

同位素地球化学方法与地震 研究及地震预报

洪 阿 实

(国家海洋局第三海洋研究所, 厦门)

提要 通过在地震活动区对有关地质体的K—Ar、Ar—Ar、FT、TL、 ^{14}C 、ESR、U系等同位素年代学、地下水及其释放气体的D/H、 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 、 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 等稳定同位素以及He、Ar等稀有气体同位素的研究, 可获得有关新构造运动的时间序列、断层运动的时间、地质体热历史以及地下断层流体运动的许多重要信息。因而, 同位素地球化学已逐渐在研究地震成因机制以及监测预报地震中发挥重要作用。

关键词: 同位素地球化学 地震研究 地震预报

在诸多地震预测预报方法(测震学的方法; 及其他方法, 包括观测地面形变、重力、地磁、天电、地电、气象、旱、涝、宇宙现象、动物的异常行为等)中, 地球化学方法可以研究孕育和产生地震的物质本身的运动规律、孕震环境与介质条件, 以及地球物质在地震全过程中的相互依存和制约的关系。利用地下水中的铀系子体之一氡含量的变化预报地震, 就是一种地球化学方法。这一方法已得到应用, 并已为大量预报实践所肯定。它同地下水中其他一些气体(H_2 、 O_2 、 CO_2 、...)及离子(NO_2^- 、 F^- 、 Cl^- 、 Mg^{++} 、 Ca^{++} 、...)含量变化一起, 成为预报地震的重要手段之一。然而, 单靠这种测定某种成分浓度变化的方法, 在很多情况下是难以判别地震信息与“干扰”的, 因此, 同位素地球化学方法逐渐被人们所重视。¹⁾

同位素地球化学是地球化学的重要分支, 是介于原子核科学和地球科学之间的边缘学科, 它包括同位素地质年代学与稳定同位素地球化学, 随着同位素地球化学与地震科学的进展, 它已经成为与解决地震成因机制直接有关的研究地壳上地幔演化的强有力手段, 国际上美、日、苏等国已把它作为预报地震的一种方法, 也受到我国地震科学工作者和同位素地球化学工作者的高度重视。日本从1973年开始用地下水和地球化学方法监测和预报地震, 在地震地球化学实验室中配有同位素质谱计、高速离子色谱仪、高灵敏的X荧光光谱仪、数字式原子吸收分光光度计等先进仪器设备, 同位素分析是地震地球化学实验室的必测项目之一。不过, 总的来说, 面对地震科学中所提出的一系列复杂课题, 特别是对于新构造运动, 对于那些在短时间内温度、压力变化条件, 同位素地球化学行为的研究迄今则尚属探索阶段。值得

1) 邱纯一等, 同位素地球化学方法在地震研究和预报中的应用, 1981。

地震科学工作者与同位素地球化学工作者共同研究的重要课题主要有:

1. 不同地质体的同位素年龄及其变异的研究

(1) 通过与地震活动区新构造运动密切相关的年轻火山岩的K—Ar或Ar—Ar年 化学研究, 提供新构造运动的时间序列, 并作为对地壳上地幔动力学历史研究的重要手段。

大量海洋火山岩样品的年龄测定, 为地球动力学研究提供了有力证据。利用 ^{40}Ar — ^{39}Ar 测年法表明, 夏威夷岛链的火山活动迁移速度为 $9.4 \pm 0.3 \text{ cm/a}$, 即约为 10 cm/a , 与印度洋板块(向北)的运动速度是一致的。

我国是一个多地震国家, 地处欧亚、印度洋、太平洋三大板块交汇处, 各类火山岩广泛分布, 尤其是东部地区新生代火山岩大量出露。因此, 深入研究我国火山岩, 特别是中、新生代火山岩的年代学, 并配合岩石学、矿物学及构造学研究, 对深入探讨我国大陆地震成因及分布规律具有重要意义。

