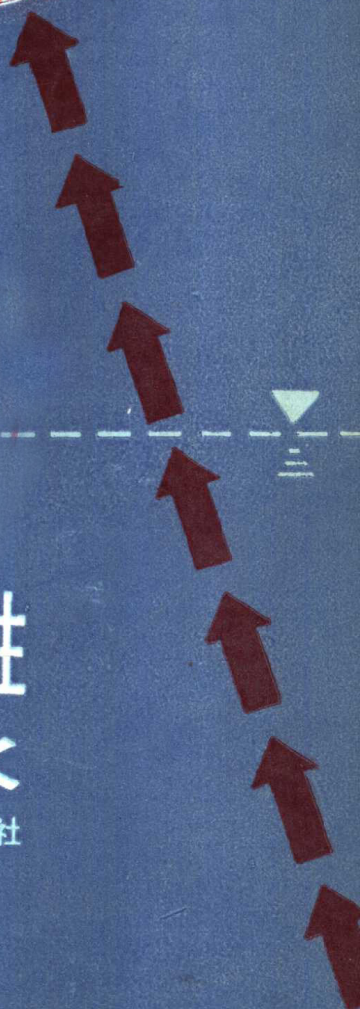


LIYONGTIANRAN
FANGSHEXING
ZHAODIXIASHUI

P641.1;

6443

$\beta\gamma\alpha$



利用天然放射性 找地下水

原子能出版社

利用天然放射性 找地下水

賈 文 懿 編

原 子 能 出 版 社

内 容 提 要

本书主要介绍利用天然放射性找基岩地下水的基础知识,基本原理,常用的放射性勘探仪器和方法(包括地面 γ 测量, α 径迹测量, ^{210}Po 法, α 卡法, 等等)以及资料的整理和解释。列举了我国广大山区近年来应用放射性方法找寻基岩地下水的成功实例。

本书内容深入浅出,文字叙述通俗易懂,可供从事找水工作的物探及地质技术人员和其它有关人员阅读参考。

利用天然放射性找地下水

贾文懿编

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

天津市大邱庄印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本 787×1092 1/32·印张5·字数110千字

1986年6月北京第一版·1986年6月北京第一次印刷

印数1—1800

统一书号: 15175·726

定价: 0.90元

目 录

一、前言	(1)
二、放射性的基本知识	(4)
1. 放射性现象	(4)
2. α 、 β 、 γ 射线及其与物质的相互作用	(9)
3. 放射性衰变的统计规律	(14)
4. 放射性勘探中常用单位	(17)
三、利用天然放射性找基岩地下水的基本原理	(21)
1. 天然放射性元素在岩石和水中的分布	(22)
2. 铀、钍、氡的地球化学特点	(25)
3. 地下水的基本知识	(29)
4. 蓄水构造与放射性异常	(36)
四、放射性勘探仪器简介	(41)
1. 核辐射探测器	(41)
2. 测量仪器的工作原理	(45)
3. 野外常用 γ 辐射仪	(47)
4. 野外常用 α 辐射仪	(48)
5. 辐射仪的标定	(51)
五、放射性勘探常用方法	(59)
1. 概述	(59)
2. 地面 γ 测量	(60)
3. 射气测量	(72)
4. 径迹测量	(75)
5. ^{210}Po 法	(81)
6. α 卡法	(84)

7. 其它的放射性测量方法.....	(90)
8. 简短的小结.....	(93)
六、放射性方法找水的步骤及异常解释.....	(96)
1. 搜集资料.....	(96)
2. 放射性方法的选择.....	(98)
3. 野外测量前的准备工作.....	(100)
4. 野外放射性测量.....	(102)
5. 室内的测量工作.....	(106)
6. 资料整理.....	(106)
7. 测量结果的解释.....	(110)
8. 确定井位.....	(118)
七、利用天然放射性找寻基岩地下水的实例.....	(122)
1. 探测与接触带或岩脉有关的蓄水构造的实例.....	(122)
2. 探测断裂带蓄水构造的实例.....	(129)
3. 岩溶地区的探测实例.....	(137)
4. 温泉水的探测实例.....	(142)
5. 其他例子.....	(146)
八、结束语.....	(149)
参考文献.....	(152)

