

海水中 Sr 同位素组成变化的环境意义与 Sr 同位素地层学

EVOLUTION OF THE Sr ISOTOPE OF THE SEA-WATER; IMPLICATIONS FOR PALAEOENVIRONMENT AND APPLICATION OF THE STRONTIUM ISOTOPE STRATIGRAPHY

韦刚健

(中国科学院广州地质新技术研究所 510640)

1 海水中 Sr 同位素组成变化

Sr 是海水中的—种常量组分,现代海水中含量为 7.9mg/kg,总量约为 1.21×10^{17} mol。海水中 Sr 的主要来源包括以下几种:首先是河水来源,河水将其流域内岩石风化产生的大量溶解 Sr^{2+} 带入海水中,这一部分的 Sr 通量约为 3.0×10^{10} mol/a, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值现代平均值为 0.711;其次为海底水岩界面交换所带入,其中主要通过海底扩张导致热液输入以及海底玄武岩的风化作用而输入,这一部分 Sr 通量为 1.2×10^{10} mol/a, $^{37}\text{Sr}/^{36}\text{Sr}$ 平均为 0.705;另外一个重要来源是海洋沉积物经成岩作用后淋滤出来的,其通量约 0.3×10^{10} mol/a, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 平均值约 0.7085。海水 Sr 主要通过海洋沉积物的沉降而脱离出来,其中以生物成因或非生物成因的碳酸盐沉积最为重要。根据稳态的简单箱式模型以及以上参数计算,全球海水中 Sr 的存留时间为 2.7Ma。对大洋来说,在很长的历史时期内,这个存留时间不会有太大变化。

然而海水平均混合时间只是千年尺度,远远短于 Sr 的存留时间,所以 Sr 在海水中的分布是均一的,而这种均—包括 Sr 含量的均—及其同位素组成的均—,这里更注重同位素组成分布的均—。Burke(1982)研究了现代大洋中一些微生物的碳酸盐壳,获得现代海水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.70907 \pm 0.00004$ ^[1], DePaolo(1985)类似的研究当中也获得与此—致的结果^[4]。

海水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 随时间变化的原因主要有以下两个:其一,海水 Sr 的各个输入源通量或 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 发生变化;其二, ^{87}Rb 衰变为 ^{87}Sr 。但由于海水中 Rb 的含量极低(120 $\mu\text{g}/\text{L}$),半衰期又特别长(5.0×10^{10} a),即使长达 100Ma 之久,其衰变产生的 ^{87}Sr 也只占海水 ^{87}Sr 的 0.03%。所以对较年轻的地质时代,后—种原因可以忽略。

这样,海水中 Sr 的演化实际上反映的是各来源的变化,归纳起来可以用—个简单的数学模式来表示:假设 N 表示海水中 Sr 的总浓度, R_{sw} 表示海水中的 $^{87}/^{86}\text{Sr}$

比值; J_n 表示第 n 个源的输入通量, R_n 表示其 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值, J_{out} 表示输出通量,则有:

$$\begin{cases} \frac{d(NR_{sw})}{dt} = \sum_n J_n R_n - J_{out} R_{sw} & (1) \\ \frac{dN}{dt} = \sum_n J_n - J_{out} & (2) \end{cases}$$

合并以上两式可得:

$$N \frac{dR_{sw}}{dt} = \sum_n J_n (R_n - R_{sw}) \quad (3)$$

2 海水 Sr 同位素组成变化的意义

生物成因碳酸盐沉积物则是研究地质历史时期的海水 Sr 同位素组成最理想的对象,其原因在于:与海水之间 Sr 同位素分馏基本可以忽略,分布广泛,极高 Sr 含量($>1000 \times 10^{-6}$),而 Rb 几乎没有。如果沉积后没有受到严重的成岩作用的影响,其 Sr 同位素组成就代表沉积时期海水的 Sr 同位素组成。

2.1 古海水 Sr 同位素组成变化曲线

早在 70 年代,就有人在研究古老碳酸盐岩时注意到古海水 Sr 同位素组成随时间的变化, Burke(1982 年)综合已往研究数据得出一条显生宙海水 Sr 同位素变化曲线^[1](图 1)。虽然这条曲线老于 100Ma 部分比较离散,但仍反映了海水 Sr 同位素组成变化的趋势。

