

同位素地球化学在地热勘探中的应用

张锡根 (地质矿产部水文地质工程地质研究所)

在地热能的勘探和开发研究中,用同位素地球化学方法确定地热的性质,现代热液中水的来源及运动状态,深部地热储层的温度等的研究,对于判断地热田的成因和对开发潜力的估价都有十分重要的意义。

同位素地球化学在解决上述问题中能获得较好的效果。例如,稳定同位素 $^{32}\text{S}/^{34}\text{S}$ 的组成特征可以说明硫的来源,进而判断地热的性质和成因;氢同位素氘和氧同位素 ^{18}O 能帮助确定地下热水的成因及其运移途径,放射性同位素 ^{14}C 和氡可以测定地下热水的年龄等等。

我们曾在西藏羊八井高温地热田和天津地下热水的研究中,采用了硫同位素、氘和氧-18,并采用 ^{14}C 测定地下热水的年龄。本文结合羊八井地热田和天津地下热水中同位素的测定结果和运用情况,对同位素在地热勘探和开发中的应用作简要介绍。

一、关于地热田热源性质的判断

硫有各种价态,从负价的硫化物、自然硫到正价的硫酸盐,因此,硫在稳定同位素地球化学中具有特殊的意义。不同来源的硫,其同位素组成也各有特点,可以借助于它来判断硫的来源问题。

自然界中,目前测定的硫大体可分为:

1. 陨石及其它天体物质中的硫;
2. 来自上地幔、未发生明显的同位素分馏效应的原生硫;

3. 在地壳中赋存、经过各种地质作用已经发生了显著同位素分馏效应的地壳硫。

在矿床研究中,把与基性-超基性岩关系密切的一些矿床的同位素组成作为代表地幔硫的特征。这些矿床的硫同位素组成具有成分均一、变化范围小、接近陨石硫的特点,可以视为地幔硫的代表。

现代和古代火山活动区,由深处喷出的岩浆可以把地壳深部,乃至地幔的硫带到地表,这种硫从理论上讲分馏很小,同位素组成接近原始硫,因此可以根据现代地热区硫同位素的组成特征来判断硫的来源,进而判断地热的性质。

羊八井地热田的自然硫和地热水的硫酸盐样的硫同位素测定结果,自然硫的 $\delta^{34}\text{S}$ 在 $-5.5\sim+3.4\%$ 之间,变化范围较小,与标准硫同位素相比,其偏差

小,接近于陨石硫的同位素组成,因此,它具有深部硫源的特点。地热水硫酸盐中 $\delta^{34}\text{S}$ 的组成特征,也反映了具有深部的性质。由此可以认为,羊八井地热田的硫可能来自地壳较深部,其硫源将是一定深度下的岩浆体。根据中国科学院地球物理所九次湖中水下爆炸地震记录研究认为^[1],地热与天然地震的研究表明,地壳中是热的,并存在着物质的熔融或部分熔融,当雄-羊八井地区可能存在着埋藏较浅的“岩浆囊”。这个认识与我们所得硫同位素结果的推断是一致的。

二、利用氢、氧稳定同位素探讨地热水的成因与形成过程

众所周知,氧有三种天然同位素: ^{16}O 、 ^{17}O 、 ^{18}O ,氢也有三种天然同位素: ^1H 、 ^2H 、 ^3H 。它们组成不同的水分子,由于这些水分子的质量不同,所以它们的物理性质和化学性质也有差别。例如,氢的稳定同位素氘(D)和氧的稳定同位素氧-18(^{18}O)所构成的水(D_2O 和 H_2^{18}O),蒸气张力小于普通水,在蒸发、凝结等相转变过程中,由于同位素分馏作用,在汽、液相中氢和氧的重同位素含量就不同,重同位素不易蒸发逸出,故在液相中D和 ^{18}O 等重同位素富集,而在气相中贫化。因此,经历不同水循环过程的地下水,氢、氧重同位素含量不同。故而根据地下水的氢、氧同位素的组成特征,有助于确定地下水的起源,判断含水层与大气降水及地表水的联系程度,确定地下水的补给条件和水交替强度等等。