一、前 言

水是人類賴以生存和發展的寶貴資源。歷時五千餘年的埃及金字塔矗立在尼羅河畔，我國古代文明發源于黃河、長江，都是和水有着密切聯系的。隨着人類社會的發展，目前單凭江河的地表水，是遠遠不能滿足人們廣泛需要的。尤其是我國，丘陵山區的面積很大，占了全國總面積的70%以上，這些地方的地表水很少，必須依賴地下水來解決城鄉人民生活與生產的各種需要。因此，尋找地下水是一項十分重要的任務。

我國是開發和利用地下水最早的国家之一，积累了十分丰富的经验。实践中发现，地下水是很有价值的水源。这是因为地下水不仅分布很广，而且受气候影响较小，水质清洁，水源容易保护，不易污染，等等。因此，地下水往往能成为比较理想的供水水源，在国民经济和人民生活中有着重要的地位，尤其在缺水和少水的山区，地下水更有突出的意义。

但是，地下水是埋藏在地面以下，存在于岩石的裂隙、溶洞和孔隙之中的水体，它不同于江河湖海，单凭肉眼就能发现。因此，怎样才能有效地找到地下水，一直是人们重视而又需要不断探索加以解决的问题。

我们知道，常用的找寻地下水源的方法有：水文地质调查，物探方法，钻井等等，这些方法在许多书籍里都有详细的介绍。在这本小册子里，作者只就物探方法中的一种——放射性勘探，作一介绍。由于应用放射性方法找水的历史较

短,很多人还不熟悉它;更重要的是,近年来在我国丘陵山区和城镇,利用天然放射性找寻地下水取得了可喜的成果,这些宝贵的经验是值得总结并推广的。资料表明,自1965年日本人落合敏郎首次报道用放射性 γ 测量找寻地下水获得成功以来^[1],国外应用得并不多,仅在日本和南朝鲜等地作过一些工作^[2]。我国自七十年代中期以来,先后在不同地区,不同地质条件下进行了许多试验,取得了较好的效果。为了推动放射性方法找水,四川省科委在成都召开了三次“应用放射性方法探测地下水的技术座谈会”。1981年,中国核学会及中国地质学会联合主持,在山东召开了“全国应用核技术寻找地下水源学术讨论会”。在这些会议上,交流了不同地区,不同地质条件下应用放射性方法找寻地下水的经验,促进了核技术在这一领域中的应用〔3,4,5,6,7,8〕。

和常用的物探方法,如电法勘探相比,放射性勘探具有仪器轻便,方法简单,工作灵活,效率高,成本低,受地形影响小,不受电磁干扰,在一般浮土覆盖下仍能正常工作等优点。实践证明,放射性方法是可作为一种找水的物探方法加以综合应用的。

放射性方法找水虽有上述特点,但也存在着许多需要深入研究的问题,例如,放射性找水的某些机理,资料的解释,测量结果的影响因素等。这些问题都有待于进一步地探讨。

为了普及有关知识,更好地推动放射性方法找寻地下水的工作,作者试图在这本小册子里,对放射性方法找水的基本原理,仪器设备,工作方法,资料解释以及应用实例等加以综合介绍,希望能对找水的实际工作者有所裨益。书末还

列出了一些主要参考文献，以便从事放射性找水的人员进一步参考。

在编写过程中，承蒙吴慧山、王德荫等同志审阅并提出了许多宝贵意见，谨向他们表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，国内外许多新经验也未能及时收集、反映，书中难免有不足和差错的地方，诚恳地希望读者批评指正。