(2) 通过K—Ar、Ar—Ar、FT、TL、 ^{14}C 、ESR、Rb—Sr和U系等年代学方法测定在断层运动中形成的新矿物, 以及断层最后一次运动使原有地质时钟完全破坏而又重新记时的样品以确定断层最后一次运动最近似的时间。通过测定在空间上与断层有关的地层或侵入体中样品的年龄, 结合野外观察, 给出一个断层运动可能产生的时间范围。

(3) 通过在受震(温度、压力)条件下地质体同位素年龄变异的研究, 可以提供岩石、矿物所处地质体热历史的珍贵信息。

Hartung (1970) 测定了内华达州地下核试验场的花岗闪长岩年龄, 表明震动压力对同位素年龄的影响是存在的, 而温度影响更为严重。这显然是由于放射成因氩的丢失所造成的。

2. 稀有气体同位素的研究

(1) 通过He/Ar和N₂/Ar等比值的测定获得了由于地震孕育过程而产生的地下流体运动信息, 有可能作为地震前兆监测的指标。

岩石中U、Th、K所产生和积累的He/Ar比值(~ 10)约为大气(5.7×10^{-4})的20万倍, 因此, 当地下水中混入1%的岩石圈气体时, He/Ar比值就会增加约2000倍。天然气中的He/Ar比值是大气中的He/Ar比值的100倍以上, 虽然其中He、Ar各自浓度都很低。可见, 只根据气体各自浓度变化来判断岩石圈气体是否混入是困难的, 而它们的比值对检测岩石圈气体的混入却是十分灵敏的, 而且它们不受其他气体的稀释而变化。

日本科学家十分重视断层活动所引起的气体变化。以下气体组分、气体组分比值及同位素比值是日本地震地球化学的重要观测内容: Rn、He、Ar、H₂、CO₂、CH₄、N₂、He/Ar、N₂/Ar、CH₄/Ar、D/H、 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 、 $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 等。杉崎隆一认为断层气中He/Ar、N₂/Ar比值可作为地震前兆指标, 他曾连续监测爱知县的一条隧道里的气体, 震前约一个半小时, He/Ar比值达到最高峰, 随后在爱知县与东京之间的静冈县发生了一次7.3级大地震, 这已成为公认的典型震例。又一个震例是1984年9月的长野县地震。震前在最靠近震中的监测矿泉中出现了显著的气体异常。He/Ar、N₂/Ar和CH₄/Ar体积比与时间的曲线, 三个比值同步变化。1984年4月波动有所增加, 7月间下降至最小值, 约40天后发生了地震。日本学者通常采用由微机控制的气相色谱仪连续监测地下气体的组分。有

一种活动断层气体自动分析装置,可连续测定矿泉或火山喷气孔中 H_2 、 CH_4 、 He/Ar 、 CH_4/Ar 以及 SO_2 等。

苏联学者也十分重视稀有气体在地震监测中的应用,Б. А. Мамырци 等提出:下列同位素比值可以作为地震前兆监测的指标: $^3He/^4He$ 、 $^4He/^40Ar$ 、 $^4He/^36Ar$ 、 $^4He/Rn$ 及 He 浓度。

上述动向受到了我国地震工作者的重视。1976年8月—1977年5月间唐山几次强余震前后北京万泉庄浅井喷出气体中 Ar 、 N_2 浓度出现过明显的变化。在邢台发生6.1级地震前半个月, He/Ar 比值明显增高并持续上升到地震前一星期,最高值比正常值高出40%,然后逐渐下降到正常值。我国自行研制的WHM—1型水氦质谱计,专用于 N_2/Ar 、 He/Ar 比值测量,并已在冀中深部热水溶解气的测定中获得应用。

(2) 由于 He (特别是 $^3He/^4He$ 比值)与构造断裂带—地震活动带的密切相关,可以期望通过对 He ,特别是 $^3He/^4He$ 比值的研究,作为预报地震以及对地震成因机制研究的一种有效手段。