地下热水因其与热液成矿作用有密切的联系,所以人们对它的氢、氧同位素组成进行了大量的研究,试图弄清楚这些水的起源。

关于地热水的成因问题,过去曾有不同的见解,经过一些学者对地热系统中液体的稳定同位素研究得出的基本结论之一是:大部分热泉水不是原生的岩浆水,而是地区性的雨水。大多数热泉水的氘含量与地区性降水相同,因为地下水和岩石之间的氢同位素交换的影响小,可以忽略不计。根据一些地热水的同位素组成测定结果表明,地热水从补给区到排泄区经历了很长的渗透路程,温度也有很大的变化,但氘含量始终未发现有明显变化,在大量实际资料基础上,

H·Craig 等明确指出, 地热水的氕含量就是补给它的大气降水的氕含量, 因此, 地下水 (包括地热水) 的 δD 值和补给它的降水或地表水的 δD 值一致。

氧是岩石的主要成分之一, 地下水的氧同位素组成可能受含水层岩石的影响, 但是只有温度较高的地热水, 这种影响才比较明显。现在很多资料证明, 在高温条件下, 由于水和含氧岩石 (主要是灰岩和硅酸盐岩石) 的同位素交换, 可使地下水的 ^{18}O 含量增加。

通过对羊八井地热田地表水和地热水样品的氢、氧同位素组成的研究, δD 值和 $\delta^{18}O$ 值明显低于标准平均海水的量, 与世界一些地热田比较, 羊八井地热水最贫氕和氧-18, 具有明显的高程效应。羊八井地区的海拔标高引起了天然水的贫氢、氧同位素。在 δD 值与 $\delta^{18}O$ 值关系图上羊八井地热水点的位置反映了它的氢、氧同位素的组成特征。从下面的 $\delta D \sim \delta^{18}O$ 值关系图 (图1) 上可以看到, 羊八井地热田的地表水和地热水点都落在克雷格 (H. Craig) 大气降水线附近, 与当地的大气降水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 组成相近。 $\delta^{18}O$ 值略有漂移, 但不十分明显。由此可以判定, 羊八井地热田地热水的主要补给来源是大气降水。地热水中 $\delta^{18}O$ 值的增高是由于在高温条件下地下水在岩层中循环时与含氧围岩发生氧同位素交换的结果。

我们根据 $\delta^{18}O$ 测定结果, 还编绘了 $\delta^{18}O$ 值平面分布图。在这个图上反映了两个事实, 一是 $\delta^{18}O$ 含量等值线呈北西—南东向分布; 二是 $\delta^{18}O$ 含量从地热田边缘向中心部位逐渐增加。这两种分布特征与目前对地热田的认识是吻合的。即 $\delta^{18}O$ 值增高的方向和位置与地热田的中心部位相适应, 与流入开采层的地下热水的流向相一致。

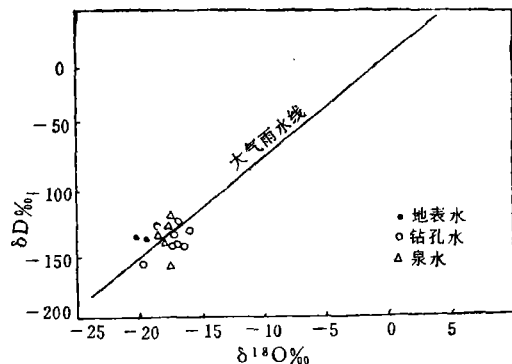


图1 羊八井地热田地热水 $\delta D \sim \delta^{18}O$ 值关系图

地热田中心部位 $\delta^{18}O$ 值的增高, 说明地下水经过深部循环, 经受了较高的温度, 同时地热水在岩层中滞留的时间也相对较长; 而地热田两侧地区或由于地

下温度较低, 地下水在岩层中滞留的时间相对较短, 或由于地热水较多地受到浅部冷地下水的混合稀释的结果。

前面提到, 地热水中 $\delta^{18}O$ 值增高不很明显, 这可能与地下热水的补给距离较近, 水交替活动较强, 因而地下热水在地热储层中滞留的时间较短有关, 也可能是由于地热水中含有较多的 CO_2 , 因 CO_2 和水之间发生同位素交换而使地热水中的 ^{18}O 耗失掉之故。