二、放射性的基本知识

为了叙述的方便，先简介一些放射性的基本知识，详细内容可参阅文献〔9，10，11，12〕等。

1. 放射性现象

自1896年贝可勒尔发现放射性现象以来，放射性已为人类做了不少贡献。今天，放射性对我们已不陌生了。空气里、食物里、人体里，到处都有放射性，不过数量较少罢了；夜光表就是利用了放射性，把它集中照射到一种发光物质上，使表针和数码昼夜长明。原子能的利用，使我们对放射性有了更深刻的认识。

什么是放射性现象？它有那些特点呢？

我们知道，构成万物的化学元素，已发现有一百多种了。原子序数 Z 相同，但质量数 A 不相同的原子核，因其在元素周期表里处于同一位置，叫做同位素。例如，氢有三个同位素：氢、氘、氚。用符号表示，可写成 ${}_Z^AX$ ， X 为元素的化学符号，氢、氘、氚可分别记作： ${}_1^1\text{H}$ （氢）、 ${}_1^2\text{H}$ （氘）和 ${}_1^3\text{H}$ （氚）。

具有同样质子数和中子数的一类原子（或原子核）称为一种核素。例如 ${}_1^1\text{H}$ 是一种核素， ${}_1^1\text{H}$ 、 ${}_1^2\text{H}$ 是另两种核素。所以同位素就是质子数相同而中子数不相同的核素。同位素

和核素是有区别的，但习惯上常混用。

当核内的质子数与中子数成一定比例时，核处于稳定的状态，叫稳定原子核。当核内质子数和中子数不成一定比例时，核是不稳定的，它会自发地转变成别的原子核，叫做放射性原子核。放射性原子核能自发地变化并放出射线，这个过程叫放射性衰变或核衰变，也叫放射性蜕变。这个现象就叫放射性现象。

大部分的元素，既有稳定的同位素，又有放射性同位素。例如 ${}^1_1\text{H}$ 和 ${}^2_1\text{H}$ 是稳定的， ${}^3_1\text{H}$ 是放射性的。但原子序数大于83的元素都没有稳定的同位素。在放射性同位素中，只有小部分是自然界原来就有的天然放射性同位素，而大部分是通过核反应由人工制造出来的，叫做人工放射性同位素。例如铀就有十几种同位素，而且都是放射性的，但天然存在的有实际意义的只有 ${}^{238}_{92}\text{U}$ ， ${}^{235}_{92}\text{U}$ 和 ${}^{234}_{92}\text{U}$ ，为简单起见常写成 ${}_{92}\text{U}$ ， ${}^{235}\text{U}$ 和 ${}^{234}\text{U}$ 。

天然放射性元素发生核衰变时，能放出 α 、 β 或 γ 射线。有趣的是，我们的主要探测对象铀和钍发生核衰变时会产生一系列的放射性元素，成为一个放射性系，前后并有一定的关系。下面以 ${}^{238}_{92}\text{U}$ 为例，来看看它们的衰变情况。从图2.1可以看出， ${}^{238}_{92}\text{U}$ 是一个长寿命放射性元素，半衰期为 4.51×10^9 年，经过 α 衰变变成 ${}^{234}_{90}\text{Th}$ （又叫 UX_1 ）。 ${}^{234}_{90}\text{Th}$ 的半衰期为24.1天，经 β 衰变变成 ${}^{234}_{91}\text{Pa}$ （也叫 UX_2 ）。再经几次衰变变成镭的同位素 ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ ，这个元素很重要，以后要多次提及它的。 ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ 的半衰期为1602年，它经 α 衰变后变成 ${}^{222}_{86}\text{Rn}$ 。 ${}^{222}_{86}\text{Rn}$ 的半衰期为3.825天，这是一个气体元素，在放射性