L. V. Gorbushina等(1973)对地震前后塔什干自流盆地中地下水的 He 测定表明,大部分地下水中 He 的浓度在地震前后有明显增长。

大量的研究结果表明,在各种自然体中, $^3He/^4He$ 变化达好几个数量级:从 10^{-10} 到 10^{-8} ,地幔中为 3×10^{-8} ,地壳中 10^{-8} ,大气中为 1.4×10^{-8} 。¹⁾在近地表面观测到的 He 是以上三种分量的总和。因而, $^3He/^4He$ 比值可作为地球深部来源的重要信息,也为用它来预报地震提供了有利条件。

1984年9月14日日本长野县地震(震级 $M_{6.8}$),发现震后不久(同年10月)的 $^3He/^4He$ 比值明显增加(高出正常值15%),取样点均接近于断层带,并且随着与断层距离增加而改变。 $^3He/^4He$ 观测值的变化可以认为是由于在该区域底下的岩浆活动所引起,而岩浆体的上升可能对地震起触发作用。

3. 地下水中放射性核素($^{234}U/^{238}U$ 和氡)的测定

^{234}U 和 ^{238}U 在岩石和矿物中处于不同的能态,它们具有不同的迁移能力。当受到地下应力作用的时候, $^{234}U/^{238}U$ 比值会发生变化,这种特征,可作为表征深部岩石所受应力状况以及研究地震前兆现象的一个指标。

通过测定不同地区、不同水文地质条件及不同深度的井孔水中的氡(T)含量,可以研究地下水的运动规律,确定地下水的局部补偿问题、地下水的年龄(即水与大气脱离、在岩层中存留的时间),以及潜水下渗等问题,并且对比地震前后地下水运动规律的变化,对地震过程中水的作用,以及发震和余震过程中地下水运动规律的改变,给出判断依据。

4. 地下水中的稳定同位素研究

由于活动断块具有较高的地球化学活动性,地震激发了水中气体的释放作用,并导致稳定同位素组成的再分配。尽管造成地下水中气体稳定同位素组分变化的因素很多,但是,通过对地下水中 D/H 、 $^{13}C/^{12}C$ 、 $^{15}N/^{14}N$ 、 $^{18}O/^{16}O$ 、 $^{34}S/^{32}S$ 等气体同位素比值的测

1) 洪河实,稀有气体同位素质谱研究,1985。

定, 以及前述的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 、 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 、 $^4\text{He}/^{40}\text{Ar}$ 、 $^4\text{He}/^{38}\text{Ar}$ 等等比值的测定, 探索断层流体组分中 He 、 Ar 、 H_2 、 H_2S 、 CO_2 及其他无机碳组分, CH_4 及其他碳氢化合物等等物质来源及其深部运移机制, 仍可能作为预报地震及研究地震成因机制的一种有效手段。

稳定同位素比值的变化通常以下式表示:

$$\delta x (\text{‰}) = \frac{R_{\text{样品}} - R_{\text{标准}}}{R_{\text{标准}}} \times 10^3$$

其中, $X = \text{D}, ^{13}\text{C}, ^{15}\text{N}, ^{18}\text{O}, ^{34}\text{S}$ 等,

$R = \text{D}/\text{H}, ^{13}\text{C}/^{12}\text{C}, ^{15}\text{N}/^{14}\text{N}, ^{18}\text{O}/^{16}\text{O}, ^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$ 等

J. R. O'Neil等(1981)认为有两种与地震活动有关的地下水迁移过程可能伴随着稳定同位素比值的变化: ①当处于地震孕育膨胀期时, 由于岩石发生了有效的微破裂, 为补偿这种压力的下降, 伴随着发生了地下水向膨胀区的渗入作用; ②深部岩石运动摩擦生热导致地下水温度的升高, 并有效地增大了岩石与水之间的 ^{18}O 的交换速率。下表列出了在地震活动区, 地下水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与 δD 值的几种可能的变化情况。