随着 DSDP 研究的深入,不少学者对大批 DSDP 钻孔柱样进行了 Sr 同位素研究,将全球不同海区、不同年龄范围的钻孔柱样的研究结果进行综合,汇总起来得到—条非常清晰的 100Ma 以来海水 Sr 同位素组成演化曲线(图 2)^[6]。这条曲线与 Burke 曲线 100Ma 以来部分非常—致,是目前得到—致公认的标准演化曲线。

从海水 Sr 同位素组成演化曲线可以清楚看出, 100Ma 以来,海水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值是上升的,尤其是 80~

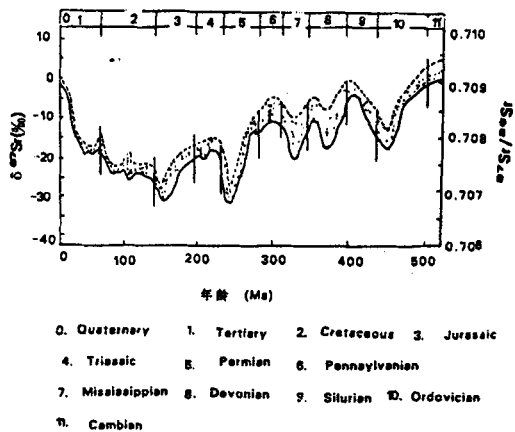


图1 显生宙以来海水⁸⁷Sr/⁸⁶Sr的比值变化
(摘自Burko W. H. 1982)

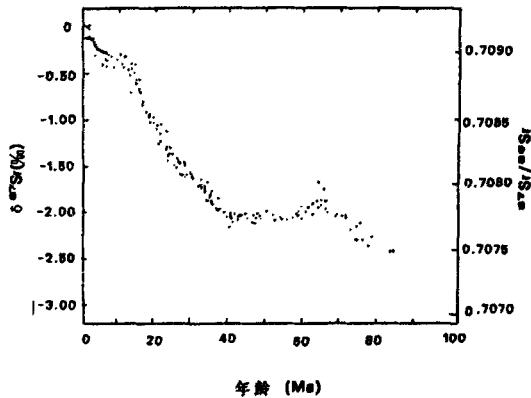


图2 100Ma以来海水中⁸⁷Sr/⁸⁶Sr比值变化
(摘自Elderfield H. et al., 1986)

65Ma之间及40~16Ma之间,海水的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr比值的
变化较快,升高的幅度极为显著;更新世以来,变化相对小
一些。

海水的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr比值变化在数值上极小,一般模仿
轻同位素的分馏定义了 $\delta^{87}\text{Sr}$ 值:

$$\delta^{87}\text{Sr} = \left[\frac{{}^{87}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr}_{\text{sm}}}{{}^{87}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr}_{\text{st}}} - 1 \right] \times 10^5$$

其中⁸⁷Sr/⁸⁶Sr_{sm}代表所要研究的海水Sr同位素比值,
⁸⁷Sr/⁸⁶Sr_{st}代表现代海水值。

2.2 模拟计算的启示

因为海水Sr同位素组成由各来源所控制,所以可
以从海水的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr比值的变化的情况去了解各来源的
变化,从中探讨其地质意义。

考虑到海水Sr的具体来源,(3)式可以改写如下:

$$N \frac{dR_{\text{sw}}}{dt} = J_{\text{rw}}(R_{\text{rw}} - R_{\text{sw}}) + J_{\text{h}}(R_{\text{h}} - R_{\text{sw}})$$

$$+ J_{\text{d}}(R_{\text{d}} - R_{\text{sw}}) \quad (4)$$

其中 r_{w}, h, d 分别表示河水、海底热液和成岩作用淋滤3
个来源。

沉积物成岩作用淋滤出来的Sr(包括碳酸盐溶解出
来的部分)其⁸⁷Sr/⁸⁶Sr比值(R_{d})与海水差不多,对海水Sr
同位素组成的变化起缓冲作用,一般不作为引起海水
⁸⁷Sr/⁸⁶Sr比值变化的主要因素,而这部分Sr通量(J_{d})
目前无太多了解,一般也认为变化不大。

