[1][12]</sup>,在较为理想的条件下对氦气运移的自身因素进行研究。采用的仪器为高灵敏度、高精度、静态、累积、低本底测量的 CD-1 $\alpha$  杯测氦仪,并设置自然状态和干燥状态下两种情况对其进行对比。所得数据经计算,氦及其子体向上、向下、横向运移的几率及纯向上、纯向下、扩散运移的几率见表 1。通过实验发现,在较理想条件下的空气中,氦“自身”固有的运移不是以扩散为主,而是以纵向运移为主,且具有较强的向上运移能力。其具体表现是,扩散作用的贡献很小,不及 10%,地球引力导致的下沉作用小于 45%,上浮的贡献大于 45%,随着运移距离的加大,与横向运移和向下运移相比,向上运移的能力仍在加强。因此提出“团簇”模型。该模型指出氦及其子体和母体为 $\alpha$  辐射体,它们放出的 $\alpha$  粒子减速后将变成 He 核,它可与氦及其子体和母体形成团簇(集团), $^4\text{He}$  当团簇所受空气的浮力大于其重量时,便能自行上升,从而使氦及其子体自身具有明显的向上运移能力。图 2 是氦核与氦核形成的团簇示意图。氦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,即氦及其子体运移时,应视为“长寿”放射性元素,故其在地壳中上升

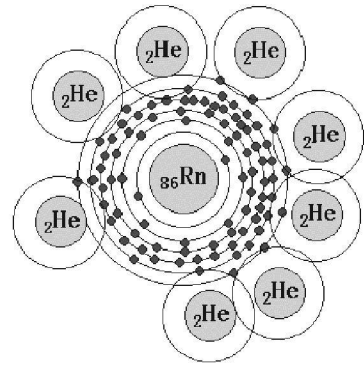


图 2 氦核与氦核形成的团簇示意图

距离可达数十米至数百米以上。按照这种理论,能够很好地提示比重很大的氦及其子体能向上运移并出现在上千米的高空的内在原因,也能解释氦及其子体都带正电的缘由。此外,他们还认为 $^4\text{He}$  核与产生它的“母体”或“子体”借助范德华力构成团簇向上运移形成的气流,正是地下存在的向上运移气流的一种形成因素。

### 2.3 对比和启示

从对地气测量和射气测量的探测机理对比中我们可以看出,它们的区别集中体现在对地气异常物质及其迁移机制的理论认识上,只有搞清楚这一问题,才能在实践工作中获得大的进展。通过上述分析,我们可以得到以下几点启示:

(1)对于地气测量的探测机理研究,现主要集中于外因的作用,即认为造成地气异常的金属元素向上运移是一个被动的过程,而对于氦气测量,目前的研究在内外因方面都取得了很大进展。金属元素向上运移也应该有其自身的原因,地气异常的形成应该是内外因共同作用的结果,这需从内因角度做进一步的研究。

(2)由氦-氦团簇模型可以联想到金属团簇的存在,国外研究发现金属团簇大小一般在几十个原子以上,主要呈球状结构。此外, $\text{Rn}$  经 $\alpha$  衰变成为 Po, Bi, Pb 之后将放出多个 $^4\text{He}$ ,由它们形成的 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,这样,在 Rn 周围出现的 Po, Bi, Pb 甚至 U, Th, Ra 等金属原子微粒与惰性气体,尤其是与 $^4\text{He}$  相互碰撞、相互作用时便会形成由多种组分构成的复合团簇,并是气态与固态共存。通过研究金属团簇和复合团簇,将会对地气测量的理论产生重大的

表 1 氦及其子体向上、向下、横向运移的几率表

运移几率	自然状态	干燥状态
横向运移几率	9	7
纵向运移几率	91	93
向下运移几率	45	37
向上运移几率	46	56
扩散运移几率	9	7
纯向下(下沉)运移几率	36	30
纯向上(上浮)运移几率	37	49

1) 刘鸿福. 氦及其子体运移的实验研究与机理探讨[D]. 成都: 成都理工大学博士学位论文, 1997.