地震活动区地下水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 可能的几种变化

过 程	$\delta^{18}\text{O}$	δD
1. 与“较重”的水混合	升高	升高
2. 与“较轻”的水混合	降低	降低
3. 与 ^{18}O 的“转向”水混合	升高	不变
4. 水与岩石之间交换	升高	不变
5. 与含氧的气体(CO_2 、 SO_2 等)交换	降低	不变
6. 与含氢的气体(H_2 、 H_2S 等)交换	不变	升高

(据J. R. O'Neil, 1981)

由于H和D在各种元素中它们的同位素相对质量差最大, 因而, 表现出最大的同位素分馏效应。各种不同机制、不同来源的流体组分其同位素比值相差很大。如大气中微量 H_2 的 δD 平均约为+70‰; 火山气的 δD 为-158~-144‰; 地幔水的 δD 约为100‰; 海水的 δD 约为0‰; 有机成因 CH_4 的 δD 为-280~-180‰; 而不与石油伴生的天然气中的 δD 为-180~-130‰等等。

O'Neil研究了加利福尼亚地下水中的稳定同位素比值的变化与地震活动的关系。位于加州北部的Oroville水库区于1975年8月1日发生了5.7级地震, 在震后很短的时间内观测到地下水中 δD 值明显升高了2~3‰, 另一次, 1976年1月发生了一次4级地震时, δD 值明显增加了2‰, 而 $\delta^{18}\text{O}$ 值却保持不变, 这可能是由于水与含氢的气体之间发生了同位素交换反应所致。上述情况在1980年的San Juan Bautista地震, 再一次得到了证实。

A. N. Кравцов等(1974)研究了与地震活动有关的天然气中碳稳定同位素比值的变化, 他对1974年高加索地区的地震进行了动态观测, 比较了远震(采样点离震中150—200公里)及近震(采样点离震中40公里)后发现, 对于远震, $\delta^{13}\text{C}$ 变动范围为0.2—0.3‰, 而近震和强震为1‰, 而且发现甲烷中碳同位素变重成比例地与二氧化碳中碳变轻相对应, 这有利于 CO_2 — CH_4 系统中按同位素交换原则进行分馏。Кравцов认为, 如果有观测台网, 更

详细地定量确定上述相关性, 则 $\delta^{13}\text{C}$ 可用来预报将发生的构造地震的大小和地点。苏联学者在乌兹别克、萨哈林汞矿床等地临震前, 同时观测到地下水中Rn及其他气体组分, CO_2 中 $\delta^{13}\text{C}$ 的异常变化。

我国地震工作者曾观察到1981年11月9日隆尧5.8级地震前后震区附近地下水中 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 的异常变化, 认为此与地震有关。¹⁾

地下水中不同来源的 CO_2 其 $\delta^{13}\text{C}$ 值也不同, 如海洋无机碳中 $\delta^{13}\text{C}$ 为 $-1 \sim +2\%$; 与大气平衡的海水为 0% 左右; 地幔 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 为 $-8 \sim -4.7\%$; 有机物分解的最低, 小于 -20% ; 土壤气中 $\delta^{13}\text{C}$ 对潮湿气候为 -25% ; 而在半干旱地区则为 -12% 。

甲烷也是断层流体中最常见的组分之一, 诸如地光及火球腾空而起等地震前兆现象据信与震前断层带 CH_4 的异常释放有关。Gold等(1980)提出, 在地球深处蕴藏着大量的、以 CH_4 为主的原始气体, 这些气体在大地震或火山喷发时可以冲出地面。近年来, 我国地震地球化学工作者进行的测定国内各主要构造带上释放的 CH_4 的稳定同位素比值的工作将有助于揭开某些大震前的地光及井中冒火等宏观异常之谜。

Esikov和Cheshko(1983)在苏联千岛—库页岛地震试验场进行的同位素前兆观测时发现, 1979年9月23日地震前国后岛“热海滩”自流井水的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值显著地同步增加。