海底热液及海底玄武岩的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr的变化一般都
很小(<0.001),所以 R_{h} 对海水⁸⁷Sr/⁸⁶Sr变化贡献甚小。
 J_{h} 可以通过一种半定量方法估计;Ritcher(1991)认为某
一时期海底扩张所产生的物质通量与当时海底扩张速
率成线性关系^[11],而海底扩张速率则可根据古地磁来
估算。现有的古地磁记录表明新生代以来全球海底扩张
比较平稳,可以用现代的 J_{h} 值来代替。

实际上,对新生代以来,海水⁸⁷Sr/⁸⁶Sr的变化主要
是来自大陆的Sr输入通量(J_{rw})或其⁸⁷Sr/⁸⁶Sr(R_{rw})变化
所致。Capo和DePaolo(1991)的研究指出海水⁸⁷Sr/⁸⁶Sr
在2.4~2.1Ma之间, $\delta^{87}\text{Sr}$ 升高了5.67^[2]。根据以上参
数计算,这相当于 J_{rw} 升高了31%或 R_{rw} 升高了3%,均
反映出大陆环境的较大变化。

2.3 影响陆源Sr通量或比值的主要因素

海水Sr同位素比值迅速升高反映了由河水带入的
大陆Sr通量或⁸⁷Sr/⁸⁶Sr增加,亦即反映了大陆风化速率
的显著加快。对于全球性的风化加速一般有以下几种原
因:其一是大规模的构造隆起;其二是气候的显著变化;
其三是灾变事件的发生。

2.3.1 构造隆起的影响

大面积的构造隆起,一方面使受风化剥蚀的面积加
大,较多的Sr被溶解并搬运到海水中,另一方面还使得
比较古老的岩石暴露于地表被风化,较高⁸⁷Sr/⁸⁶Sr的Sr
被剥蚀溶解,从而使海水⁸⁷Sr/⁸⁶Sr升高。

100Ma以来,海水⁸⁷Sr/⁸⁶Sr最显著的变化为40Ma
到15Ma之间的抬升。Richter和DePaolo(1992)研究发
现^[11]:从40Ma到20Ma海水 $\delta^{87}\text{Sr}$ 升高了84.6;而从
20Ma到15Ma $\delta^{87}\text{Sr}$ 升高了77.6。如果从50Ma时算起,
则50Ma以来海洋从河水中额外获得的Sr约为 2.0×10^{17}
mol。而根据青藏高原抬升速率计算了50Ma以来该
地区地壳体积增长量,折算成溶解Sr量,则这一时期额
外加入到海洋的溶解Sr为 $1.5 \times 10^{17} \sim 2.4 \times 10^{17}$ mol,
与上面计算的河水对海洋Sr的净增加量相当。这意味
着40Ma至15Ma期间海水⁸⁷Sr/⁸⁶Sr的显著升高是由于
印度板块与欧亚板块的碰撞,青藏高原的隆起所致。

2.3.2 冰期-间冰期转换的影响

全球性气候变化,亦即通常所说的冰期-间冰期的转换,对陆地表层的风化作用是有明显影响的,因而由河水搬运入海洋的 Sr 通量和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值也必定有所响应。

冰期低海平面时期,陆地面积大,风化剥蚀的物质增多。另外冰川有助于岩石的物理风化作用。Hodell (1990)研究指出冰川对于岩石的化学风化也有很强的促进作用^[3],这样冰期从河水输入的溶解 Sr 量增加,海水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值升高。