天津地下热水的 ^{18}O , 在不同含水层中其含量也各有差别。 $\delta^{18}O$ 含量随着地下热水的埋藏深度而增加, 特别是在埋深1000米以下的元古界和古生界地下水与其上部的上第三系地下水之间有着明显的界限。这是因为基岩地下水相对于上部上第三系地下水埋藏更深, 地下热水的温度更高, 水与围岩之间的同位素交换也越充分, 因而 $\delta^{18}O$ 值比上第三系地下水要高。氧同位素的这一特征, 也表明了元古界和古生界地下水与上第三系地下水完全属于两个不同的水动力系统, 它们相互之间的水力联系较小。

根据天津地区地下水的氢、氧同位素组成特征, 可以肯定, 天津地下热水为大气成因, 由大气降水补给。又根据 $\delta D - \delta^{18}O$ 值关系图和大气降水补给区高程计算, 基本上确定了基岩地下热水的补给区的地理位置及补给区的高程。

此外, 利用地下热水 $\delta^{18}O$ 值的平面分布特征, 在判定地质构造特征以及它们与地下热水的赋存、分布关系等方面, 也都取得了较为满意的结果。

三、确定地下热水的年龄

放射性同位素不受温度、压力或化学组分等外界条件的影响, 而以一定的速率衰变。每种放射性元素的半衰期是一个常数, 利用这一特性, 可以测定地下水的年龄, 即水在含水层中的平均贮留时间。地下水的年龄一般都较小, 所以通常利用半衰期不很长的环境天然放射性同位素, 目前比较成熟的是碳-14 (^{14}C) 方法测定地下水的年龄。地下热水也可采用 ^{14}C 方法。 ^{14}C 的半衰期为 5730 ± 40 年, 按目前的技术水平, 可测定500年到25000—30000年的年龄。但在具体运用中, 有一系列因素干扰 ^{14}C 测定地下水的年龄。因此, 在利用 ^{14}C 测定地下水的年龄时, 往往需要进行校正。

另一种确定地下水年龄的方法是放射性同位素氚 (3H , 常用T表示), 它的半衰期为12.26年。氚在地下水中的含量很小, 只有几个到几十个氚单位 (即Tu, 1个Tu相当于 1×10^{18} 个H原子中含有一个 3H 原子)。用氚通常可以确定数年至50年内形成的地下水的年龄。

1953年以后热核爆炸产生的氚,使降水中的氚由原来的几个到几十个 Tu 增大到几百个,甚至几千个 Tu 。因此,现在可以根据是否接受过核爆炸的氚污染来判断含水层有否现代水的补给。在北半球大陆地区,如果没有明显的混合过程,含水层水的氚浓度很低时,一般可以判定是1953年以前补给的地下水。如果地下水中氚的浓度大于 $20Tu$ 时,就可以肯定它是最近期生成的。但各地区氚的浓度的变化幅度较大,水文地质条件也各不相同,因此,应当根据当地地下水 and 地表水中氚含量特征和具体的水文地质条件来估算地下水形成的时间。

根据羊八井地热田目前所掌握的氚含量资料可以看出,羊八井地下热水的氚含量是很低的,一般都小于 $2Tu$,特别是在地热钻井中的地下热水的氚含量更低,通常都小于 $1Tu$ 。少数热泉水的氚含量略高些,但仍低于羊八井附近的地表水的氚含量5—10倍以上。由此可见,羊八井地下水并没有受到热核试验所释放的人工氚的影响,其总循环的时间在30—50年以上。根据所测得的最低氚含量($0.7Tu$)计算了地下热水的年龄为47.06年。据中国科学院地质研究所蔡祖煌等所测得的氚值为 $0.04Tu$,据此算得的地下水年龄为97.6年^[2]。这仅是根据地下热水中测得的氚值计算的年龄,但由于测试技术等方面的原因,所以地下热水的实际年龄往往还要老些。羊八井地热田某些热泉水中氚含量偏高的原因,是由于这些热泉受到浅层冷地下水或地表水混入的结果。

