

综合评述

稳定同位素地震地球化学研究的某些进展

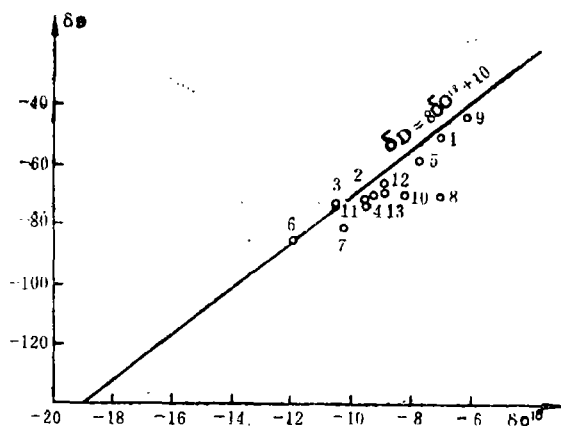
在现代地球化学领域里, 稳定同位素地球化学是其两大发展方向之一〔1〕。不论是在地球的化学组成, 还是在地球内部的化学作用及演化方面, 稳定同位素都起着“指示”或“示踪”作用。这门学科已逐渐向地震地球化学领域渗透, 并且将推动地震地球化学研究的深入发展。

近年来, 稳定同位素地震地球化学研究已取得了以下一些进展, 如对泉水(特别是温泉)的成因作了一些研究并取得了一定的认识, 在探索断裂带上的气体来源方面取得了一些成果; 为震源机制研究提供了新的事实, 为地震预报积累了一些数据。本文结合一些具体实例, 对上述进展作了介绍, 并对一些问题进行了探讨, 以期对地震地球化学研究的发展有所促进。

1. 关于泉水成因的研究

用于观测预报地震的泉水, 不论是温泉还是冷泉, 其成因是最基本的问题。它可为选择灵敏点和灵敏组分, 以及判断正常和异常动态及其形成机制提供线索。

在二十年代和三十年代, 人们普遍认为温泉水直接来源于岩浆体系。五十年代, 奥弗琴尼柯失则认为温泉水可以来源于大气水。后来, 通过热水的氢氧稳定同位素研究, 证实了这一推断。现在知道, 不论是热水溶液中的水, 还是溶解于其中的物质, 均可分为初生的、岩浆成因的、变质成因的、埋存的和大气成因的几类〔2〕, 而从总体上看, 大气成因的要占绝对优势。这是因为在 δO^{18} — δD 图上显示, 相当多的温泉分布于全球平均雨水线附近, 或者当地雨水线附近。我国西部秦岭北缘大断裂上有许多温泉, 在 δO^{18} — δD 图上, 它们都分布在全球平均雨水线附近(仅兰田汤峪温泉有较大的漂移)。这表明它们应为大气成因的(图1)。

图1 热水 δD — δO^{18} 分布图

1. 武山台冷泉 2. 武山台 3. 矿疗 4. 清水 5. 马跑泉 6. 眉县汤峪 7. 临潼
8. 兰田汤峪 9. 宝鸡 10. 咸阳 11. 循化 12. 贵德 13. 街子

知道温泉水的成因(大气水型)后,对比当地地表水就可以定性地估计水的补给源和可能的混合比例。而把化学热储和同位素分析结合起来,则可以定量地解决这一问题。我们对武山水化台等温泉做了初步的研究工作,计算得出原始热水占全部泉水的三分之一左右,为远程的大气补给水。

武山台观测热水的氧同位素组成 δO^{18} 为 -9.58 ,当地冷泉的 δO^{18} 为 -7.15 ,热储计算结果表明,该温泉没有达到化学平衡,有冷水的混入,其中原始热水占39%,根据公式

$$0.39 \cdot \delta O^{18} + (1 - 0.39) (-7.15) = -9.58$$

计算出其 δO^{18} 为 -13.4

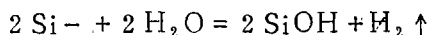
在这一地区没有建立 δO^{18} 与海拔高程的关系式($H, \delta O^{18}$)。根据庐山等地区的相应方程计算,补给区海拔高度应为4600米,这与陇南地区的标高一致。当然,由于气候及地理环境不一样,与实际情况可能有一定的差距。