比较古老时代的气候变化记录不太容易获得,不过深海柱状沉积物有孔虫氧同位素地层的建立,基本勾画出了更新世以来气候变化的轮廓。如果海水中 Sr 同位素组成的变化是由气候变化所引起,那么海水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 的变化可与相应的氧同位素变化相对应。Dia(1992)^[5]和 Clemens^[3](1993)分别分析 V28-238 及 DSDP758 钻孔的有孔虫 Sr 同位素组成,发现 $\delta^{87}\text{Sr}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 有相当一致的不同步变化: $\delta^{87}\text{Sr}$ 高对应于 $\delta^{18}\text{O}$ 低的时期,即较暖时期。这是否意味着较暖的间冰期,大陆的风化速率较高,或者 $\delta^{87}\text{Sr}$ 的变化与 $\delta^{18}\text{O}$ 存在时间差。

目前对于这些大规模气候变化的具体情况了解仍不够,从以上研究结果至少肯定,全球性的气候变化,影响到陆表的风化情况,从而直接影响到海水的 Sr 同位素组成。

2.3.3 灾变事件

白垩纪/第三纪之间(K/T 界线)可能存在灾变事件这一观点已为许多人所接受,而海水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 对此也有明显的反映。由图2可以看出,在相当于K/T界线的60~70Ma之间存在一个 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 变化峰。Hess(1986)^[7]曾作过简单讨论,Martin(1991)^[10]及McArthur(1992)^[11]则对此作过专门研究,根据多个DSDP钻孔有孔虫Sr同位素测定结果计算后认为:K/T界线处存在一次小行星撞击,行星碰撞地球后造成火山活动激烈,同时诱发森林大火,在大气中形成一个极酸性的环境($\text{pH}\approx 1$),加速了古老的结晶岩石的风化,释放出 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 很高的Sr,并将其带入海洋当中,造成海水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 迅速升高。

3 Sr 同位素地层学的应用

海洋沉积物地层研究中沉积物年龄的获得,使用生物地层学方法,包括依赖于生物化石的其他地层学方法往往只适用于生物化石丰富而保存完好的沉积物,而Sr

同位素地层学方法则更有其优越性。

由于海水中的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值分布均匀,而海洋自生沉积物(如碳酸盐等)其Sr同位素组成与形成时期海水的一致,所以同一时期沉积下来的沉积物具有相同的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 。这样可以根据已往诸多沉积物柱的研究结果建立起海水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 随时间变化的标准曲线,通过测定沉积物中 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$,与标准曲线相对照,则可确定该沉积物的年龄。

Sr 同位素地层学方法比其他一些地层学方法优越之处在于: Sr 同位素地层学方法并不要求样品保存很好的生物形态,对于受过溶解,甚至完全分辨不出生物外形的样品一样适用。另外,由于其对样品要求的这种较宽松的条件,使得在处理样品时简单方便得多。近年来这一方法已经有了广泛的应用。

不过在应用 Sr 同位素地层学方法时还是有较严格的条件的,尤其在分析精度、年龄标准等方面有待进一步研究。

在世界上广泛开展海水的 Sr 同位素组成研究也只有数十年时间,但已取得了一定的成果。虽然目前我国尚未有这方面的研究成果的报道,但从其发展趋势看来,这是一个值得推荐和尝试的研究方向。

主要参考文献

- [1] Burke W. H. , 1982. *Geology* 10: 516-519.
- [2] Capo R. C. and DePaolo D. J. ; 1990. *Science* 245: 51-55.
- [3] Clemens S. C. , Farnell J. W. and Gromet L. P. . 1993. *Nature* 363: 607-610.
- [4] DePaolo D. J. and Ingram G. R. , 1985. *Science* 227: 38-41.
- [5] Dia A. N. , Cohen A. S. , Nions R. K. D. and Shackleton N. J. , 1991. *Nature* 356: 786-788.
- [6] Elderfield H. , 1986. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology* 57: 71-90.
- [7] Hess J. et al. , 1986. *Science* 231: 979-984.
- [8] Hodell D. A. et al. , 1989. *E. P. S. L.* 92: 165-178.
- [9] Martin E. E. and Macdougall J. D. , 1991. *E. P. S. L.* 104: 166-180.
- [10] McArthur J. M. and Burnett J. , 1992. *Nature* 355: 28.
- [11] Richter F. M. , Rowley D. B. and DePaolo D. J. , 1992. *E. P. S. L.* 109: 11-23.