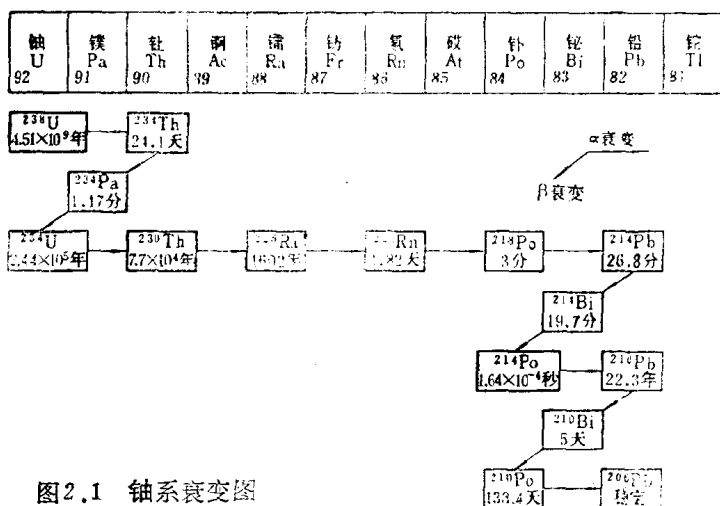


图2.1 铀系衰变图

勘探里将扮演重要的角色。 ^{222}Rn 之后，又经一系列核衰变到稳定的同位素 ^{206}Pb 而终止。我们称起始的元素 ^{238}U 为母元素，它的衰变产物称为子元素或子体。母元素与子元素组成一个族，叫做放射性系。自然界存在三个放射性系：铀-镭系，钍系和锕系。图2.1只绘出了铀-镭系， α 、 β 衰变分别用箭头标明， γ 衰变通常是随着 β 衰变（或 α 衰变）发生的，图中未注明。

自然界除了三个天然放射性系外，还有一些不成系的天然放射性元素， ^{40}K 是一个重要的成员，它的半衰期为 1.3×10^9 年，它通过两个途径衰变，约12%的 ^{40}K 经过K俘获变成 ^{40}Ar ，约88%经 β 衰变成为 ^{40}Ca ， ^{40}Ar 和 ^{40}Ca 都是稳定的。 ^{40}K 衰变时，大约每100次 β 衰变，可放出15个1.5百万电子伏的 γ 光子。百万电子伏符号为MeV。

尽管放射性的方法比较方便，但这些元素之间，母元素

和子元素之间产生的放射性射线将相互干扰，这是放射性勘探中始终需要注意的一个问题。

^{137}Cs 是一个人工放射性同位素，半衰期为32年，常用作 γ 辐射源， γ 射线能量为0.66MeV。

^{241}Am 也是常用的人工放射性同位素，半衰期433年，常用作 γ 辐射源和 α 辐射源，它的 γ 射线能量约为60keV（千电子伏）， α 射线能量约为5.4MeV。

既然放射性元素要自发地衰变，且不受温度、压力、电磁场等因素影响，但它是否会在某一时刻突然之间全部都发生变化呢？实验证明，不会的，放射性元素是逐渐衰变的，并且服从指数规律。设某时刻 t 时的放射性原子核数目为 $N(t)$ ，则其与初始（ $t=0$ ）时具有的放射性原子核数目 N_0 之间有下面的关系：

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

λ 称为衰变常数，和原子核的性质有关，不同的原子核有不同的 λ 。衰变常数的物理意义是单位时间内一个原子核发生衰变的几率， λ 大则衰变速度快。工作中我们常用半衰期 $T_{1/2}$ 来表示衰变的速度或放射性元素的寿命。半衰期就是放射性元素原有的原子衰变一半所需要的时间。例如， ^{226}Ra 的半衰期为1602年，若原有1000万个原子，经过1602年后，则剩下一半，约为500万个，再经1602年，又余下一半，约为250万个，实际上，要经过10个半衰期，原有的原子才剩下千分之一左右，这时可以近似地认为衰变完了。

半衰期 $T_{1/2}$ 和衰变常数 λ 有下面简单的关系：

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda}$$

各种放射性同位素的半衰期差别很大，例如，氡的三个同位素都是惰性气体，但半衰期分别是：

^{222}Rn (氡) 3.825天

^{220}Rn (钍射气) 54.5秒

^{219}Rn (锕射气) 3.96秒

利用半衰期的差别，能方便地把它区别开来。

由于放射性系中有一系列放射性元素存在，前一个元素会产生后面的元素，后面的又不断衰变，如此继续下去。可以证明，在一个放射性系列里，各元素的衰变率 (λN) 相等，即

