

氧同位素在地质学中的应用

赵 晶

(新疆大学资环学院 新疆 乌鲁木齐 830046)

摘要:氧是地球上含量最大的元素,属地球化学分类中的造岩元素,在成矿和控制地质环境方面起重要作用。其原子序数低,同位素质量比差大,可以在自然条件下发生最大程度的同位素分馏。氧同位素在地质学中的应用主要有:利用氧同位素地质温度计计算矿物形成时的温度;利用氧同位素组成的不同,确定矿物的物质来源;利用氧同位素组成在岩浆中的变化与鲍温反应系列的相关性来指示矿物结晶顺序和环境。

关键词:氧同位素;氧同位素地质温度计;氧同位素组成

0. 前言

氧是地球上含量最多的元素,它有三种同位素 ^{16}O 、 ^{17}O 、 ^{18}O ,由于其元素质量较小,同位素质量相对差别较大,在自然界的各种物理、化学作用,如蒸发、扩散、渗透、吸附、结晶、沉积和生物作用中有可能发生明显的同位素分馏效应,从而形成在一些天然物质中轻的同位素趋向富集,而另外一些天然物质中富集重的同位素。自然物质氧同位素组成上的变异是物理化学条件影响的结果,通过对各种地质体中氧同位素组成的测量,找出其变化规律,研究这种变化的原因,从中获取由同位素组成变化反映的地质作用信息。

1. 氧同位素地质温度计

达到热力学平衡的两种含氧矿物(a,b)间的氧同位素分馏系数与下列公式的关系服从下列公式:

$$1000\ln \alpha = \Delta 8\text{O}_{\text{a-b}} = A/T^2 + B$$

一般采用实验方法在矿物-水体系中测定常数 A、B。

在计算两种共生含氧矿物的形成温度时可利用下列关系:

$$\alpha_{\text{a-b}} = \alpha_{\text{a-w}} / \alpha_{\text{b-w}}$$

$$\Delta 8\text{O}_{\text{a-b}} = (A_{\text{a-w}} - A_{\text{b-w}}) / T^2 + (B_{\text{a-w}} - B_{\text{b-w}})$$

当一种岩石中有三种或更多含氧矿物达到热力学平衡时,则每一对矿物计算出来的温度应是一致的,这反过来也可以作为检验岩石是否达到同位素平衡的标志。

氧同位素地质温度计作为一种独立测量地质过程中温度的工具与其他一些地质温度计相比有许多优点:(1)它几乎不受压力的影响;(2)在热力学上,同一元素不同同位素在矿物相之间的平衡分馏可以视为理想溶液中简单的等化学势分配;(3)氧在地壳和地幔中丰度很高。这些优点使得氧同位素地质温度计获得了广泛运用。如董传万等在计算浙江新昌早白垩世盆地中硅质岩石形成时的水温,利用硅质岩石氧同位素平衡分馏方程:

$$1000\ln \alpha_{\text{硅质岩-水}} = 3.09 \times 10^7 / T^2 - 3.29$$

计算出新昌硅质岩的同位素温度是 70.8℃~108.4℃^[1]。

然而,在实际应用中,对一些岩石矿物体系,根据不同的矿物之间实测氧同位素分馏值会计算出不同的温度,这样计算的温度差异并不能通过提高同位素测试精度或对现有分馏系数校准来弥补。七十年代以来,矿物中热力学非平衡过程及扩散作用的研究进一步开拓了地质学家们的视野,人们意识到,矿物的氧扩散直接影响着岩石内部各矿物之间的同位素分配,通过对这种过程的模拟能够成功地解释缓慢冷却的高温封闭体系中不同矿物对显示不同温度的本质。针对这些问题,Coletti(1986)提出了一个描述封闭体系中矿物氧同位素交换的模型(即 Cool 模型),Eiler et al (1992,1993,1994)提出了一个晶粒之间氧扩散的快速颗粒边界模型(简称 FCB 模型),这两个模型都从各自的角度揭示了扩散作用对氧同位素的影响。2000 年王峰嵘、郑永飞等,根据现有氧扩散模型结合质量平衡方程,通过对模拟矿物之间的氧同位素交换轨迹进行模式温度计算,改进了常规矿物对氧同位素地质温度计方法,将模式温度计算与矿物氧扩散封闭次序相结合,建立了一个系统独立的氧同位素温度计算方法,因此所得到的同位素温度能更好的反映矿物在高温岩石冷却过程中的氧同位素交换行为,对研究岩石体系的地质作用过程有良好的指示作用。对大别山双河两种片麻岩所进行的模式温度计算得到副片麻岩中石榴石和榍石的模式温度为 695℃~30℃,正片麻岩中石榴石和磁铁矿的模式温度 560℃~50℃,在高温下的降温阶段,副片麻岩与正片麻岩可能有不同的冷却历史,但两种片麻岩可能均经历过榴辉岩相温度的变质作用^[2]。

2. 氧同位素组成作为矿物晶出顺序的判别标志

岩浆演化过程中,随着温度的降低,造岩元素晶出具有一定的顺序性,不同矿物晶出的先后,体现了元素在岩浆熔体和固相中的不同分配,反映了元素迁移演化的规律。鲍温反应序列表明了岩浆结晶演化的基本趋势。在反应序列中,暗色矿物的晶出顺序是:橄榄石-辉石-角闪石-黑云母;暗色矿物之后是钾长石-白云母-石英。浅色矿物斜长石及钾长石的晶出顺序为:钙长石-钠长石-钾长石。