关于 ^{14}C 测定地下热水的年龄问题,目前报道的尚不多,我们在天津地下热水的研究中进行了少量工作。根据天津地下热水中的 ^{14}C 测定结果,它不仅对研究地下热水的年龄能得到较为可靠的数据,而且对研究山区对平原地下热水的侧向补给,地下热水的迳流系统和补给速度等方面都取得了可贵的资料。

^{14}C 测定结果表明,天津地区的元古界和古生界基岩地下热水的 ^{14}C 年龄在1.8—3万年之间,这表明基岩地下热水是很古老的地下水,它大约是在晚更新世以前形成的,这与古水文地质的分析是一致的。从 ^{14}C 测定结果还可以看出,天津基岩地下热水的年龄由北向南逐渐变老,这反映了本区地热系统中的地下水是由北向南运移的,其补给区在北部,径流、排泄区在南部。地下热水不断地接受着北部山区基岩裸露区近代和现代大气降水的补给,但从地下热水的年龄来看,现代大气降水至今还没有将古代淋滤水全部更替。

此外,我们根据地下热水的 ^{14}C 年龄等时线及根据氢、氧同位素所确定的补给区的大概位置,概略地

计算了元古界和古生界基岩地下热水的运动速度。

上用简单地介绍了 ^{14}C 年龄的测定和我们运用的初步结果,在天津具体情况下, ^{14}C 的运用效果是良好的,它可以作为地热研究中了解地下热水年龄和运动特征的重要方法之一。

四、利用同位素测定地下热储层的温度

在地热田的勘探和开发过程中,确定地下一定深度范围内的地热储层的温度,对判定地热开发的前景和进一步指导钻探是十分重要的。目前常用地球化学温标推算地下热储层的温度,如硅地温标、钠-钾(或钠-钾-钙)温标和钠-锂温标等等。但由于这些化学温标常常受沉淀或稀释作用和不同的矿物组合及形成络合离子等的影响,因而常使估算的地下热储层的温度误差较大。

稳定同位素方法测定地下热储层的温度可以避免上述障碍。目前国外已有较多的应用,也取得了较为理想的结果。我国在近年来也进行了一些研究。我们在天津也作了初步尝试。

同位素测温方法主要是应用同位素平衡的破坏速度比较缓慢,当地下热水上升的时间较同位素平衡破坏所需要的时间短时,深部同位素平衡的记录可以保持下来这一原理。在理论上,任何一对发生同位素交换反应的化合物都能构成一种同位素温度计,但在实际应用过程中还有一些条件。目前常用的同位素温度计有:氧、氢、碳和硫等四类同位素温度计(见表1)。

SO_4-H_2O 对的氧同位素比率是效果较好的地温计之一。因为同位素温度计一般要求某一“化合物对”进行同位素平衡的速度要适中,其平衡时间应小于地下热水在地热储中的平均滞留时间(这样才能使反应达到平衡),而大于地下热水上涌所需的时间。通常,规模中等的地热田,其地热水在地热储中的平均滞留时间都在50年以上,如羊八井地热田和天津地热区的地下热水,根据氚资料其年龄都大于50年。因此,其半平衡期为1—10年的温度计最为理想。地热田中常见的化合物对 SO_4-H_2O 对最符合这一条件,使用效果也较好,因此,它是目前常用的一种同位素温度计。

地热研究中的同位素方法,除了上述几个方面以外,气体成分稳定同位素在研究地下水的形成条件、形成年代、地下水的来源和地层水对比及其地球化学历史等方面都可提供有意义的信息。目前在地热研究中主要是研究氢、氧和氮的稳定同位素。

一些研究者指出,地球内部的稀有气体状态,无

表 1 地热田地下热储层温度测量中常用的同位素温度计

(据A·H·Truesdell, 1976)