测定断层气体中 H_2 的 δD 值可以作为判定断层活动的指示剂。Kita等(1980)和Wakita等(1980)从实际观测中发现, 沿日本山崎断层采集到的土壤气中 H_2 的 δD 值为 $-770 \sim -470\%$, 如此低的 δD 值在以前研究过的天然含氢物质的同位素组成时从未曾有过。在其他一些地热区也发现这么低的 δD 值的 H_2 , 如美国黄石公园地热区喷出的 H_2 的 δD 为 -660% , 据认为这种高贫D的 H_2 是断层活动的直接产物, 是渗入断层带深部的地下水在高温高压条件下与断层活动新生成的新鲜岩石破裂面发生还原反应的产物。

综上所述, 断层流体的稳定同位素研究不仅可以在探索流体组分的物质来源时起到决定性作用, 而且在地震预报、前兆机理及构造地球化学研究中都可以发挥重要的作用。

5. 深源物质的同位素地质研究

直接研究震源区与孕震区深部物质的组成特征与演化历史是一件很重要的工作, 它对于研究地震成因、孕震及发震过程等具有重要意义。同位素地球化学的发展, 为其开辟了新的研究途径。通过对中、新生代火山岩物质的同位素演化史的研究, 可以追溯漫长的地幔演化历史, 对于火山岩及金伯利岩中超基性包体物质的分析, 特别是它的同位素组成及演化的研究(Rb—Sr 、 Sm—Nd 、 U—Pb 及稀有气体同位素等), 则可提供深部物质组成、来源、演化条件及形成演化历史, 进而对深部构造背景作出一定推断。

在研究方法上, 应注意把地震活动区与相对平静区进行对比研究; 应注意同一地区的岩样、土样、气体和水样的综合取样、综合分析; 应注意各种手段的综合分析, 如稀有气体、稳定同位素、年代学, 利用不同元素、同位素所能提供信息的不同特点, 研究它们的相互联系和相互制约的关系; 应注意进行震前、震后的资料对比以及与岩相、矿相及矿物物理性质的研究相结合。²⁾

1) 王永才等, 冀中地下水氢氧稳定同位素及震兆显示, 1986。

2) 邱纯一等, 同位素地球化学方法在地震研究和预报中的应用, 1981。

参 考 文 献

- [1] J. R. O'Neil, 加利福尼亚地震活动区地下水稳定同位素比值的变化, 世界地震译丛, No. 9, 1982.
- [2] 上官志冠, 断层流体组分的稳定同位素研究, 地震地质译丛, No. 3, 9—14, 1989.
- [3] 邱纯一等, 质谱法测定地下水中He/Ar、比值及其在地震监测中的应用, 质谱学杂志, No. 1, 3—9, 1983.
- [4] А. и. Кравцов等, ОБизменении изотопного состава углерода природных, Геохимия, No. 1, 387—390, 1979.
- [5] 杉崎隆一, Deep-seated Gas Emission Induced by the Earth Tide: A Basic Observation for Geochemical Earthquake Prediction, Science, Vol. 212, No. 4500, 1264—1266, 1981.
- [6] Б. А. Мамырин等, О Возможности Применения Отношения $^3\text{He}/^4\text{He}$ При Прогнозировании землетрясений.

THE ISOTOPIC GEOCHEMISTRY TECHNIQUE AND THE SEISMOLOGICAL RESEARCH AND EARTHQUAKE PREDICTION

Hong Ashi

(Third Institute of Oceanography, SOA, xiamen)

[Abstract] Studying at the quake-active area on the isotopic chronology of K-Ar, Ar-Ar, FT, FL, ^{14}C , ESR, U series of the relating geological body, the underground water and the stable isotopes of D/H, $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ by its released gases, and the isotopes of the rare gases of He and Ar, we can obtain many important informations concerning the time sequence of the neotectonic movement, the time of the fault movement, the thermal history of the geological body and the fluid movement of underground fault. Therefore we can find that the isotopic geochemistry is gradually playing an important role in studying the seismic formation mechanism and in seismic monitoring and prediction.

Key words: Isotopic Geochemistry; Seismological research; Earthquake prediction