现在许多地震台用于观测的泉是冷泉,从当地的大气水、地表水和不同含水层的氢氧同位素值就可以基本确定其成因。

2. 关于断层气的来源

在断裂面附近,土壤里以及温泉中的气体,都不同程度地与断层活动有关。研究断层气的来源,有助于推断断裂的活动情况。在这方面的研究中所使用的同位素组分是 $\delta_D, {}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ 和 ${}^{40}\text{Ar}/{}^{36}\text{Ar}$ 。

断层气中的氢气现已广泛地用于寻找隐伏断裂,其来源复杂^[3],有原生的,也有化学和生物化学过程中产生的。活动断裂附近氢气的浓度经常比大气中氢浓度的平均值高几个数量级。许多学者认为,这是由于水同新鲜破裂面上的硅酸盐矿物起化学反应,从而生成氢气,并在断层附近扩散,导致断裂附近氢气含量高。其化学反应方程为:



肋田宏通过山崎断层气中氢气的同位素研究,得出了有利于这一解释的结果。该断层附近水中的 δ_D 值为 -20 — -80% ,取平均值为 -50% ,而断层气中氢气的 δ_D 值为 -470 — -770% ,取 -500% 计算。据此利用Suess经验公式就可算得上述化学反应发生时的温度值,即:

$$\alpha = \frac{(D/H)_{\text{H}_2\text{O}}}{(D/H)_{\text{H}_2}} = \frac{1 + 10^{-3} \delta_{D_{\text{H}_2\text{O}}}}{1 + 10^{-3} \delta_{D_{\text{H}_2}}} \approx 2$$

$$10^{-3} [467.6 \times (10^3 T^{-1}) - 303.9] = \ln \alpha = \ln 2$$

$$T = 368.98\text{K} = 195.98^\circ\text{C}$$

日本的平均地温梯度为 2° — $3^\circ\text{C}/100\text{m}$,根据上述温度值即可算出化学反应在地下10公里左右处发生,与当地微震震源深度(12公里左右)基本一致。

与 H_2 相比,稀有气体有其独特的优越性,因为它一般不由化学反应产生,也不参与化学反应。地球及其大气中有由四种不同氢氦同位素组成的稀有气体^[4],即大气型(${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$: 1.4×10^{-6} ; ${}^{40}\text{Ar}/{}^{36}\text{Ar}$: 295.5),地型壳(${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$: 4×10^{-7} ; ${}^{40}\text{Ar}/{}^{36}\text{Ar}$: 1500),大洋中脊型(${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$: 1.1×10^{-5} ; ${}^{40}\text{Ar}/{}^{36}\text{Ar}$: 2×10^4)和地幔型(${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$: 6×10^{-5} ; ${}^{40}\text{Ar}/{}^{36}\text{Ar}$: 350)。其它各种情况下的稀有气体都是这四种类型气体的组合。

根据这些数据,测定出断层气中的稀有气体同位素值,就能判断其成因,同时可以定性地估计断层的活动深度。例如,武山地震台观测井中溶解的气体中的 ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ 含量为4.9

$\times 10^{-8}$, 因而热水中的氦气基本上是地壳型的, 这表明热水循环有一定的深度, 同时也说明经过该台的北西向和南北向断裂没有切穿地壳, 因为水中没有溶解地幔氦。现代地球化学理论认为, 上地幔虽经脱气而发生稀有气体亏损, 但目前封闭保留于其中的稀有气体数量仍相当可观。

需要指出的是, 稀有气体同位素除了应用于判断气体的成因外, 在构造活动性和构造史的研究中也起着重要作用。目前在这方面已积累了许多资料。

3. 地震触发机制和地震预报研究

地震与岩石破裂和错动关系密切, 但是对于其触发机制, 目前还不清楚。日本松代震群和长野地震的同位素地球化学观测结果表明, 它们是岩浆活动触发的。

1966—1967年日本松代地区发生了一系列5.3级以下地震, 其震中区位于一安山岩体上, 沿一条北西—南东向断层分布, 震源深度在2公里左右, 直径范围大约为4公里。8年后, 即1975年, 肋田宏等人对土壤气和泉水(CO_2 泉)中的氦做了同位素分析, 分别得到异常高的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值, 即 $(8.90 \pm 0.31) \times 10^{-6}$ 和 $(8.87 \pm 0.55) \times 10^{-6}$, 比大气型和地壳型的相应值几乎分别高一到两个数量级, 因此地幔氦占绝对优势。联系震前地面隆起、重力变化和断层活动等现象, 他们用一个小而浅的岩浆侵入体解释了地震的触发过程。