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 = \lambda_3 N_3 = \dots = \lambda_n N_n$$

需要 $10T^{1/2}_{\max}$ 的时间， $T^{1/2}_{\max}$ 为系列中寿命最长的放射性子体之半衰期。这时，我们称整个系列处于放射性平衡。例如，铀系列达到平衡时需 2.44×10^6 年； ^{226}Ra 以后一系列元素达到平衡需要38天（不考虑 ^{210}Pb 及其子体时）。

铀和镭的地球化学性质差别很大，所以 ^{238}U 与 ^{226}Ra 之间的重量比，在自然界往往不是 $\text{U}/\text{Ra} = 2.9 \times 10^6$ ，这时称放射性平衡遭到破坏。大于这个比例叫偏铀，反之叫偏镭，两者处于平衡时，通常用平衡系数 $C = 2.9 \times 10^6 (\text{Ra}/\text{U})$ 表示之，即 $C = 1$ 时，铀镭处于平衡， $C < 1$ 时富铀， $C > 1$ 时富镭。

需要强调的是，在铀系中，放出 γ 射线的同位素主要是 ^{214}Bi (又叫 RaC) 和 ^{214}Pb (又叫 RaB)。铀镭平衡时， ^{214}Bi 放出的 γ 射线相对强度占整个系列的85%， ^{214}Pb 放出的 γ 射线相对强度为13%，即铀系中98%的 γ 辐射是由镭组产生的。因此，在野外测量 γ 射线，绝大部分是由 ^{226}Ra

的衰变子体放出的， ^{238}U 本身的贡献倒是不多。

铀系有 8 个主要 α 辐射体。铀组有三个： ^{238}U 、 ^{234}U 和 ^{230}Th ，占铀系平衡时 α 射线总强度的31.8%；镭组有五个： ^{226}Ra 、 ^{222}Rn 、 ^{218}Po 、 ^{214}Po 和 ^{210}Po ，它们的相对强度为68.2%。由此看出，在野外条件下测定 α 射线时，主要是由 ^{226}Ra 及其子体产生的。

为了清楚起见，将铀镭平衡时，铀镭组放出的 α 、 β 、 γ 射线相对强度列于表2.1。

从表中可以看出，无论测量 α 、 β 或 γ 射线，镭组的贡献都是主要的。由于铀和镭的地球化学性质差别较大，所以对镭、钍及其子体的迁移、沉淀特点更应注意。

2. α 、 β 、 γ 射线及其与物质的相互作用

如前所述，天然放射性元素能放出 α 、 β 、 γ 射线，探测这些射线就能知道放射性元素的分布情况。由于放射性测量方法简单，灵敏度高，所以放射性方法受到人们的欢迎。

α 、 β 、 γ 射线各有哪些特点？它们和物质相互作用能产生什么现象？下面分别予以介绍。

(1) α 射线及其与物质相互作用

α 射线是由 α 粒子组成的。

α 粒子就是快速运动的氦核 (^4He)，所带正电荷电量是电子的两倍，质量约为质子的 4 倍，它是一个稳定的原子核。 α 粒子是在不稳定的原子核发生 α 衰变时放射出来的。天然放射性元素衰变时，放射出的 α 粒子的能量约在 4 - 10 MeV 之间。因为 α 粒子质量较大，所以它的速度比光速低得

表2.1 铀系中铀组及镭组放出的 α 、 β 、 γ 射线
所占比例 (铀镭平衡时)

同位素		α 射线相对强度, %	β 射线相对强度, %	γ 射线相对强度, %
铀组	^{238}U	9.8		0.5
	^{234}Th		2.7	1
	^{234}Pa		38.3	0.6
	^{234}U	11.1		~ 0
	^{230}Th	10.9		~ 0
	铀组总和	31.8	41	2.1
镭组	^{226}Ra	11.1		~ 0
	^{222}Rn	12.8		~ 0
	^{218}Po	14.0		
	^{214}Pb		11.5	12.4
	^{214}Bi	~ 0	27.6	85.5
	^{214}Po	17.9		
	^{210}Pb		0.4	~ 0
	^{210}Bi		19.5	
	^{210}Po	12.4		
	镭组总和	68.2	59	97.9