同时,岩浆在冷却凝结过程中,由于各类含氧矿物总有 ^{16}O 富集在先, ^{18}O 富集于后的演化规律。结晶过程中,由于浓度及温度梯度引起的分子或离子的扩散过程中,同位素的质量差都将产生分馏效应,分子的扩散速度与分子质量平方根成反比,因此扩散的前方将富集轻同位素。因此岩浆冷却结晶矿物中应富含 ^{16}O ,随着结晶程度的增加,后结晶出的矿物中 ^{18}O 组分含量逐步增加。

从热力学的角度来讲,两相间发生同位素分馏的原因是同位素的热力学性质有差异,量子化学告诉我们:分子的能量包括分子中的电能,加上分子中原子的平动能、转动能及振动能,以及这些运动互相作用的有关能量。其中电能是最主要的,但对于同一元素的不同同位素来说,由于外电子壳层的结构完全相似,因而在分子中的电能基本上是一样的。振动能在键能中占有一定地位,它恰好是产生同位素分馏的主要原因。因为振动频率与原子质量成反比。因此,含有较轻同位素的分子比含有较重同位素的同样分子具有较高的振动频率,也就是说具有较高的零点能。这个现象的后果之一是较轻同位素形成的化学键较弱,因而容易被打开,分子活性较大。因此,在两相的同位素平衡交换反应中,较轻同位素将集中在化学键较弱的相中。爱泼斯坦和泰勒(1967)等人根据大量天然样品分析及实验数据总结了下列 $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ 递降顺序:石英,白云石,碱性长石,方解石,文石,霞石,钙长石,蓝闪石,硬柱石,石榴石,角闪石,黑云母,橄榄石,绿泥石,钛铁矿,磁铁矿,此系列反映了矿物氧键由强变弱的趋势。即 Si-O-Si 键最强, Si-O-Al 键, Si-O-Mg 键次之, Fe-O-Fe 最弱^[3]。以上所反映的氧同位素分馏变化规律与鲍温反应序列相互印证。因此氧同位素组成可以作为矿物晶出顺序的判别标志,来推断矿物形成过程平衡还是有外来因素的干扰,并结合其它地质信息找出干扰因素及干扰的时间等。

3. 氧同位素组成对矿物源区的指示意义

由于地壳物质与地幔物质的氧同位素组成存在差异,因此氧同位素也是研究物质来源及壳幔相互作用的重要手段之一。从地球上地幔衍生出来的岩浆,具有非常一致和特征的氧同位素组成($\delta^{18}\text{O}\text{‰} = +5.5 \sim 7.0\text{‰}$)这种原是演讲的单纯结晶作用,不可能使较晚的分异产物的 $\delta^{18}\text{O}$ 有大的变化,因为在岩浆温度下,硅酸盐熔体和矿物间的平衡同位素分馏是非常小的。而地壳的氧同位素组成具有比地幔更宽的范围($\delta^{18}\text{O}\text{‰} = +5 \sim 25\text{‰}$)。因此在实际工作中,把岩体中氧同位素组成与已有标准进行比较,可做为判别岩石成因的重要依据。

2002 年,夏群科等对大别山道士冲地区辉石岩锆石的氧同位素组成进行了测定。在对选定的 22 个点的典型岩浆锆石测定氧同位素后,得出这 22 个点的总平均值为 7.66‰。岩浆温度锆石和基性岩浆之间的氧同位素分馏值约为 0.5‰。因此道士冲辉岩母岩浆的 $\delta^{18}\text{O}$ 值约为 8.2‰^[4]。由于基性岩浆是典型的幔源岩浆,经过与正常地幔氧同位素组成比较发现,道士冲的 $\delta^{18}\text{O}$ 值是壳幔相互作用产生的。

4. 结论

氧同位素因其分布广泛,含量丰富,形成稳定并不易被其他地质因素干扰,得到了越来越广泛的应用。在氧同位素测温方面,在矿物-水系统中,利用氧同位素分馏值可以准确地得到岩石形成时的水温,但是在矿物对氧同位素测温时出现不同矿物对实测温度不同的问题,通过对氧扩散过程的模拟计算模式温度,是对这一问题的一种解决方法,但此方法也存在一些问题,如只有有限扩散封闭次序才能保证模式温度有唯一解,并且在计算是要求有准确的单矿物氧同位素比值,矿物摩尔百分含量及准确的分馏方程等,因此也有待于进一步的完善和补充。利用氧同位素判断矿物晶出顺序也只是处于理论阶段,在实际应用中还没有发挥其作用。在判断物质来源及壳幔相互作用中,氧同位素只作为辅助证据,只有在前一阶段的地质工作基础上才能作出判断,需要许多理论支持,才能做到准确。并且,对目前的研究状况来看,氧同位素主要用来判断岩浆岩的成分,形成阶段等,在变质岩和沉积岩研究方面应用比较少,本文认为,氧同位素组成分析可以与一些放射性同位素或稀土元素组成组合起来应用于地质问题的解决。

参考文献

- [1] 董传万等,浙江新昌早白垩世盆地中硅质岩石的地球化学特征与成因,浙江大学学报(理学版)2003.2(230-235).
- [2] 王峰嵘,矿物氧同位素地质温度计计算,岩石学报 2000.16(26-30).
- [3] 涂光炽等,地球化学,上海科技出版社,1982.
- [4] 夏群科,大别山道士冲地区辉石岩锆石的氧同位素组成:壳幔作用的新信息,科学通报 2002.16(1256-1260).
- [5] 黄德业,氧同位素在成岩成矿系列中的演化规律和应用—以胶东地区金、银为例,地质地球化学 1995.6(26-30).
- [6] 戚长谋等,地球化学通论,地质出版社,1993.
- [7] 杨东生等,大别山—苏北榴辉岩带同位素特征及其地质意义,科学通报 1994.2(151-153).