		测定的温度域 (°C)	估计的平衡速度250°C, T _{1/2} 年
氧温度计 ($\delta^{18}\text{O}$)	水—水蒸汽	100	10^{-6}
	$\text{CO}_2\text{—H}_2\text{O}$	100—370	10^{-5}
	$\text{SO}_4\text{—H}_2\text{O}$	100—370	1
氢温度计 (δD)	水—水蒸汽	80—350	10^{-6}
	$\text{H}_2\text{—H}_2\text{O}$	100—370	10^{-3}
	$\text{H}_2\text{—CH}_4$	50—300	10^{-3}
碳温度计 ($\delta^{13}\text{C}$)	$\text{CO}_2\text{—CH}_4$	250—450	$>10^3$
	$\text{CO}_2\text{—HCO}_3$	50—250	0.01
硫温度计 ($\delta^{34}\text{S}$)	$\text{H}_2\text{S—SO}_4$	>300	$>10^3$

(转自“环境同位素水文地质概论”, 张之淦, 1984)

论在水平方向上或是在垂直方向上都是不均一的。一般说来, $\text{Ar}^{40}/\text{Ar}^{36}$ 和 He^3/He^4 的比值是随深度的增加而减少。地下热水是深部地层中岩石、矿物所结合的气体成分的良好载体, 许多深循环大气降水的气体同位素丰度比与地表水有显著差别, 地层中的原生水的气体同位素丰度比又区别于深循环地下水。因此, 我们就可以利用某些气体的稳定同位素丰度比, 对地下热水的成因等进行研究。

根据 He^3/He^4 比值的研究可以解决某些地质构造的性质和物质来源的问题。例如念青唐古拉山山前断裂属于切穿花岗岩质层的基底断裂, 现今仍在活动, 为了解其现今活动的深度和了解在地缝合线的这个部位是否有地幔物质上涌, 国家地震局曾与美国加利福尼亚大学Scripps海洋研究所教授 Craig 等合作, 在羊八井地热田进行了流体的 He 同位素及其它组分的地球化学研究。研究结果表明^[2], 该段断裂现今活动只在地壳内, 未达地幔, 在地缝合线的这个部位并无地幔物质上涌。这个结论也进一步证明, 我们在前面提到的羊八井地热田的硫源主要来自地壳深部是可信的。

以上只是对同位素在地热勘探和开发中应用的主要方面作了概要的介绍。在地热研究中, 还可利用同位素解决其它一些问题。例如利用某些稳定同位素研究某些化学组分的来源; 利用放射性同位素示踪研究地下热水的运动; 测定某些水文地质参数等等。许多方法与研究冷地下水基本相同, 过去已有很多介绍, 这里不再详述。

参 考 文 献

1. 中国科学院地球物理所, 1981, 西藏高原一亚

东地带地壳与上地幔结构和速度分布的爆炸地震研究, 地球物理学报, 第24卷第2期, P.115—170。

2. 蔡祖煌, 石慧馨等, 1985, 念青唐古拉山山前断裂羊八井段现今活动深度的同位素研究, 科学通报, 第24期, P.1891—1893。

3. 卫克勤等, 1982, 水的同位素组成及其水文地质意义, 地质地球化学, NO9。

4. 张锡根, 西藏羊八井地热田同位素初步研究, 1985, 水文地球化学理论与方法研究, 地质出版社。

5. 张人权, 1981, 国外水文地质研究中应用同位素方法的现状, 水文地质工程地质, 第6期(总第62期)。

6. 丁梯平编, 1980, 氢氧同位素地球化学, 地质出版社。

7. Craig, H., 1961, Isotopic Variations in meteoric Water, Science, V.133, P.1702—1703。

爆炸处理水下软基技术通过部级鉴定

由中国科学院力学研究所、连云港建港指挥部、交通部三航设计院、江苏省地质矿产局第二水文地质工程地质大队等单位共同研究试验的爆炸处理水下软基技术, 已于一九八七年九月二十六日至二十八日在连云港由中科院和交通部联合召开的技术成果鉴定会上通过鉴定。这项新技术, 主要包括爆炸排淤填石、爆炸密实、爆炸挤淤等方法, 与目前淤质港口工程中常用的机械挖泥或排水固结等方法相比, 具有节省投资、缩短工期的优越性, 有着明显的经济效益。其中爆炸排淤填石法处理水下淤泥的厚度已达到12米, 具国际先进水平。

(张道政)