多，能量为 10MeV 的 α 粒子，其速度约为光速的 $1/10$ 。

由一定的放射性元素辐射出的 α 粒子，其能量是一定的。如 ^{222}Rn 放出的 α 粒子能量为 5.48MeV ， ^{218}Po 放出的 α 粒子能量为 6MeV 。有的元素还放出两种或两种以上能量的 α 粒子，如 ^{226}Ra 放出的 α 粒子，一种能量为 4.78MeV （占 94.3% ），另一种是 4.59MeV 。 α 粒子在能谱方面的这种差异，可以用来区分不同的放射性同位素。

α 粒子通过物质时，主要是与原子的轨道电子相互作用，使物质电离或激发。带电的 α 粒子与束缚电子作弹性碰撞，由于两者的静电作用力，能使束缚电子得到加速离开轨道变成自由电子，叫做电离。如果束缚电子获得的能量不够大，未能变成自由电子，只是激发到更高能级上去，这就是激发作用。我们正是根据 α 粒子使介质的原子被电离或激发来探测 α 粒子的。

α 粒子的电离本领很强，但穿透能力很弱，在空气里的射程只有 $3-10$ 厘米，通常用一张纸就可挡住它。 α 粒子的行程轨迹是直线。

(2) β 射线及其与物质相互作用

β 射线是由 β 粒子束组成的。 β 粒子为带一个负电荷的高速运动的电子，可以接近光速。

放射性元素 β 衰变时放出的 β 粒子能量一般小于 15MeV ，能量分布是连续的，可以在很大范围内变化，这是和 α 粒子颇不相同的一点。

β 粒子质量轻，体积小，它通过物质时除有电离、激发作用外，还有弹性散射和韧致辐射等现象。弹性散射之后， β 粒子运动方向会发生改变，使其实际行走路程比它能穿透

的射程要好几倍。韧致辐射是 β 粒子被物质阻止，突然降低速度，一部分动能用电磁波形式辐射出去的现象。

因此， β 粒子的行走轨迹不象 α 粒子是一条直线，而是弯弯曲曲的。就 ^{214}Bi 放出的 β 射线而言，最大能量为3.17 MeV，在空气中最大射程约为12米，在铝中约为0.6厘米。铀矿石辐射出的 β 射线，只要厚0.8厘米左右的岩层就可以把它吸收掉。

(3) γ 射线及其与物质相互作用

γ 射线是一种电磁波，是一种光子。 γ 射线是原子核从激发态变化到基态时放出的电磁辐射。

γ 射线既是电磁波，所以它和光线有相同的传播速度，但 γ 光子的能量比可见光的光子能量要大得多。天然放射性元素放出的 γ 射线能量约在几十千电子伏到几百万电子伏之间，因核素不同而异。 γ 能谱测量正是根据 γ 射线能量的差异来区分不同放射性核素的。

γ 射线不带电，通过物质时相互作用方式不同于 α 粒子或 β 粒子。 γ 射线是与原子或电子作用，打出电子，并将能量交给这些电子，称为次级电子，再由次级电子引起物质的电离或激发。这样， γ 射线可以通过间接的关系加以探测。

γ 射线与物质相互作用，有三种主要形式：

①光电效应 光子和原子相碰撞，前者把全部能量交给一个轨道电子，使其脱离原子而运动，光子本身被吸收，这种作用放出的电子叫光电子，这一效应称为光电效应。图2.2 (a)示意地表示了它的过程。这样，原来不易探测的 γ 射线，由于它产生了光电子，能使物质电离和激发，便可探测了。需要说明的是，当 γ 射线能量增高时，光电效应将显