推动作用。

(3)关于地气流的形成,通常认为地气流的形成因素是地幔去气作用、岩浆作用、变质作用等,但是团簇模型的建立,给我们指出了一个新的方向,如果通过实验证实了金属复合团簇存在,那么团簇自身向上运移形成的气流就也应该是地气流的组成部分。这与传统的地气异常物质被动运移的机制截然不同。

### 3 认识和讨论

尽管在理论上射气测量对地气测量有很大的借鉴意义,但要从根本上搞清楚地气异常的形成机理,仍面临着几个障碍,需要多学科相结合,并通过实验和实践逐步取得研究上的突破。

(1)元素在地下深部的赋存状态对迁移的影响。元素的赋存状态有以下几种形式:气态方式,水溶液的形式,元素存在于岩石中的毛细管的水分中(非自由水),元素吸附在固体表面,元素以矿物的形式存在,元素以有机化合态形式存在以及元素以铁锰状

态的形式存在。不同赋存状态的元素具有不同的物理和化学性质,这对向上迁移至地表形成地气异常的是何种金属元素起到直接的决定作用。

(2)捕集到的元素的赋存状态是纳米、离子还是气态?由于含量很低,而且野外采集和室内分析都极易受到污染,对这个问题的认识尚没有统一。从实际工作方面考虑,需要有简便、防污染、低成本、高精度的采集和分析仪器,否则大规模的推广地气测量技术是很困难的。

(3)迁移过程是否发生了物理化学变化?几乎所有的非地震方法用于寻找油气田时,其依据主要是建立在烃类气体的微渗透理论基础上的,即烃类气体从油气田向上运移的过程中将发生一系列变化,如氧化—还原作用、烃类组成的变化、细菌对烃类气体的作用等。设想,金属元素从地下深部运移到地表是否也发生了类似变化?室内实验得到的仅仅是结果,而中间过程往往缺乏有效的控制和模拟。因此,有必要设计更多合理的模拟试验做进一步的研究。

### 参考文献:

- [1] 姜泽春. 纳米科学与地学[J]. 地质地球化学, 1993, (2): 21-25.
- [2] 吴传璧. “离子晕法”及其方法学意义[J]. 地质与勘探, 1997, 33(5): 35-40.
- [3] 吴传璧, 施俊法. 上置晕与物质的“类气相”垂向迁移[J]. 地学前缘, 1998, 5(1~2): 185-194.
- [4] 施俊法, 吴传璧. 金属微粒迁移新机制及其意义综述[J]. 地质科技情报, 1998, 17(4): 81-86.
- [5] 周子勇, 陶澍. 重金属的“射流晕”分布现象及其环境学意义[J]. 地学前缘, 2002, 9(2): 345-349.
- [6] 王学求, 谢学锦, 卢荫麻. 地气动态提取技术的研制及在寻找隐伏矿上的初步试验[J]. 物探与化探, 1995, (3): 161-171.
- [7] 任天祥, 刘应汉, 汪明启. 纳米科学与隐伏矿藏——一种寻找隐伏矿的新方法、新技术[J]. 科学导报, 1995, (8): 18-19.
- [8] 伍宗华, 金仰芬, 古平, 等. 地气测量的原理及其在地质勘察中的应用[J]. 物探与化探, 1996, 20(4): 259-264.
- [9] 童纯菡, 李巨初, 葛良全, 等. 地壳内上升气流对物质的迁移及地气测量原理[J]. 矿物岩石, 1997, 17(3): 83-88.
- [10] 刘江平, 周斌, 李庆红. 氡(Rn)射气测量在胜利油田隐伏断裂研究中的应用[J]. 华北地震科学, 2004, 22(1): 42-45.
- [11] 吴慧山. 核技术勘察[M]. 北京: 原子能出版社, 1998.
- [12] 贾文懿, 方方, 周蓉生, 等. 氡及其子体向上运移的内因与团簇现象[J]. 成都理工大学学报, 1999, 26(2): 171-175.

## Contrastive Study on the mechanism of earth gas and emanation survey

MA Zhi-fei, LIU Hong-fu, ZHANG Xin-jun

(College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024 Shanxi Province, China)

**Abstract:** Through comparison, the similarities and differences of earth gas and emanation survey are analyzed. The problems and some experiences in observation are presented.

**Key words:** earth gas survey; emanation survey; gas radon