当岩浆上升时, 一方面要产生一些气体, 另一方面与地下水混合, 使孔隙压突然上升, 在构造应力场的作用下, 触发地震。由于从地幔一个接一个不断分离出这种岩浆, 使得发生的地震不是一个而是一群。

1984年9月日本长野县发生了一次6.8级地震。地震前, 该区地面连续上升, 有震群活动, 1979年附近御岳火山喷发; 震中和火山口沿北西—南东方向排列。经震源机制等分析得知, 地震断层走向为北东东—南西西向, 隐伏于地下。

震前1981年对火山周围泉水中的氦气进行了同位素测定, 发现 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值与采样点到火山的距离(d)呈负相关(样点的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值从 6.15×10^{-6} 减小到 1.86×10^{-6}), 且满足下列关系式^[5]:

$$^3\text{He}/^4\text{He} = 6.74R - 0.219R \times d$$

式中 R 为氦同位素比值。表明在喷发岩浆上升时, 将地幔中氦带出。震后1984年9月10日以及1985年4月又取得了三次测定结果, 数值分布情况与1981年基本一样, 但在震中附近的几个点出现幅度达15%的异常变化。Sano等人认为, 这是由于地幔中分离出的岩浆上升, 触发了地震, 同时使 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 出现异常。

所以岩浆触发机制和天体引力等触发机制一样, 在地震成因和震源机制的研究中起重要作用。

稳定同位素直接应用于地震研究的另一方面是地震预报, 近年来已经记录了一些地震同位素效应。据Osika等人报道, Caucas西北部一次4.5级地震前, $\delta\epsilon^{18}$ 值从2.92%变到2.37%。在另一次4.8级地震前, O'Neil和King^[6]观测到加利福尼亚一些井水中 δD 和 δO^{18} 出现显著的变化, 他们归之为不同水混合比例的变化。King(1986)还指出, 在一些地震后, 发现 δD 增加, 而 δO^{18} 不变。

4. 结语

综上所述, 氢氧和稀有气体同位素在地震科学研究中起着重要的作用。目前应当首先对

各水化台站的水的补给、循环和混合问题作详细的同位素研究。国内一些学者正着手对一个地区不同地层流体做对比观测研究, 稳定同位素可以作为研究的手段之一。

另一方面, 要积极开展稳定同位素构造地球化学研究, 加强对与地震孕育发生相关的化学过程、地震化学异常的形成及地震化学观测预报的整体同位素研究。这不仅对地震化学本身有重要意义, 对构造物理学和震源物理学研究也可起到促进作用。

(国家地震局兰州地震研究所 张必敖 石雅镠)

参 考 文 献

- [1] 中国科学院地球化学研究所, 地质地球化学进展, 贵州人民出版社, 1980.
- [2] 沈照理, 水文地球化学基础, 地质出版社, 1986.
- [3] Chi-Yu King, Gas geochemistry applied to earthquake prediction, An overview, J. Geophys. Res., Vol. 91, 1986.
- [4] I. Kaneoka and N. Takaoka, Noble-Gas state in the earth's interior—some constraints on the present state, Chemical Geology (Isotope Geoscience Section), Vol. 52, 1985.
- [5] Sano, J. et al., $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratio anomalies associated with the 1984 Western Nagano earthquake, Possibly induced by a diapiric magma, J. Geophys. Res., Vol. 91, 1986.
- [6] O'Neil, J.R., and King, Variations in stable isotope ratios of groundwaters in seismically active regions of California, Geophys. Res., Lett., Vol. 8, 1981.

THE PRESENT STATE AND RECENT DEVELOPMENT IN SOME FIELDS OF STABLE ISOTOPIC SEISMOLOGICAL GEOCHEMISTRY

Zhang Biao, Shi Yaliu

(The Earthquake Research Institute of Lanzhou, SSB)